

# 空港土木施設設計要領 (耐震設計編)

平成31年4月  
(令和4年4月一部改正)

国土交通省航空局

空港土木施設設計要領（耐震設計編）

改正履歴表

| 改正番号                      | 改正年月日            | 適用年月日           | 項番号 | 改正概要              |
|---------------------------|------------------|-----------------|-----|-------------------|
| 国空計第 135 号<br>国空空技第 561 号 | 平成 31 年 3 月 29 日 | 平成 31 年 4 月 1 日 | 全体  | 空港土木施設設計<br>要領の制定 |
| 国空計第 288 号<br>国空空技第 540 号 | 令和 4 年 3 月 18 日  | 令和 4 年 4 月 1 日  | 設計例 | 一部改正              |

## 序

### 背景

空港土木に関する技術基準は、昭和 43 年 9 月に「空港土木施設設計施工基準作成委員会」を設置して検討を開始し、「空港アスファルト舗装構造設計要領」及び「空港コンクリート舗装構造設計要領」を作成した後、昭和 48 年 3 月に最初の「空港土木施設設計基準」をとりまとめ、その後、航空輸送需要の増大などの航空界の発展に伴う空港を取りまく情勢の変化を踏まえ、昭和 56 年 3 月に「空港土木に関する技術問題協議会」及びその下部機関の「空港土木技術基準等整備委員会」を設置して技術基準の整備体系の強化を図り、昭和 57 年 10 月に「空港土木施設設計基準」を全面的に見直し、昭和 59 年 10 月には「空港舗装補修要領（案）」を、昭和 60 年 8 月には「空港排水施設・地下道・共同溝設計要領」を作成し、その後も、新型航空機の導入や国際民間航空条約第 14 付属書の改正に呼応して、平成 11 年 4 月に「空港舗装構造設計要領」を作成し、適時「空港土木施設設計基準」等の一部改訂を実施している。

平成 20 年 3 月、WTO（世界貿易機構）における「政府調達協定」や、TBT 協定（貿易の技術的障害に関する協定）などを背景とした国際規格との整合を図りつつ、「土木・建築にかかる設計の基本」に基づく性能設計に沿った設計手法（性能規定）を導入するため、外部有識者で構成する「空港土木施設の設計手法検討委員会」を設置し、平成 20 年 6 月に、空港土木施設の要求性能を示す基準（航空法施行規則第 79 条）と性能の照査に必要な事項を定めた告示（国土交通省告示第 800 号）を定め、これまでの「空港土木施設設計基準」を、基準（航空法施行規則第 79 条）の解説書と位置付けて「空港土木施設の設置基準解説」に改め、性能の照査の方法の例などを示す「空港舗装設計要領」、「空港土木施設構造設計要領」及び「空港土木施設耐震設計要領」をとりまとめ、抜本的な技術基準の体系の見直しを図っている。

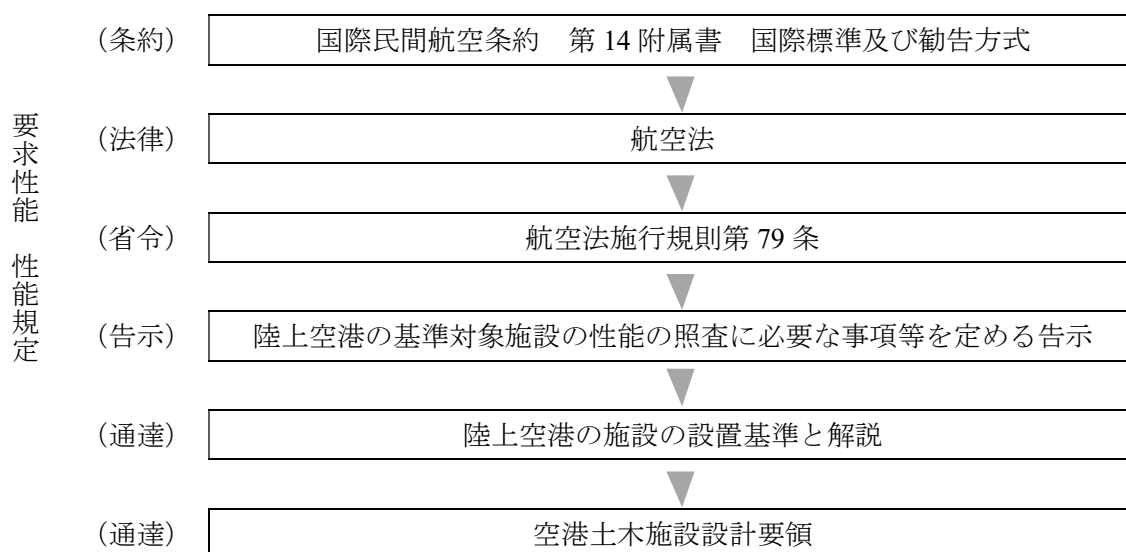
基準（航空法施行規則第 79 条）の解説書の「空港土木施設の設置基準解説」は、空港土木施設の設計に際して各施設が具備すべき位置、形状、強度等を決定するための事項を示すとともに設計の合理化並びに効率化を図ることを目的として定めたものであるが、近年、国際民間航空機関（ICAO）では、ICAO USOAP（国際航空安全監視監査プログラム）等を導入して、さらなる航空の安全の確保や規制の強化に取り組んでおり、このような国際的な動向を踏まえ、航空機の航行の安全の確保ために最低限遵守しなければならない事項をより明確に示すことを目的として、平成 31 年 3 月に規制の内容に特化した基準（航空法施行規則第 79 条）の解説書となる「陸上空港の施設の設置基準と解説（以下「基準解説」という.）」が策定された。

「基準解説」の策定に伴い、これまで設計の合理化並びに効率化を図ることを目的として作成した「空港土木施設の設置基準解説」は、「基準解説」の規定や、計画・設計上の留意事項等を示す「空港土木施設設計要領（施設設計編）」に改め、また、施設に求められる性能の照査方法の例などを示す「空港舗装設計要領・空港舗装補修要領」、「空港土木施設構造設計要領」及び「空港土木施設耐震設計要領」は、「空港土木施設設計要領（舗装設計編）」、「空港土木施設設計要領（構造設計編）」及び「空港土木施設設計要領（耐震設計編）」に改め、全 4 編で構成する「空港土木施設設計要領（以下「設計要領」という.）」を定めて、基準と要領の明確化を図ることとした。

## 基準体系

わが国の空港土木に関する基準は、下図に示すとおり、国際民間航空条約の規定並びに同条約の附属書として採択された国際標準及び勧告方式に準拠して定めた航空法、陸上空港等の設置の基準を規定する航空法施行規則第79条、陸上空港の基準対象施設の性能の照査に必要な事項等を定める告示、「基準解説」により構成している。

「設計要領」は、「基準解説」の下部に位置付けられているが、その内容は、空港土木施設の計画・設計の合理化並びに効率化を図ることを目的とし、これまでの実績を踏まえた標準的な考え方や推奨する方法、施設に求められる性能の照査方法の例などを示すものであって、計画・設計の方法等を拘束するものではない。



## 要領の構成

「設計要領」は、次の4編により構成する。

施設設計編：「基準解説」の規定（施設の要求性能、性能規定）、計画・設計上の留意事項等

舗装設計編：舗装の設計方法、性能照査の方法の例等

構造設計編：構造物の設計方法、性能照査の方法の例等

耐震設計編：空港の施設等の耐震設計方法等

施設設計編は、「基準解説」の規定を明記した上で、計画・設計上の留意事項等を併記する構成を基本とし、実線枠囲いに【基準】を、その下に【解説】と【要領】を示している。なお、「基準解説」に規定されていない施設については、「設計要領」のみの記載となるが、この場合の実線枠囲いには、設計上の原則や基本的な事項を示している。また、舗装設計編、構造設計編及び耐震設計編については、実線枠囲いに設計上の原則や基本的な事項を示し、枠囲いの下に、細部の手法や考え方を示している。

## 字句の意味

「設計要領」で用いる字句の意味は、下表に示すとおりとする。

| 分類  | 適用上の位置づけ   | 末尾に置く字句の例                        |
|-----|--|----------------------------------|
| 必須  | 技術的に明確であり遵守すべき事項   | ～とする（こと）.<br>～である（こと）.           |
| 考え方 | 目的や概念，考え方を記述した事項   | ～としている.<br>～必要がある.               |
| 標準  | 条件によって一律に規制することはできないが，特段の事情がない限り記述に従い実施すべき事項   | ～を標準とする.<br>～による.                |
| 推奨  | 条件によって実施することがよい事項  | ～望ましい.<br>～することができる.<br>～としてもよい. |
| 例示  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・適用範囲や実施効果について確定している段階ではないが，条件等によっては導入することが可能な技術等の例示</li> <li>・条件等によって限定的に実施できる技術等の例示</li> <li>・具体的に例示することにより，技術的な理解を助ける事項</li> </ul> | ～場合がある.<br>～に示している.<br>例えば～.     |

## 目次

### 空港土木施設設計要領（耐震設計編）

#### 第1章 総則

|          |   |
|----------|---|
| 1.1 目的   | 1 |
| 1.2 適用範囲 | 1 |
| 1.3 用語   | 1 |

#### 第2章 耐震設計の基本

|                         |   |
|-------------------------|---|
| 2.1 総説                  | 2 |
| 2.2 輸送形態に応じた空港土木施設の耐震性能 | 3 |
| 2.3 空港土木施設の耐震性能         | 3 |

#### 第3章 耐震性能の照査方法

|               |    |
|---------------|----|
| 3.1 総説        | 7  |
| 3.2 設計限界値     | 8  |
| 3.3 地震動       | 14 |
| 3.3.1 レベル一地震動 | 14 |
| 3.3.2 レベル二地震動 | 14 |
| 3.4 液状化の予測・判定 | 15 |
| 3.5 土圧        | 15 |
| 3.6 設計応答値     | 16 |

#### 第4章 液状化対策

|              |    |
|--------------|----|
| 4.1 総説       | 17 |
| 4.2 対策範囲     | 17 |
| 4.3 対策レベル    | 17 |
| 4.4 液状化対策の照査 | 18 |

|      |    |
|------|----|
| 参考文献 | 19 |
|------|----|

## 付録

|      |   |      |
|------|---|------|
| 付録-1 | 地盤の地震応答解析法の種類と概要-----                     | 付 -1 |
| 付録-2 | 構造物の耐震解析法の種類と概要-----                      | 付 -6 |
| 付録-3 | 二次元地盤の等価線形解析と<br>舗装構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法---- | 付-14 |
| 付録-4 | 空港で利用される可能性の高い液状化対策工法の概要-----             | 付-17 |
| 付録-5 | 液状化対策工法の選定・照査-----                        | 付-24 |
| 付録-6 | 二次元地盤の有効応力解析と<br>橋梁構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法の例   | 付-30 |
| 付録-7 | 空港舗装直下地盤への格子状地盤改良の適用-----                 | 付-34 |

## 設計例

|     |                           |      |
|-----|---------------------------|------|
| 例-1 | 耐震性能検討に係る空港施設の地震被害事例----- | 例 -1 |
| 例-2 | 入力地震動の設定事例-----           | 例-17 |
| 例-3 | 液状化対策範囲の検討例-----          | 例-36 |

## 第1章 総則

### 1.1 目的

耐震設計編は、空港土木施設の設計を行うにあたって、空港全体の総合的な耐震性を確保するために、空港を構成する各施設の標準的な耐震設計の手順を体系的に示し、設計の合理化並びに効率化を図ることを目的としている。

- (1) 空港がその機能を発揮するためには、空港を構成する各施設が十分機能することが必要であり、空港に求められる機能（地震災害時においても確保すべき輸送機能）に応じて、各施設の耐震性能が定められることとなる。耐震設計編では、空港に求められる機能に応じた各施設の耐震性能の考え方を示すとともに、各施設の耐震性能の照査に係る基本的な考え方を示している。

### 1.2 適用範囲

耐震設計編は、空港土木施設設計要領（施設設計編）<sup>19)</sup>（以下「施設設計編」という。）を適用する施設を対象としている。

- (1) 耐震設計編は、「施設設計編」<sup>19)</sup>を適用する施設を対象としているが、地震動を含め、様々な作用が複合的に働く場合については、耐震設計編以外の視点も含めて検討が必要なことから、総合的な性能及びその照査の基本的な考え方は、「施設設計編」<sup>19)</sup>、「空港土木施設設計要領（構造設計編）」<sup>2)</sup>（以下「構造設計編」という。）を参照することができる。

### 1.3 用語

耐震設計編における主な用語の意味は以下のとおりである。

- ・液状化 : 飽和した砂質地盤において、地震動により間隙水圧が急激に上昇し、地盤のせん断強度が著しく低下する現象をいう。
- ・応答変位法 : 地震時の表層地盤のせん断変形の影響を考慮して地中施設等の変位量や断面力を計算する方法をいう。
- ・動的解析法 : 地震時における構造物及び地盤の挙動を動学的に解析して部材の応力・ひずみ等の応答値を算定する方法をいう。
- ・設計供用期間 : 施設の設計にあたって、当該施設の要求性能を満足し続けるものとして設定される期間をいう。
- ・レベル一地震動 : 空港において発生するものと想定される地震動のうち、地震動の再現期間と当該施設の設計供用期間との関係から当該施設の設計供用期間中に発生する可能性の高いものをいう。
- ・レベル二地震動 : 空港において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するものをいう。
- ・震源特性 : 震源断層の破壊過程が地震動に与える影響をいう。
- ・伝播経路特性 : 震源から当該地点の地震基盤に至る伝播経路が地震動に与える影



|        |                            |
|--------|----------------------------|
|        | 響をいう。                      |
| ・サイト特性 | : 地震基盤上の堆積層等が地震動に与える影響をいう。 |

## 第2章 耐震設計の基本

### 2.1 総説

空港土木施設の設計にあたっては、空港に求められる機能に応じた耐震性能を確保するとともに、この機能に拘わらず、レベル一地震動、レベル二地震動それぞれに対し、以下の基本的な耐震性能を有するものとする。

(1) レベル一地震動に対して、航空機の運航に必要な機能に影響を与えないこと。

(2) レベル二地震動に対して、人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を与えないこと。

- (1) 空港の主な機能としては、公共交通機関として果たす本来の機能の他、大規模地震発生時における緊急物資・人員等の輸送や救急・救命活動の拠点としての機能がある。地震災害時においてどの程度の輸送機能を確保すべきかは、航空ネットワークにおける役割、背後圏経済活動における役割及び緊急物資輸送形態等を踏まえて総合的に検討する必要がある。
- (2) 空港土木施設は、レベル一地震動による損傷等が当該施設の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさない使用性を確保するものとする。
- (3) 空港土木施設は、基本施設の被災に伴い空港の運用を停止する場合や、施設上に滑走路等の基本施設が存在する場合には、当該施設の被災が滑走路等の施設にも影響を与え、緊急救命活動や緊急物資等輸送の拠点としての役割が損なわれ、周辺地域の人命や財産の損失に重大な影響を及ぼす可能性がある。また、当該空港が航空ネットワークや背後圏経済活動において重要な役割を果たしている場合には、当該施設の被災に伴う空港の運用停止により、緊急救命活動や緊急物資等輸送の拠点としての役割が損なわれるだけでなく、社会経済活動に重大な影響を及ぼす可能性があることから、レベル二地震動に対しても小規模な修復による施設機能の迅速な回復が求められる。なお、地下道及び橋梁等、人、車両が通行する施設は、被災により構造の安定性が損なわれた場合に、人命に重大な影響を及ぼす可能性があることから、レベル二地震動に対しても構造の安定性を確保するものとする。この他、空港の施設でレベル一地震動のみの性能を示している施設であっても、高盛土で構成される盛土地盤のように、被災による修復が長期間にわたる可能性がある、又は高盛土の崩壊によって空港周辺の民家等に重大な被害が及ぶ可能性がある等、当該施設の被災によって、その影響が長期又は広範に及ぶ可能性がある場合においては、レベル二地震動等に対する安全性についても確保するものとする。
- (4) 空港の施設において、その基礎となる地盤及び地下構造物は、空港の施設に求められる機能を損なわない性能を有する必要がある。
- (5) 空港土木施設は、地震動以外にも様々な作用が複合的に働く場合があり、この場合には、耐震性能を含めた総合的な性能を適切に設定する必要がある。
- (6) 耐震設計編は、「施設設計編」<sup>19)</sup>を適用する施設の耐震性能の考え方を示しているため、空港機器関係の耐震性能の考え方を示すものではない。ただし、空港機器関係(管制機器等)

が設置されている基礎等の土木施設は、空港機器関係の機能確保の観点から、耐震設計編で示す以上の耐震性能が求められる場合もある。

## 2.2 輸送形態に応じた空港土木施設の耐震性能

空港土木施設の設計にあたっては、空港を構成する各施設が、地震発生後の想定される輸送形態に対応できる耐震性能を有するものとする。

- (1) 空港土木施設は、施設自体の損傷が人命に直接影響を及ぼすものと、施設の損傷により、航空機が運航できずに人命、財産又は社会的活動に影響を与えるものがある。このため、人命に直接影響を及ぼす施設は、それに応じた耐震性能が必要であり、それ以外の施設については地震発生直後（地震発生後3日間程度）において確保すべき輸送機能に応じて耐震性能が必要である。
- (2) 地震発生後において確保すべき輸送機能によって、固定翼機による旅客輸送、緊急物資輸送、回転翼機による緊急物資輸送等の輸送形態が想定される。空港土木施設は、これら輸送形態に応じて、所要の耐震性能を満たすことが必要となるが、一般に、緊急物資輸送に比べ旅客輸送の方が、高い耐震性能が必要となる他、これら輸送形態をどの程度確保する必要があるかに留意する必要がある。なお、大量の緊急輸送を行える緊急輸送機等は、一般に民間航空機より短い滑走路長で離着陸できるものの、地理的条件や輸送形態等を踏まえて検討する必要がある。

## 2.3 空港土木施設の耐震性能

空港土木施設の設計にあたっては、地震発生後に空港に求められる基本的な耐震性能及び輸送機能に応じた耐震性能を踏まえ、地震規模及び施設に応じて求められる性能を設定するものとする。また、これら性能の評価項目は、地震規模や施設の構造特性に応じて適切に設定するものとする。

- (1) 空港の施設は、レベル一地震動に対して、機能を損なわず、継続して使用することが必要である。また、レベル二地震動に対しては、被災により人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を及ぼす可能性のある施設について、修復性を確保することが必要である。
- (2) その他の施設については、レベル一地震動に対して、機能を損なわず、継続して使用することが必要である。また、空港全体の総合的な耐震性能を確保するために、レベル二地震動に対しても技術的に可能でかつ経済的に妥当な範囲で継続的な使用を可能とする性能、いわゆる修復性が求められる場合には、各施設の構造等について十分な強度を有する必要がある。
- (3) 空港土木施設の耐震性能の評価項目は、「陸上空港の施設の設置基準と解説」<sup>1)</sup>（以下「基準解説」という。）、「施設設計編」<sup>19)</sup>、「構造設計編」<sup>2)</sup>に準じて適切に設定するものとするが、一般的には表-2.1に示すとおりである。また、その際、以下の施設はこれに加えて他の基準・指針等も参考とすることができる。

- 1) 滑走路，過走帯，誘導路，エプロン，着陸帯，滑走路端安全区域，誘導路帯の護岸等
  - 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>
  - 「埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）」<sup>4)</sup>
- 2) GSE 通行帯等
  - 橋梁構造の場合
    - 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」<sup>5)</sup>
  - 地下構造物の場合
    - 「トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説」<sup>6)</sup>
    - 「コンクリート標準示方書 設計編」<sup>7)</sup>
    - 「道路土工 擁壁工指針」<sup>8)</sup>
    - 「道路土工 カルバート工指針」<sup>9)</sup>
- 3) 道路・駐車場
  - 「駐車場設計・施工指針 同解説」<sup>10)</sup>
  - 橋梁構造の場合
    - 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」<sup>5)</sup>
  - 地下構造物の場合
    - 「トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説」<sup>6)</sup>
    - 「コンクリート標準示方書 設計編」<sup>7)</sup>
    - 「道路土工 擁壁工指針」<sup>8)</sup>
    - 「道路土工 カルバート工指針」<sup>9)</sup>
- 4) 排水施設
  - 「コンクリート標準示方書 設計編」<sup>7)</sup>
  - 「下水道施設の耐震対策指針と解説」<sup>11)</sup>
  - 「水道施設耐震工法指針・解説」<sup>12)</sup>
  - 「河川砂防技術基準（案）同解説」<sup>13)</sup>
- 5) 共同溝
  - 「コンクリート標準示方書 設計編」<sup>7)</sup>
  - 「共同溝設計指針」<sup>14)</sup>
- 6) 進入灯橋梁
  - 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>
  - 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」<sup>5)</sup>

表-2.1(1) レベラー地震動に対する空港土木施設の耐震性能（評価項目）

| 施設       | 評価項目   |
|----------|--|
| 滑走路      | ① 地盤の液状化の有無<br>② 地盤の変形（勾配・段差）※1<br>③ 地盤の支持力※1<br>④ ひび割れ発生状況                |
| 誘導路      |  |
| エプロン     |  |
| 過走帯      |  |
| 着陸帯      | ① 地盤の液状化の有無<br>② 地盤の変形（勾配・段差）※1  |
| 滑走路端安全区域 |  |
| 誘導路帯     | ① 地盤の液状化の有無<br>② 地盤の変形（段差）※1   |
| 飛行場標識施設  | —  |
| GSE 通行帯等 | イ) 当該施設が地下構造物の場合,<br>① 地盤の液状化の有無<br>② 構造の損傷<br>ロ) 当該施設が橋梁構造の場合,<br>① 構造の損傷 |
| 道路・駐車場   |  |
| 排水施設     | イ) 当該施設が地下構造物※2及び調節池の場合,<br>① 地盤の液状化の有無<br>② 構造の損傷                         |
| 共同溝      | ① 地盤の液状化の有無<br>② 構造の損傷   |
| 消防水利施設   |  |
| 場周柵      | ① 構造の倒壊  |
| ブラストフェンス |  |
| 土構造物・護岸  | ① 地盤の液状化の有無<br>② 護岸，高盛土を含む場合，地盤の変位   |
| 進入灯橋梁    | ① 構造の損傷  |

※1 ①の評価の結果，液状化が想定される場合，及び護岸，高盛土を含む場合の評価項目

※2 排水施設の地下構造物：暗渠（ボックスカルバート・剛性管・とう性管），接続部（マンホール）

表-2.1(2) レベルII地震動に対する空港土木施設の耐震性能（評価項目）

| 施設       | 大規模地震発生後に必要とされる輸送形態   |                   |   |
|----------|---|-------------------|---|
|          | 固定翼機による<br>旅客輸送   | 固定翼機による<br>緊急物資輸送 | 回転翼機による<br>緊急物資輸送                             |
| 滑走路      | ① 地盤の液状化の有無<br>② 地盤の変形（勾配・段差）※1<br>③ 地盤の支持力※1<br>④ ひび割れ発生状況 |                   | ①（護岸，高盛土を含む場合）地盤の変形                           |
| 誘導路      |   |                   | ① 地盤の液状化の有無<br>② 地盤の変形（勾配・段差）※1<br>③ 地盤の支持力※1 |
| エプロン     |   |                   | ① 地盤の液状化の有無<br>② 地盤の変形（勾配・段差）※1<br>③ 地盤の支持力※1 |
| 過走帯      | —   |                   |   |
| 着陸帯      |   |                   |   |
| 滑走路端安全区域 |   |                   |   |
| 誘導路帯     |   |                   |   |
| 飛行場標識施設  |   |                   |   |
| GSE 通行帯等 |   |                   |   |
| 道路・駐車場   | ロ) 当該施設が橋梁構造の場合，<br>① 構造の損傷・変位                              |                   |   |
| 排水施設     | イ) 当該施設が地下構造物※2及び調節池の場合，<br>① 地盤の液状化の有無<br>② 構造の損傷          | —                 |   |
| 共同溝      | ① 地盤の液状化の有無<br>② 構造の損傷                                      |                   |   |
| 消防水利施設   | ① 地盤の液状化の有無<br>② 構造の損傷                                      |                   | —   |
| 場周柵      | —   |                   |   |
| ブラストフェンス | ① 構造の倒壊   |                   |   |
| 土構造物・護岸  | ② 地盤の液状化の有無<br>③ 地盤の変位※1                                    |                   |   |
| 進入灯橋梁    | ① 構造の損傷・変位  |                   | —   |

※1 ①の評価の結果，液状化が想定される場合，及び護岸，高盛土を含む場合の評価項目

※2 排水施設の地下構造物：暗渠（ボックスカルバート・剛性管・とう性管），接続部（マンホール）

### 第3章 耐震性能の照査方法

#### 3.1 総説

空港土木施設の耐震性能の照査は、施設の構造特性に応じた地震応答解析法に基づいて行うものとする。また、液状化について考慮が必要な施設については、適切な方法に基づいて液状化判定を行い、必要に応じてその影響を考慮して設計するものとする。

(1) 耐震性能の照査手順の例を図-3.1に示す。

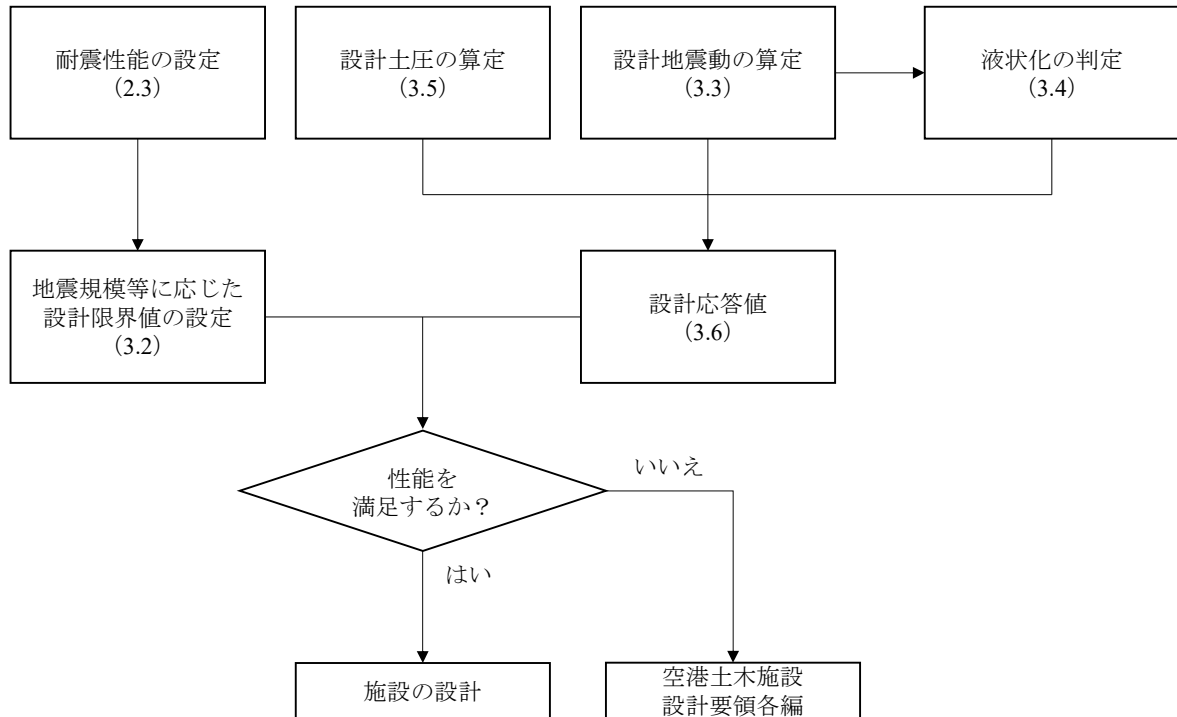


図-3.1 照査手順

(2) 空港土木施設の耐震性能の照査方法のうち、耐震設計編に記述されていない事項については、「基準解説」<sup>1)</sup>、「施設設計編」<sup>19)</sup>の他に以下を参考とすることができる。ただし、これらの照査にあたっては、特別な場合を除き航空機等による載荷重を作用として考慮しない。

「構造設計編」<sup>2)</sup>

「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」<sup>5)</sup>

「トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説」<sup>6)</sup>

「コンクリート標準示方書 設計編」<sup>7)</sup>

「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」<sup>15)</sup>

「共同溝設計指針」<sup>14)</sup>

「駐車場設計・施工指針 同解説」<sup>10)</sup>

「道路土工 擁壁工指針」<sup>8)</sup>

「道路土工 カルバート工指針」<sup>9)</sup>

「道路土工 切土工・斜面安定工指針」<sup>16)</sup>

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>

「埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）」<sup>4)</sup>

「下水道施設の耐震対策指針と解説」<sup>11)</sup>

「水道施設耐震工法指針・解説」<sup>12)</sup>

「河川砂防技術基準（案）同解説」<sup>13)</sup>

### 3.2 設計限界値

性能照査に用いる設計限界値は、当該施設の要求性能や地震規模、構造特性に応じて適切に設定するものとする。

- (1) 設計限界値は、当該施設の要求性能に応じて設定する限界状態を具体的な数値として表したものである。一般には、性能照査に用いる設計限界値は**表-3.1~3.4**を参考とすることができる。

表-3.1 レベラー地震動に対する空港の施設の設計限界値の例

| 施設       | 設計限界値の例  |
|----------|--|
| 滑走路      | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※1</sup> もしくは護岸・高盛土を含む場合、<br>a) 地盤の変形<br>・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配<br>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 <sup>※2</sup> までの変形を許容する<br>b) 地盤の支持力<br>間隙水圧比の経時変化<br>② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ   |
| 誘導路      | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※1</sup> もしくは護岸・高盛土を含む場合、<br>a) 地盤の変形<br>・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配<br>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 <sup>※2</sup> までの変形を許容する<br>b) 地盤の支持力<br>間隙水圧比の経時変化<br>② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ   |
| エプロン     | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※1</sup> もしくは護岸・高盛土を含む場合、<br>a) 地盤の変形<br>・最大勾配が1%以下<br>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 <sup>※2</sup> までの変形を許容する<br>b) 地盤の支持力<br>間隙水圧比の経時変化<br>② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ  |
| 過走帯      | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※1</sup> もしくは護岸・高盛土を含む場合、<br>a) 地盤の変形<br>・滑走路と同様に航空機が常時使用し、接続する滑走路の強度と同じ強度を有する過走帯は、航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する滑走路の最大縦断勾配及び最大横断勾配<br>・航空機が滑走路内で停止できない場合に備え、接続する滑走路の強度より小さい強度の過走帯は、航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する着陸帯の最大縦断勾配及び最大横断勾配<br>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配 <sup>※2</sup> までの変形を許容する<br>b) 地盤の支持力<br>間隙水圧比の経時変化<br>② 運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ |
| 着陸帯      | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※1</sup> もしくは護岸・高盛土を含む場合、  |
| 滑走路端安全区域 | a) 現地盤面との段差30cm以内、最大勾配1/2以内の変形   |
| 誘導路帯     | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※1</sup> もしくは護岸・高盛土を含む場合、<br>a) 現地盤面との段差30cm以内の変形  |
| 飛行場標識施設  | —  |

※1 地盤が液状化しなければ、レベラー地震動が作用しても、地盤上の舗装に勾配や段差等が発生する可能性は少ないことが、例えば、「1993年釧路沖地震港湾施設被害報告」<sup>17)</sup>などに示されている。護岸・高盛土を含む場合には、地盤が液状化しない場合においてもa)の照査を行う必要がある。

※2 「制限区域内工事実施指針 IV工事実施要領 1 一般 (3)工事期間中における舗装面のすり付け及び地盤面の処理」に示されている。

※3 通常的设计による場合、液状化が発生しなければ、レベラー地震動が作用しても、設計対象車両が通行不能となる程度の段差は発生する可能性は少ないことが、例えば「1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告」<sup>18)</sup>に示されている。

注) 表中の勾配は地震後の勾配を意味している。



表-3.2 レベルー地震動に対するその他の施設の設計限界値の例

| 施設         | 設計限界値の例   |
|------------|---|
| GSE 通行帯等※1 | イ) 当該施設が地下構造物の場合,<br>a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない<br>b) 損傷を許容しない   |
| 道路・駐車場※1   | ロ) 当該施設が橋梁の場合,<br>a) 損傷を許容しない   |
| 排水施設       | イ) 構造物がボックスカルバート, 剛性管, マンホールの場合,<br>a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない<br>b) 構造部材の応答が弾性限界内<br>ロ) 構造物がとう性管の場合,<br>a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない<br>b) 構造部材の応答が弾性限界内, たわみ率が許容値内<br>ハ) 構造物が調節池の場合,<br>a) 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない<br>b) 堤体がすべり破壊を生じない |
| 共同溝        | ① 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない  |
| 消防水利施設     | ② 構造の損傷を許容しない   |
| 場周柵        | ① 倒壊を許容しない  |
| ブラストフェンス   |   |
| 土構造物・護岸    | ① 構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない<br>② 護岸, 高盛土を含む場合は継続的な使用に影響を及ぼす変位を許容しない  |
| 進入灯橋梁      | ① 損傷を許容しない  |

※1 通常の設計による場合, 液状化が発生しなければ, レベルー地震動が作用しても, 設計対象車両が通行不能となる程度の段差は発生する可能性は少ないことが, 例えば「1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告」<sup>18)</sup>に示されている。

表-3.3 レベルII地震動に対する空港の施設の設計限界値の例

| 施設  | 大規模地震発生後に必要とされる輸送形態   |   |   |
|-----|---|---|---|
|     | 固定翼機による<br>旅客輸送   | 固定翼機による<br>緊急物資輸送   | 回転翼機による<br>緊急物資輸送                             |
| 滑走路 | <p>① 地盤が液状化する場合<sup>※1※2</sup></p> <p>a) 地盤の変形<br/>旅客輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長について、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配</li> <li>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配<sup>※3</sup>までの変形を許容する</li> </ul> <p>b) 地盤の支持力<br/>(過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p> | <p>① 地盤が液状化する場合<sup>※2</sup></p> <p>a) 地盤の変形<br/>緊急物資輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長について、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配</li> <li>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配<sup>※3</sup>までの変形を許容する</li> </ul> <p>緊急物資輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長以外について、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・比較的短期間で復旧可能な程度の変形</li> </ul> <p>b) 地盤の支持力<br/>(過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 比較的短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p> | <p>① 地盤の変形<br/>護岸、高盛土の全体系が崩壊するような変形を許容しない</p> |
| 誘導路 | <p>① 地盤が液状化する場合<sup>※2</sup></p> <p>a) 地盤の変形</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配</li> <li>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配<sup>※3</sup>までの変形を許容する</li> </ul> <p>b) 地盤の支持力<br/>(過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p>                                    | <p>① 地盤が液状化する場合<sup>※2</sup></p> <p>a) 地盤の変形<br/>緊急物資輸送に使用する必要な誘導路について、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・航空法施行規則第79条第1項第3号に規定する最大縦断勾配及び最大横断勾配</li> <li>・部分的な勾配については、舗装面のすり付け及び地盤面の処理の最大勾配<sup>※3</sup>までの変形を許容する</li> </ul> <p>緊急物資輸送に使用する機材の離着陸に必要な誘導路長以外について、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・比較的短期間で復旧可能な程度の変形</li> </ul> <p>b) 地盤の支持力<br/>(過剰間隙水圧の消散による) 必要な地盤の支持力の確保に影響を及ぼさない程度の間隙水圧比の経時変化</p> <p>② 比較的短期間で復旧可能な程度のひび割れ</p>         |   |

|                  |  |   |   |
|------------------|--|---|---|
| エ<br>プ<br>ロ<br>ン | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※2</sup><br>a) 地盤の変形<br>・最大勾配が 1%以下<br>・部分的な勾配については、<br>舗装面のすり付け及び地盤<br>面の処理の最大勾配 <sup>※3</sup> ま<br>での変形を許容する<br>b) 地盤の支持力<br>(過剰間隙水圧の消散によ<br>る) 必要な地盤の支持力の確<br>保に影響を及ぼさない程度の<br>間隙水圧比の経時変化<br>② 短期間で復旧可能な程度の<br>ひび割れ | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※2</sup><br>a) 地盤の変形<br>輸送機の駐機エリア及び誘導<br>路へ連絡する経路について、<br>・最大勾配が 1%以下<br>・部分的な勾配については、<br>舗装面のすり付け及び地盤<br>面の処理の最大勾配 <sup>※3</sup> ま<br>での変形を許容する<br>b) 地盤の支持力<br>(過剰間隙水圧の消散によ<br>る) 必要な地盤の支持力の確<br>保に影響を及ぼさない程度の<br>間隙水圧比の経時変化<br>② 比較的短期間で復旧可能な<br>程度のひび割れ | ① 地盤が液状化する場合 <sup>※2</sup><br>a) 地盤の変形<br>回転翼機の発着スペース及び<br>駐機エリアについて、<br>・最大勾配が 1%以下<br>・部分的な勾配については、<br>舗装面のすり付け及び地盤<br>面の処理の最大勾配 <sup>※3</sup> ま<br>での変形を許容する<br>b) 地盤の支持力<br>(過剰間隙水圧の消散によ<br>る) 必要な地盤の支持力の確<br>保に影響を及ぼさない程度の<br>間隙水圧比の経時変化 |
|                  | 過走帯  | —   |   |
|                  | 着陸帯  |   |   |
|                  | 滑走路端安全区域   |   |   |
|                  | 誘導路帯   |   |   |
|                  | 飛行場標識施設  |   |   |

※1 旅客輸送に使用する機材の離着陸に必要な滑走路長は、通常全長である。しかし、耐震性能を向上する場合にあっては、地震災害時の滑走路運用方法や対策費用を検討し決定することが望ましい場合もある。護岸・高盛土を含む場合には、地盤が液状化しない場合においても a)の照査を行う必要がある。

※2 地盤が液状化しなければ、レベルII地震動が作用しても、地盤上の舗装に勾配や段差等が発生する可能性は少ないことが、例えば、「1993年釧路沖地震港湾施設被害報告」<sup>17)</sup>などに示されている。

※3 「制限区域内工事实施指針 IV工事实施要領 1 一般 (3)工事期間中における舗装面のすり付け及び地盤面の処理」に示されている。

注) 表中の勾配は地震後の勾配を意味している。

表-3.4 レベルニ地震動に対するその他の施設的设计限界値の例

| 施設       | 大規模地震発生後に必要とされる輸送形態  |  |                   |
|----------|--|--|-------------------|
|          | 固定翼機による<br>旅客輸送  | 固定翼機による<br>緊急物資輸送  | 回転翼機による<br>緊急物資輸送 |
| GSE 通行帯等 | イ) 当該施設が地下構造物の場合,<br>a) 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>b) ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷<br>ロ) 当該施設が橋梁の場合,<br>a) 速やかに機能を回復できる程度の限定的な損傷   |  |                   |
| 道路・駐車場   | イ) 当該施設が地下構造物の場合,<br>a) 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>b) 人命、財産又は社会的経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある場合には、ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷<br>c) 上記以外の地下道については、構造の安定に重大な影響を及ぼさない程度の損傷<br>ロ) 当該施設が橋梁の場合,<br>a) 人命、財産又は社会的経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある場合 (B種の橋相当) については、速やかに機能を回復できる程度の限定的な損傷<br>b) 上記以外の橋梁 (A種の橋相当) については、構造の安定に重大な影響を及ぼさない程度の損傷 |  |                   |
| 排水施設     | ボックスカルバート  | ① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>② 構造部材の応答が保有断面耐力以下                          |                   |
|          | 剛性管渠   | ① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>② 構造部材の応答が保有断面耐力以下。継手部の変形は、水密性保持が可能な範囲内     |                   |
|          | とう性管渠  | ① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>② 構造部材の応答が保有断面耐力以下。継手部の変形は、水密性保持が可能な範囲内     |                   |
|          | マンホール  | ① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>② 構造部材の応答が保有断面耐力以下。管渠との接続部の変形は、水密性保持が可能な範囲内 |                   |
|          | 調節池  | ① 地盤の液状化は許容する<br>② 調節池の機能を速やかに補修できる程度の損傷や変形                                    |                   |
| 共同溝      | ① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>② ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷  |  |                   |
| 消防水利施設   | ① 構造物の浮上りや損傷に影響を与える地盤の液状化は許容しない<br>② ひび割れの修復等短期間で補修できる程度の損傷  |  | —                 |
| 場周柵      | —  |  |                   |
| ブラストフェンス | イ) ブラストフェンスの倒壊が人命に影響を与える場合,<br>a) 倒壊を許容しない   |  |                   |
| 土構造物・護岸  | ① 護岸、高盛土の全体系が崩壊するような変形を許容しない <sup>※1</sup>   |  |                   |
| 進入灯橋梁    | イ) 人命、財産に重大な影響を及ぼすおそれのある場合、構造の安定に重大な影響を及ぼさない程度の損傷 <sup>※2</sup><br>ロ) 空港の機能確保が必要で、その機能確保に進入灯が必要な場合、短期間で補修できる程度の損傷 <sup>※2</sup>  |  | —                 |

※1 土構造物・護岸のうち、燃料供給施設用地を設置している地盤等、当該用地に整備する施設が特に重要である場合は、地盤の液状化を許容しないことや地盤の変形を短期間で補修できる程度にとどめる必要がある。

※2 イ) 及びロ) の場合、落橋防止システムの設置は有効である。

### 3.3 地震動

地震動としてレベル一及びレベル二地震動の2段階の地震動を設定するものとする。

- (1) 耐震設計に用いる地震動は、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性などを踏まえて、工学的基盤面における時刻歴波形として適切に設定するものとする。
- (2) 地震の評価方法については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>を参考とすることができる。

#### 3.3.1 レベル一地震動

レベル一地震動は、地震動の実測値をもとに、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮して、確率論的時刻歴波形を適切に設定するものとする。

- (1) 想定地震に対する地震動評価に統計的グリーン (G.Green) 関数法を用いる場合、サイト増幅特性としては、対象空港で得られた地震観測記録から推定されるサイト増幅特性を用いることが望ましい。
- (2) 対象とする空港で地震観測記録が得られていない場合には、まず、近傍（空港から2km以内）の観測点におけるサイト増幅特性を利用できないか検討する必要がある。それが出来ない場合には、対象空港で短期間の地震観測を行い、サイト増幅特性を評価することが望ましい。
- (3) 当該空港において十分な地震観測期間が取れない場合には、周辺の観測点におけるサイト増幅特性から、経験的な関係を利用して対象空港でのサイト増幅特性を推定することができる。ただし、その場合の地震動の評価精度は地震観測に基づく場合と比較して大きく低下することに注意する必要がある。
- (4) 地盤の応答加速度は、適切な地盤モデルを用いた地盤の応答解析により求めることができる。震度法等の静的解析手法を用いて設計応答値を算出する場合、検討に用いる震度は、対象施設の構造形式、基礎地盤の特性、地震規模等を考慮して、適切に設定する必要がある。これらの方法として、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」<sup>5)</sup>では、加速度応答スペクトルを重力加速度で除する設計水平震度の算出方法が示されており、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>では、地盤の加速度を重力加速度で除する水平震度の算出方法が示されている。個々の空港土木施設に対する震度について十分な知見が得られていないため、関連する基準等を参考に適切に設定するものとする。

#### 3.3.2 レベル二地震動

レベル二地震動は、地震動の実測値、想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定するものとする。

- (1) レベル二地震動は、過去の地震に関する情報を総合的に考慮し、以下に示す地震動の中で対象空港に最大級の強さの地震動をもたらす地震を選定するものとする。
  - (a) 過去に大きな地震をもたらした地震の再来
  - (b) 活断層の活動による地震

- (c) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
  - (d) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
  - (e) 地域防災計画の想定地震
  - (f) M6.5 の直下地震
- (2) レベル二地震動の設定に用いる地震動の実測値は、対象施設の構造形式、基礎地盤の特性等を考慮して、適切に観測機器を設置して観測する必要がある。

### 3.4 液状化の予測・判定

地盤の液状化の予測及び判定は、一般に以下により行うものとする。

- (1) 地盤が緩く詰まった飽和砂質土等の場合においては、地盤が液状化するか否かの予測及び判定を行うこと。
- (2) 地盤が液状化するか否かの予測及び判定は、粒度と標準貫入試験値又は繰返し三軸試験を用いる等適切な方法によって行うこと。

- (1) 液状化の予測・判定の対象とする土層は地表面（海面下では海底面）から深さ 20m 以浅とすることができる。ただし、20m 以深でもその層で液状化が発生した場合に構造物に重大な損傷が生じると判断される場合や、明らかに上部 20m 以浅の土層と連続する層であると判断される場合には、これらの層も含めて液状化の予測・判定を行うことを標準とする。
- (2) 液状化の予測・判定法には、粒度と N 値による方法と繰返し三軸試験結果を用いる方法の 2 種類がある。粒度と N 値による方法は簡易な方法で一般的に使用できるが、これによる予測・判定が困難な場合、より詳細な方法である繰返し三軸試験結果を用いるのが一般的であり、これら方法については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>及び「埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）」<sup>4)</sup>を参考とすることができる。
- (3) レベル一地震動に対する地盤の液状化の検討においては、液状化が生じると予測・判定された場合には、液状化による構造物に及ぼす影響を勘案するとともに、対象施設の周辺状況等を考慮し、必要となる地盤の液状化対策を実施するものとする。
- (4) レベル二地震動に対する地盤の液状化の検討においては、対象施設の周辺の施設の状況等を考慮した総合的な検討に基づき、液状化対策の手法及び実施の必要性について判断するものとする。

### 3.5 土圧

地震時に考慮すべき土圧は、地盤特性や構造の種類等を考慮して、適切に設定するものとする。

- (1) 地震時に考慮すべき土圧は、地盤特性や構造物の種類等に応じた適切な土圧算定式により設定する必要がある。土圧の算定に必要な水平震度の設定は、3.3.1 を参照することができる。
- (2) 護岸等の港湾構造物に対する地震時土圧の算定は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>3)</sup>参考とすることができる。
- (3) 護岸等の港湾構造物に対する見掛けの震度の算定は、「港湾の施設の技術上の基準・同解

説」<sup>3)</sup>を参考とすることができる。

### 3.6 設計応答値

空港土木施設の地震時の設計応答値は、一般に、施設の構造形式、基礎地盤の特性、地震規模等を考慮して、適切な解析手法を用いて算出するものとする。

- (1) 空港土木施設の耐震解析手法には、主に、地盤又は地中構造物を対象とした動的解析法、及び地盤構造物、地中構造物の相互作用を対象とした応答変位法があり、施設の特性や、想定される状況に応じ、**表-3.5**を参考とすることができる。
- (2) 地盤の耐震解析手法は、せん断ひずみが0.5～1%程度以下と想定される場合には等価線形解析法が、また、地盤が軟弱な場合や地震動レベルが大きく、地盤内のせん断ひずみが1%を超える可能性もあると想定される場合には、非線形有効応力地震応答解析法の適用性があるとされている。地盤の耐震解析法の種類を**付録-1**に示す。
- (3) 構造形式が一般的な橋梁等の耐震解析を行う場合、1自由度系としてモデル化して良いが、高さのある構造物、規模の大きい構造物あるいは複雑な形状を有する構造物等は、多自由度系としてモデル化を行うのが望ましい。構造物の耐震解析法の種類を**付録-2**に示す。また、二次元地盤の等価線形解析と舗装構造の弾性解析を組み合わせた解析法を**付録-3**に示す。

**表-3.5 耐震解析手法の例**

| 対象施設   | レベル一地震動  | レベル二地震動  |
|--|--|--|
| 地盤<br>(滑走路、誘導路、エプロン、過走帯、着陸帯、滑走路端安全区域、誘導路帯)                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>&lt;通常の地盤&gt;</li> <li>・等価線形解析法</li> <li>&lt;軟弱な地盤&gt;</li> <li>・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）</li> </ul>   |
| 一般構造物<br>(GSE 通行帯、道路・駐車場、排水施設、共同溝、消防水利施設、場周柵、プラストフェンス、進入灯橋梁) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・動的解析法（線形時刻歴応答解析法）</li> <li>・応答スペクトル法</li> <li>・応答変位法</li> <li>・震度法<sup>※1</sup></li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>&lt;橋梁等・坑土圧構造物&gt;</li> <li>・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）</li> <li>・地震時保有水平耐力法</li> <li>&lt;基礎構造物・地下構造物&gt;</li> <li>・応答変位法</li> <li>・静的2次元FEM解析法</li> <li>・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）</li> </ul> |
| 土構造物<br>(高盛土、調節池（排水施設）<br>・護岸)                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・震度法<sup>※1</sup>（円弧すべり解析）</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ニューマーク法</li> <li>・動的解析法（非線形有効応力地震応答解析法）</li> </ul>   |

※1 地盤が液状化する場合震度法を用いてはならない。

## 第4章 液状化対策

### 4.1 総説

液状化対策として地盤改良を行う場合には、基礎地盤の特性、施設の特性、施工性、経済性等を考慮して、適切な方法を選定するものとする。

- (1) 一般的な液状化対策工法としては表-4.1のようなものがあるが、空港土木施設の液状化対策は、施設を供用しつつ実施しなければならない場合が多く、空港運用に支障が生じない方法を選定する必要がある。なお、液状化対策の具体的な工法を付録-4に示す。

表-4.1 一般的な地盤改良工法

| 工法                    | 原理         | 概要                                   |
|-----------------------|------------|--------------------------------------|
| 密度増大工法                | 密度の増大      | 地盤の密度を増加し、地盤の液状化強度を増大させる             |
| 固結工法                  | 固結         | 地盤改良等により土粒子骨格を安定させることにより、液状化強度を増大させる |
| 置換工法                  | 粒度の改良      | 地盤を液状化しにくい粒度の材料に置き換え、液状化強度を増大させる     |
| 地下水位低下工法              | 飽和度の低下     | 地盤の飽和度を低下させて液状化しない地盤とする              |
| 密度増大工法<br>地下水位低下工法    | 有効応力の増大    | せん断応力の初期有効応力に対する比を低下させる              |
| 間隙水圧消散工法              | 間隙水圧の抑制・消散 | 地震時に発生する過剰間隙水圧を速やかに消散させる             |
| 間隙水圧消散工法<br>せん断変形抑制工法 | 間隙水圧の遮断    | 周辺からの間隙水圧の伝播を遮断する                    |
| 密度増大工法<br>せん断変形抑制工法   | せん断変形の抑制   | 地震動によって生じるせん断変形を小さくする                |

### 4.2 対策範囲

液状化対策範囲は、対象施設の構造形式や地震発生時に求められる性能、基礎地盤の特性、対策工法等を考慮して、適切に設定するものとする。

- (1) 滑走路や誘導路に関しては、地震発生時に機能を確保できるような範囲を対策する必要がある。また、エプロンに関しては、その空港が地震後に求められる機能を確保するために必要な駐機スペースを確保できるような範囲を対策する必要がある。

### 4.3 対策レベル

液状化対策のレベルは、対象施設の構造形式や地震発生時に求められる性能、基礎地盤の特性、対策工法等を考慮して、適切に設定するものとする。



- (1) 液状化対策レベルは、工法によって改良率、改良厚が異なるため、工法に応じた耐震解析手法により、適切に設定する必要がある。なお、液状化対策のレベルについて実物大液状化実験で得られた知見を**付録-5**に示す。

#### 4.4 液状化対策の照査

液状化対策の照査は、対象施設の構造形式、基礎地盤の特性、対策工法、地震規模等を考慮して、適切に実施するものとする。

- (1) 液状化対策の照査は、動的解析法によって行うことができる。このとき、対策後の地盤定数は適切に設定する必要がある、**表-4.2**を参考とすることができる。

**表-4.2 対策後の地盤定数の設定方法例**

| 工法        | 地盤定数の設定方法  |
|-----------|--|
| 密度増大工法    | 対策範囲の密度の上昇に合うように液状化強度を大きく設定する。                             |
| 固結工法      | 対策範囲を固化させるため、非液状化地盤として設定する。また、設計基準強度等を用いて弾性体として設定することもできる。 |
| 置換工法      | 対策範囲について、置換材料の液状化特性を適切に評価して設定する。                           |
| 地下水位低下工法  | 対策範囲の地下水位を低下させ、非液状化地盤として設定する。                              |
| 間隙水圧消散工法  | 対象範囲で過剰間隙水圧の上昇を抑制するよう液状化特性を適切に評価して設定する。                    |
| せん断変形抑制工法 | 対策工の剛性を適切に評価し、弾性体として設定する。                                  |

## 参 考 文 献

- 1) 国土交通省航空局(2019)：陸上空港の施設の設置基準と解説
- 2) 国土交通省航空局(2019)：空港土木施設設計要領（構造設計編）
- 3) （公社）日本港湾協会(2018)：港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 4) （財）沿岸開発技術研究センター(1997)：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）
- 5) （公社）日本道路協会(2017)：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編
- 6) （公社）土木学会(2016)：トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説
- 7) （公社）土木学会(2016)：コンクリート標準示方書 設計編
- 8) （公社）日本道路協会(2012)：道路土工 擁壁工指針
- 9) （公社）日本道路協会(2010)：道路土工 カルバート工指針
- 10) （公社）日本道路協会(1992)：駐車場設計・施工指針 同解説
- 11) （公社）日本下水道協会(2014)：下水道施設の耐震対策指針と解説
- 12) （公社）日本水道協会(2009)：水道施設耐震工法指針・解説
- 13) （公社）日本河川協会(1998)：河川砂防技術基準（案）同解説
- 14) （公社）日本道路協会(1986)：共同溝設計指針
- 15) （公財）鉄道総合技術研究所(2012)：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計
- 16) （公社）日本道路協会(2009)：道路土工 切土工・斜面安定工指針
- 17) 上田茂・稲富隆昌・上部達生・井合進・風間基樹・松永康男・藤本健幸・菊池喜昭・宮井真一郎・関口信一郎・藤本義則(1993)：1993年釧路沖地震港湾施設被害報告，港湾技研資料 No.766
- 18) 稲富隆昌・善功企・外山進一・上部達生・井合進・菅野高弘・寺内潔・横田弘他(1997)：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料 No.857
- 19) 国土交通省航空局(2019)：空港土木施設設計要領（施設設計編）

# 付 録

## 付録-1 地盤の地震応答解析法の種類と概要

耐震設計編 3.6 に示した各空港土木施設の耐震解析手法のうち，地盤の地震応答解析法の種類とその概要について以下に示す。

地盤の地震応答解析プログラムは，数多く提案されているが，現在，設計実務において比較的広く普及しているものは，表-付 1.1 に示すとおりである。

表-付 1.1 代表的な地震応答解析プログラムの特徴

| モデル化・解析法 |           | 解析コード | SHAKE | FLUSH | FLIP |
|----------|-----------|-------|-------|-------|------|
|          |           |       |       |       |      |
| モデルの自由度  | 1次元       |       | ○     | ○     | ○    |
|          | 2/3次元     |       | —     | ○     | ○    |
| 地盤応力     | 全応力       |       | ○     | ○     | ○    |
|          | 有効応力      |       | —     | —     | ○    |
| 地盤の非線形性  | 等価線形      |       | ○     | ○     | —    |
|          | 非線形       |       | —     | —     | ○    |
| 応答解析     | 時刻歴応答解析   |       | —     | —     | ○    |
|          | 振動数領域応答解析 |       | ○     | ○     | —    |

### 1.1 全応力の一次元応答解析（等価線形解析）

この方法は、重複反射理論に基づき、多層地盤を一次元モデルとして解析を行うものである。重複反射理論は、**図-付 1.1**に示すような半無限の多層弾性体の一次元せん断振動を考えるもので、波動方程式は以下ようになる。

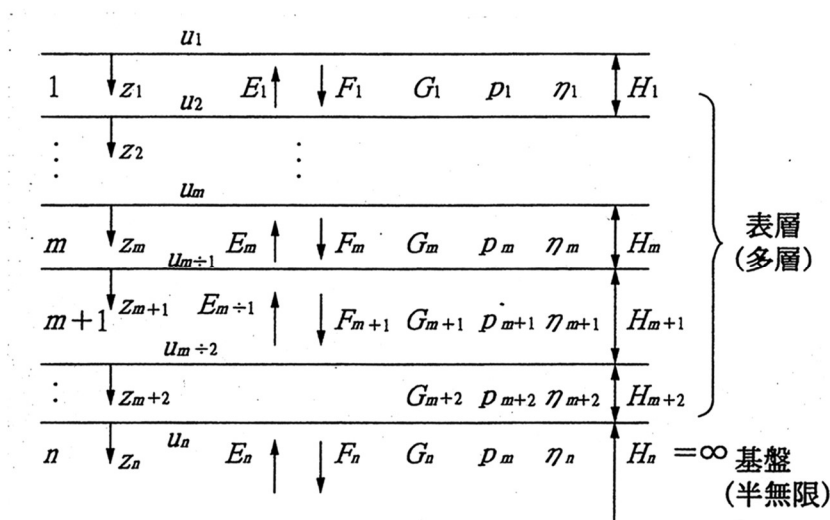
$$\rho_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} = G_m \frac{\partial^2 u_m}{\partial z_m^2} + \eta_m \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 u_m}{\partial z_m^2} \right)$$

ここで、

- $\rho_m$  :  $m$ 層の密度
- $G_m$  : せん断弾性係数
- $\eta_m$  : 粘性係数
- $u_m$  :  $m$ 層水平変位

地盤の非線形性の考慮方法としては、あらかじめ与えるせん断弾性係数 ( $G$ ) 及び減衰定数 ( $h$ ) のせん断ひずみ ( $\gamma$ ) に対する曲線 ( $G/G_0 - \gamma$  曲線,  $h - \gamma$  曲線) より、有効ひずみに対する  $G$  及び  $h$  を収束計算により求める。

この解析法はせん断ひずみが 0.5~1% を越える場合は解析精度に問題がある可能性があることより、レベルII地震動のような大ひずみ領域での解析には適していない場合もある。代表的な解析コードとして SHAKE<sup>1)</sup> がある。



$z$ : 深度,  $E$ : 上昇波,  $F$ : 下降波,  $G$ : せん断弾性係数,  $\rho$ : 密度,  $\eta$ : 粘性係数,  $H$ : 層厚

**図-付 1.1 一次元せん断振動を行う地盤モデル**

## 1.2 全応力の二次元応答解析（等価線形解析）

この方法は、有限要素に分割した地盤モデルの多自由度の運動方程式を、複素応答解析法により振動数領域で応答計算をおこなうものである。多自由度系の運動方程式は次式のように与えられる。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = -\{m\}\ddot{Y}$$

ここで、

- $[M]$  : 質量マトリクス
- $\{\ddot{U}\}$  : 加速度ベクトル
- $\{U\}$  : 変位ベクトル
- $[K]$  : 剛性マトリクス
- $\{m\}$  : 質量ベクトル
- $\ddot{Y}$  : 入力地震動

減衰を複素剛性係数で表し、上式を振動数領域に変換すると次式が得られる。

$$(-\omega_n^2[M] + [K^*])\{u_n\} = -\{m\}\ddot{y}_n$$

ここで、

- $[K^*]$  : 複素剛性マトリクス
- $\{u_n\}$  : 変位ベクトル ( $\omega_n$ に対する複素振幅)
- $\ddot{y}_n$  : 入力地震動 ( $\omega_n$ に対する複素振幅)
- $\omega_n$  : 入力地震動に含まれる振動数成分 ( $n=0, 1, 2, \dots, N/2$ )

複素応答解析を用いて多自由度系の応答解析を行う場合の手順を**図-付 1.2**に示す。地盤の非線形性の考慮方法としては、SHAKEと同様に等価線形化法によるものである。よってSHAKEと同様にせん断ひずみが0.5~1%を越える場合は解析精度に問題がある可能性があることより、レベル2地震動のような大ひずみ領域での解析には適していない場合もある。代表的な解析コードとしてFLUSH<sup>2)</sup>がある。

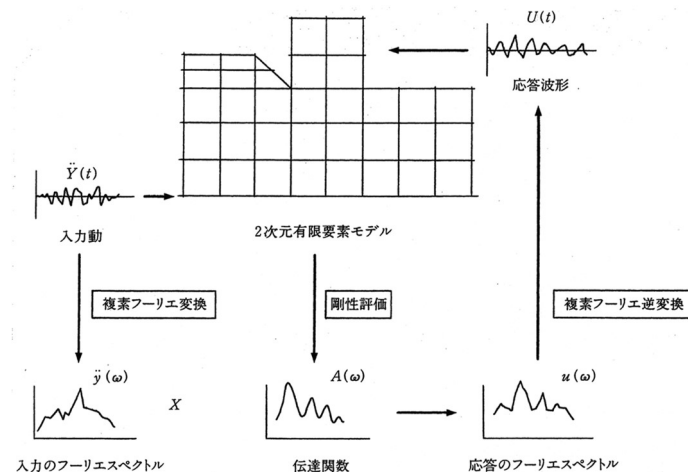


図-付 1.2 複素応答解析法の手順

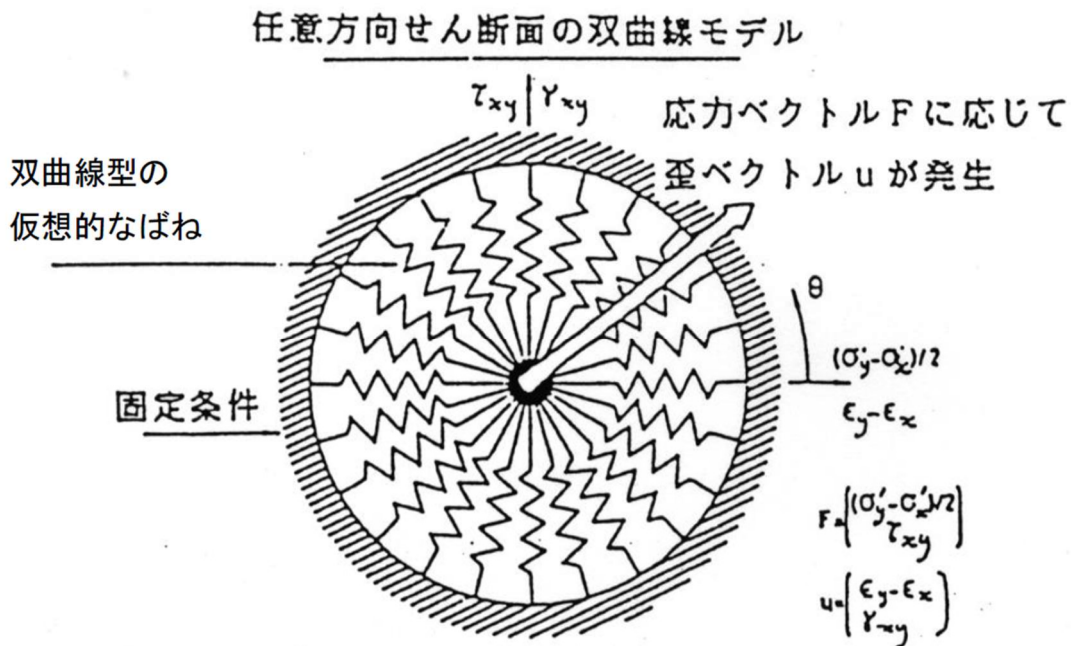
### 1.3 有効応力解析（非線形解析）

この解析手法は、運動方程式の復元力項に非線形モデルを適用し、直接積分法による時刻歴応答解析により非線形解析を行うものである。特徴として、液状化に伴う大ひずみ領域まで追従できる反面、解析パラメータが多く、その設定に高度な技術が要求されることもある。代表的な解析コードとして FLIP<sup>3)~6)</sup> がある。

FLIP は運輸省港湾技術研究所で開発された「液状化による構造物被害予測プログラム」であり、従来の全応力解析では困難であった地盤や構造物の詳細な挙動、特に液状化現象を伴う場合の残留変位、残留応力を精度よく解析することができる。

解析の特徴を以下に示す。

- ① 土のせん断応力-せん断ひずみモデルとして、多数の仮想的な双曲線型ばねで構成されているマルチスプリング・モデルを、履歴減衰の大きさを任意に調節可能なように拡張している。これにより、排水条件におけるせん断応力-せん断ひずみの履歴曲線が既往の室内試験データとよく適合する。また多数のばねで構成されているため、任意の主応力軸に対するせん断面の双曲線型非線形のモデル化が可能となる（**図-付 1.3** 参照）。



**図-付 1.3 マルチスプリング・モデルの概念図**

- ② 過剰間隙水圧発生モデルとして、井合モデルを用いている。このモデルでは非排水条件下における有効応力経路を **図-付 1.4** に示すような液状化フロントを用いて表す。図中の  $S_0$  は液状化の進行の度合いを表すパラメータであり、正規化した塑性せん断仕事の関数である。さらに、液状化の進行に伴ってせん断ひずみのスケールを拡大することにより、数%程度以上のひずみを数値解析上安定的に求めることが可能である。

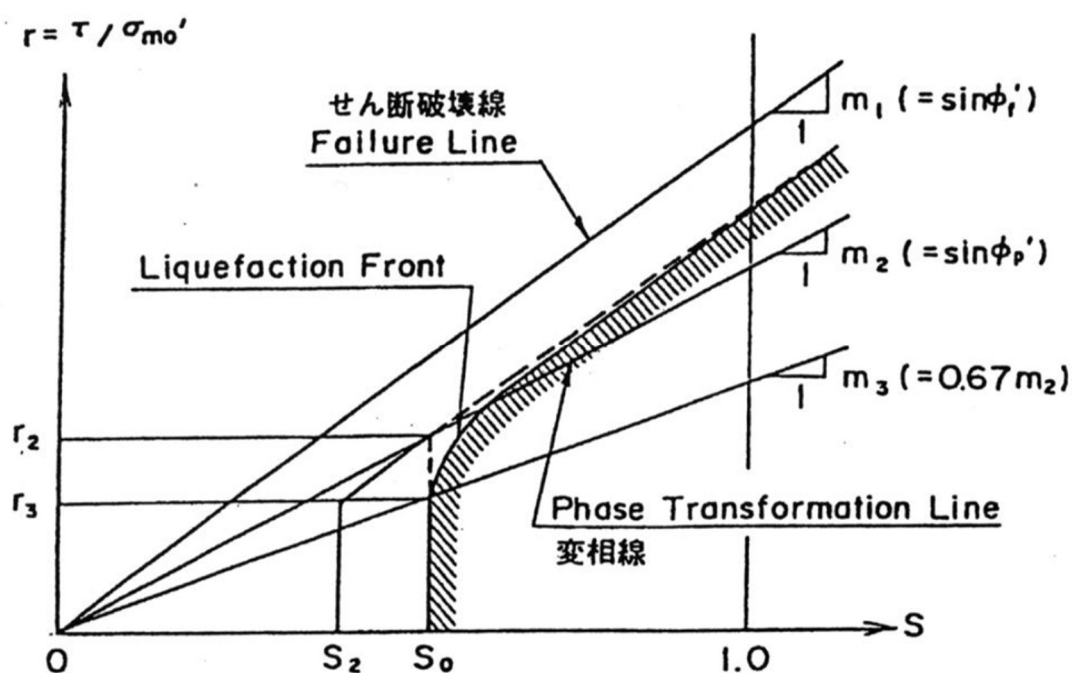


図-付 1.4 液状化フロント，状態変数  $S$  及びせん断応力比の概念

#### 参考文献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer J. and Seed H. B.: SHAKE-A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 2) Lysmer J., Udaka T., Tsai C. F. and Seed H. B.: FLUSH-A Computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problem, Report No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, 1975.
- 3) 井合進・松永康男・亀岡知弘：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル，港湾技術研究所報告，第29巻，第4号，pp.27-56，1990.
- 4) 井合進・松永康男・亀岡知弘：サイクリックモビリティのモデルのパラメータの同定，港湾技術研究所報告，第29巻，第4号，pp.57-83，1990.
- 5) Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEDA: Strain space plasticity model for cyclic mobility, SOIL AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.1-15, 1992.
- 6) Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEDA: Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, SOIL AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.16-20, 1992.



## 付録-2 構造物の耐震解析の種類と概要

耐震設計編 3.6 に示した各空港土木施設の耐震解析手法のうち、一般構造物と土構造物の地震応答解析法の種類とその概要について以下に示す。

表-付 2.1 構造物の地震応答解析法

| 対象施設                             |   | 解析法                |
|----------------------------------|---|--------------------|
| 一般構造物                            | 地上<br>(GSE 通行帯, 道路・駐車場, 場周柵, プラストフェンス, 進入灯橋梁) | 震度法                |
|                                  |   | 応答スペクトル法           |
|                                  |   | 地震時保有水平耐力法         |
|                                  |   | 動的解析法 (線形時刻歴応答解析法) |
|                                  | 動的解析法 (非線形時刻歴応答解析法)                           |                    |
|                                  | 地下<br>(GSE 通行帯, 道路・駐車場, 排水施設, 共同溝, 消防水利施設)    | 応答変位法              |
| 擬似静的 2 次元 FEM 解析法                |   |                    |
| 動的解析法 (非線形時刻歴応答解析法)              |   |                    |
| 土構造物<br>(高盛土, 調節池 (排水施設))<br>・護岸 | 震度法 (円弧すべり解析)                                 |                    |
|                                  | ニューマーク法                                       |                    |
|                                  | 動的解析法 (非線形時刻歴応答解析法)                           |                    |

### 2.1 一般構造物 (地上) の地震応答解析法

#### 2.1.1 震度法

震度法は、地震力を静的な荷重 (慣性力) として構造物に作用させる静的な耐震計算法である。慣性力を作用させて構造物の応答値を算定し、構造物の耐震性を照査する。

#### 2.1.2 応答スペクトル法

応答スペクトル法は、ある地震動に対する一自由度系の最大応答を固有周期、減衰係数をパラメータとして示したものであり、加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルとして表される。応答スペクトルの適用においてはモード解析により各次振動に分解する必要がある。各次振動モードに対する応答を応答スペクトルから求めると、振動系の最大応答を合成できる。ただし、この応答値は直接地震応答解析に比べて大きな値を与える。このため各次モード応答の二乗和平均応答を求める方法等により応答の精度を増やすような合成手法が試みられている。

### 2.1.3 地震時保有水平耐力法<sup>1)</sup>

道路橋示方書に示される地震時保有水平耐力法は、エネルギー一定則を基本とした設計法である。エネルギー一定則の概念を再記すると**図-付 2.1**のようになる。弾性体とした場合の最大応答は線形応答スペクトルより求められ $k_{hc}W$ となる。構造物の降伏荷重を $P_y$ とすると、応答塑性率及び耐震性評価は下式で表される。

$$\begin{cases} \mu_r = (k_{hc}/k_{hy})^2 + 1 \\ \mu_r < \mu_a \end{cases}$$

道路橋示方書では等価水平震度 $k_{he}$ を導入し、下式で判定しているが、上式によるものと等価である。ここで、等価水平震度 $k_{he}$ は、許容塑性率が $\mu_a$ の橋脚に作用する震度ではないことに注意する必要がある。

$$\begin{cases} k_{he} = k_{hc}/\sqrt{2\mu_a - 1} \\ P_a > k_{he}W \end{cases}$$

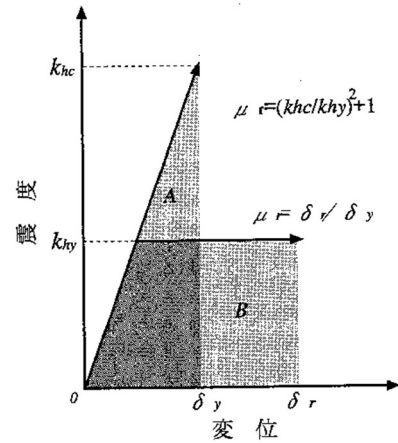


図-付 2.1 エネルギー一定則

構造物の許容じん性率は、橋脚断面の諸元をもとにコンクリート圧壊時（RC 橋脚の場合）の終局じん性率を計算し、それに安全率を考慮して設定する。

### 2.1.4 動的解析法（線形時刻歴応答解析法）

線形時刻歴応答解析法は、弾性域における構造物の動的特性を表現する場合に用いる解析手法である。耐震性能の照査は、動的解析の結果得られた各構造部材に生じる断面力、変位等の最大応答値が、それぞれの許容値以下となるように行う。

### 2.1.5 動的解析法（非線形時刻歴応答解析法）

非線形時刻歴応答解析法は、構造物の非線形性を直接非線形履歴モデルに取り込んで解析する手法である。構造物の非線形履歴モデルには各種のモデルが提案されているので、構造特性や解析目的に応じて適切な非線形履歴モデルを用いることが望ましい。耐震性能の照査は、動的解析の結果得られた各構造部材に生じる断面力、変位等の最大応答値が、それぞれの許容値以下となるように行う。

## 2.2 一般構造物（地下）の地震応答解析法

### 2.2.1 横断方向の解析法

#### (1) 応答変位法（横断方向）

応答変位法は、地震時の地盤変位、周面せん断力等を地中施設横断面に入力して、断面の耐震性を擬似静的解析するものである。応答変位法は、元来は地中線状構造物の縦断方向の耐震解析法として用いられていたが、近年では、地中施設の横断方向の解析にも適用されるようになってきた。地震時の地盤変位は、1次元の地盤地震応答解析又は設計速度応答スペクトルに基づいて算定し、地盤ばねを介して地中施設横断面に入力する。本解析法は、地中施設の地震応答解析法の中で最も簡易な方法であり、各種耐震設計指針類等にも採用されつつあるが、地盤ばねの設定には高度の工学的判断が要求されることから十分な検討を行う必要がある。

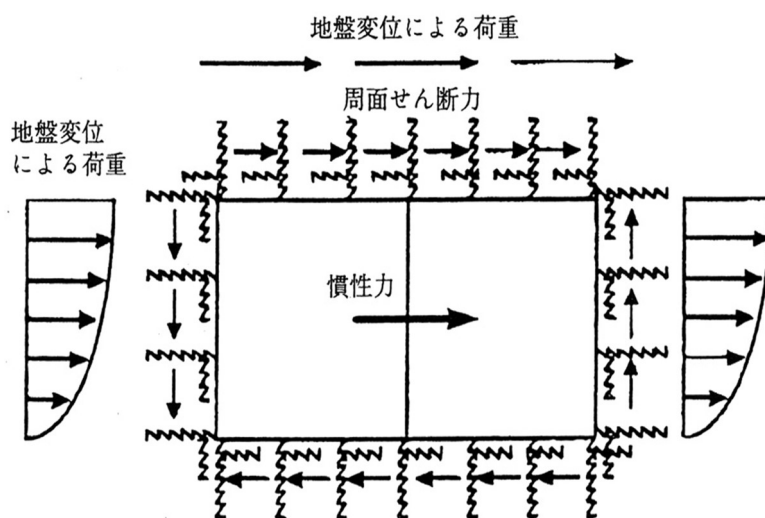


図-付 2.2 解析モデル概念図

#### (2) 擬似静的2次元FEM解析法

擬似静的2次元FEM解析は、地震時の地盤変位が地中施設横断面に最も厳しい条件となる時の地盤状態が再現されるような等価な地震荷重を、地盤を含む2次元FEM解析対象領域の全域に入力して、地中施設横断面の耐震性を擬似静的解析するものである。等価な地震荷重の算定は、1次元の地盤地震応答解析に基づき、通常、地中施設横断面の上端・下端深さに位置する地盤の相対変位が最大となる瞬間の地盤内加速度分布や地盤内変位分布などに基づき算定する。その算定の考え方によって、「応答震度法<sup>2)</sup>」、「地盤応答法<sup>3)</sup>」、「FEM応答変位法<sup>4)</sup>」などの呼称がある。本解析法は、次項に述べる動的解析よりは簡易な方法であるが、応答変位法における地盤ばねの設定に関する高度の工学的判断を解析的に解消できる点で、近年では、各種地中施設の横断方向解析に用いられることが多くなっている。

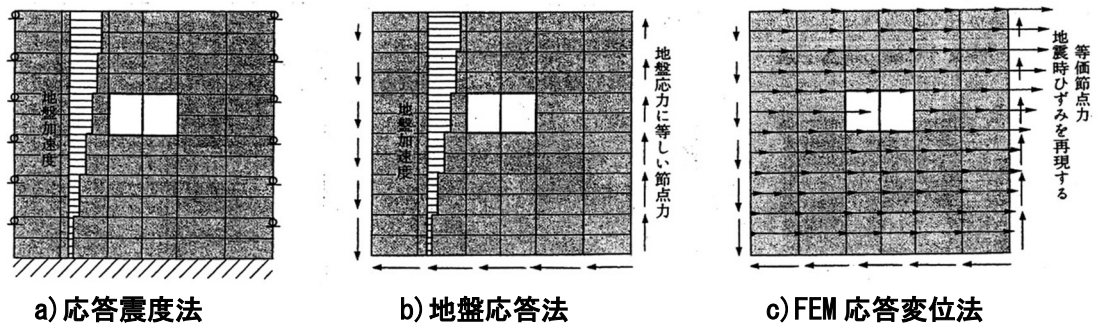


図-付 2.3 擬次静的 2次元 FEM 解析モデル概念図

### (3) 動的 2次元 FEM 解析法

動的 2次元 FEM 解析法は、地中施設及び周辺地盤を一体として動力学モデルに基づいて解析するもので、地中施設の地震時挙動を最も忠実に再現しようとする方法である。応答変位法、擬似静的 2次元 FEM 解析法に比べ、解析結果の精度化が期待できる反面、地盤や地中施設の解析モデルやパラメータなどに解析結果が影響されるようになるため、高度な技術が要求される。地盤のひずみレベルが小さく（1%程度以下）、かつ、地中施設が弾性的な挙動を示すことが要求されている場合には、線形解析（等価線形解析を含む）により、比較的簡易な動的解析法（例えば FLUSH）の適用が可能である。しかし、これ以外の場合には、地盤及び構造物の解析モデルとして非線形モデル（例えば FLIP）を用いる必要があり、解析時間、技術上の難易度が增大することも多い。本解析法は、応答変位法、擬似静的 2次元 FEM 解析法によって決定された耐震設計断面の最終的な照査などに用いられることが多くなっている。

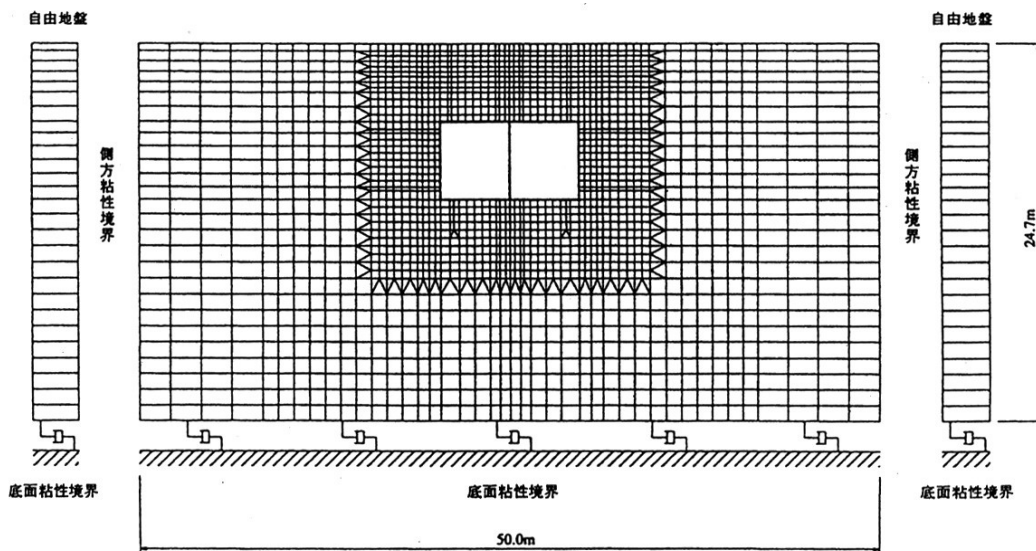


図-付 2.4 動的 2次元 FEM 解析モデル概念図

## 2.2.2 縦断方向の解析法

### (1) 応答変位法（縦断方向）

縦断方向の解析法としての応答変位法は、線状地中施設の軸線に沿った地盤の地震時変位が正弦波状の分布をするものと考え、これを地盤ばねを介して地中施設に入力する。応答変位法は、縦断方向地中施設の地震応答解析法の中で最も簡易な方法であり、各種耐震設計指針類等にも採用されているが、設計で考慮する地盤変位を規定する種々の係数は未だ確立されておらず、各指針類によって相違がある点に注意する必要がある。なお、地盤変位を算定する際に、各種指針類によらず、地盤の地震応答解析によって地盤変位を算出する方法もある。

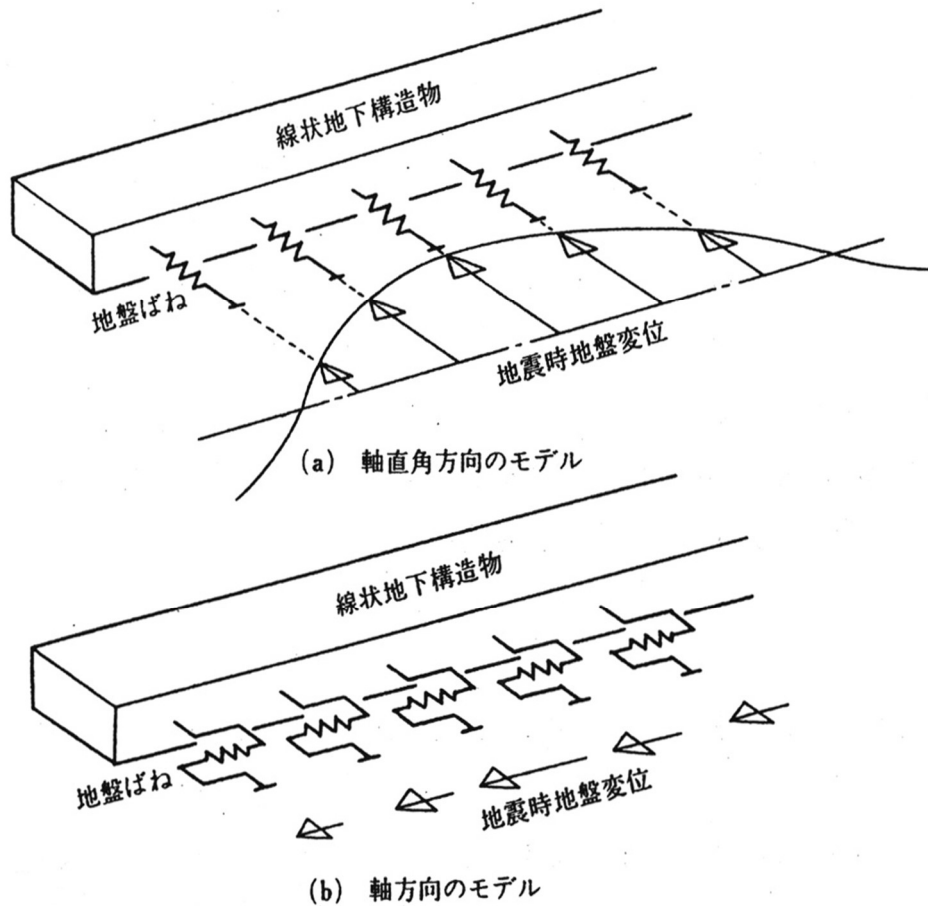


図-付 2.5 応答変位法（縦断方向）解析モデル概念図

### (2) 動的解析法（縦断方向）<sup>5)</sup>

縦断方向の解析法としての動的解析法は、線状地中施設の軸方向の地盤条件の変化を解析に反映して地震時変位分布を算定しようとするものである。地中施設の周辺地盤を2次元又は3次元的にモデル化し、FEM又は質点・ばね系として解析する方法が一般的であり、従来から沈埋トンネルの耐震設計などに用いられている。

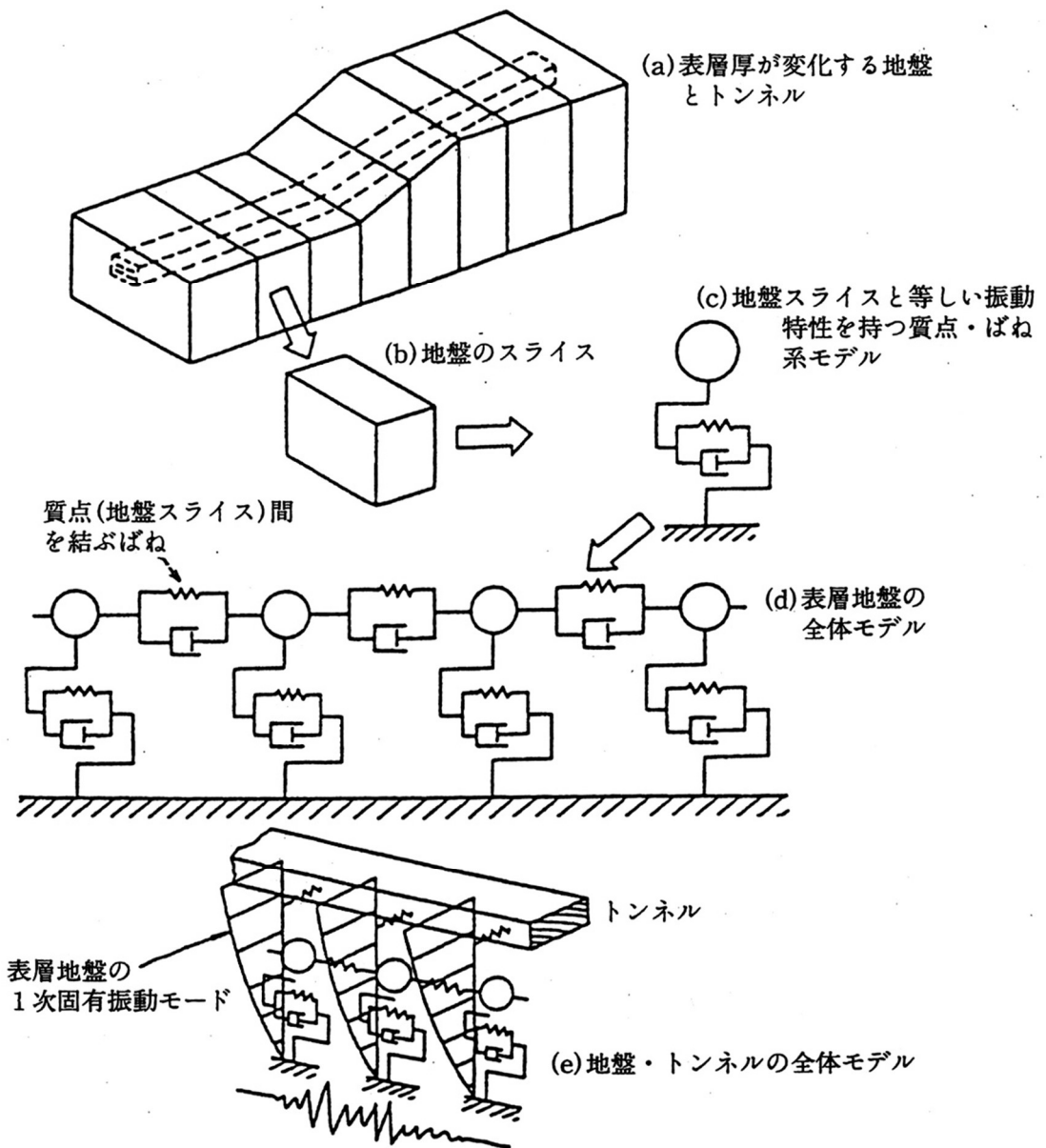


図-付 2.6 動的解析法（縦断方向）解析モデル概念図



### 2.3.3 動的解析法（非線形時刻歴応答解析）

地震後の残留変形量を算定する方法として、非線形性を考慮した地盤モデルに地震動を逐次入射して地盤の応答を求める動的解析法（非線形時刻歴解析）がある。この解析手法については、**付録-1**を参照することができる。

動的解析法（非線形時刻歴解析）は、残留変形量を照査する場合に有効な解析手法である。

#### 参考文献

- 1) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2017.
- 2) 片山幾夫・足立正信・嶋田穰・都築富雄・瀬下雄一：地下埋設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法の提案」，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，pp.737-738，1985.
- 3) 立石章：静的 FEM を用いた地中構造物横断方向の耐震設計法における地震荷重の作用方法の研究，土木学会論文集，No.529，pp.139-148，1995.
- 4) 太田擴・西田允俊・北嶋武彦・佐藤忠信：応答変位法を用いた地下構造物の耐震設計について，第2回阪神・淡路大震災に関する学術論文集，pp.437-444，1997.
- 5) Earthquake Engineering Committee, Japan Society of Civil Engineers: Earthquake resistant Design for Civil Engineering structure in Japan, Japan Society of Civil Engineers, pp.195-259, 1992.
- 6) （公社）日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針，2009.



### 付録-3 二次元地盤の等価線形解析と舗装構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法

液状化が発生しない場合の舗装構造のひび割れ発生状況について、二次元地盤の等価線形解析と舗装構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法<sup>1)</sup>が提案されている。この解析法の概要を以下に示す。

#### 3.1 滑走路の構造

図-付 3.1 の左図に示すように、滑走路の構造は表層地盤上に路床と路盤を施工し、その上に舗装版を設置する構造となる。舗装版は、コンクリート、アスファルト混合物もしくはプレストレストコンクリートで製作される。舗装版の厚さは通常 20~50cm であり、鉄筋コンクリート舗装版では 0.65% の鋼材が舗装版表面より 1/3 の箇所に配置される。舗装版には、5~15m 間隔に施工目地が設置され、100~200m 間隔に膨張目地が設置されている。施工目地は、ダウエルバーにより伸縮が自由となっている。一方、アスファルト舗装は連続して施工され施工目地は設置されていない。

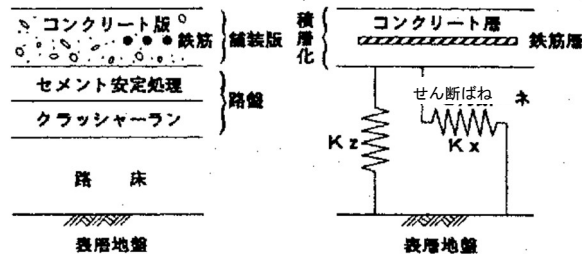


図-付 3.1 滑走路の構造とモデル化

#### 3.2 計算モデル

計算モデルは、舗装版が表層地盤の水平せん断振動によりどの程度の断面力と変形が計算されるか調べるために作成する。液状化と上下動による影響は考慮していない。舗装版は表層地盤全体から比較すると薄い膜状であり表層地盤の振動性状にはほとんど影響を与えないと考え、計算モデルとして表層地盤と舗装版とを別々に作成する。

##### (1) 表層地盤

図-付 3.2 に示すように、人工島の表層地盤全体を固体要素に置換する。そして、基盤面より加速度入力を行い時刻歴の表層地盤表面の応答変位を算出する。この際、表層地盤の非線形性は地盤応答計算プログラム SHAKE により、表層地盤のせん断剛性の低下と減衰率を求め等価線形として評価する。

##### (2) 舗装版

鉄筋コンクリート舗装版は積層化した平面要素を用いる。図-付 3.1 の右図に積層化した平面要素の断面を示す。表層地盤のせん断振動により、主に内面力が舗装版に生じる。舗装版を形成するコンクリート、鉄筋、アスファルトは図-付 3.3 に示す材料非線形性を考慮する。

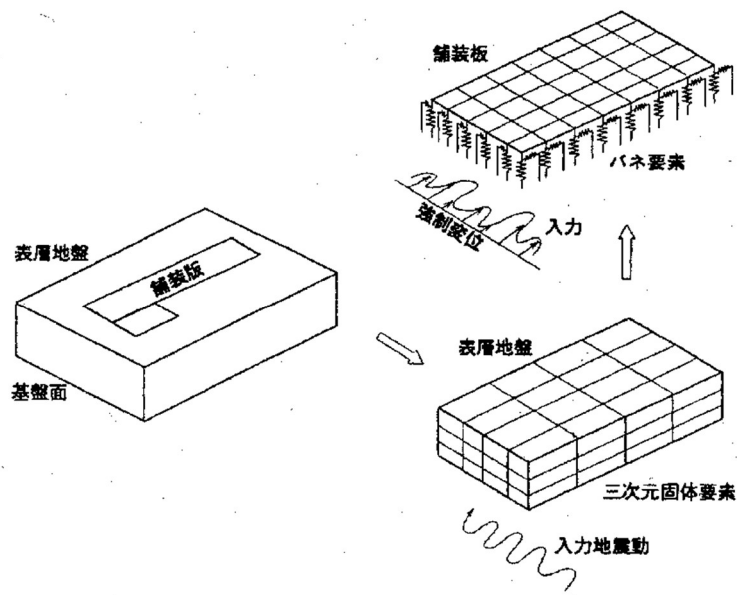


図-付 3.2 計算モデルの概要

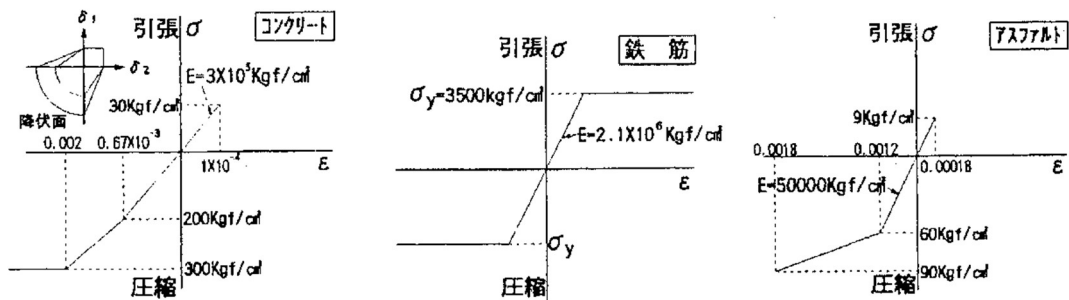


図-付 3.3 舗装材料の非線形特性

(3) 表層地盤と舗装版との連結

舗装版と表層地盤とはばねで連結されていると仮定するが、このばねは路床と地盤との剛性から求めることができる。また、このばねのせん断力が最大摩擦力以上となったら降伏すると仮定する。表層地盤と舗装版のばねのモデルを図-付 3.4 に示す。

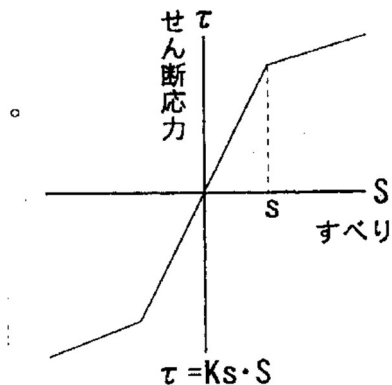


図-付 3.4 表層地盤と舗装版とのばね

#### (4) 施工目地

施工目地は図-付 3.5 に示すようにばねとしてモデル化する。このばねは、施工目地の軸方向とせん断方向とをモデル化する。

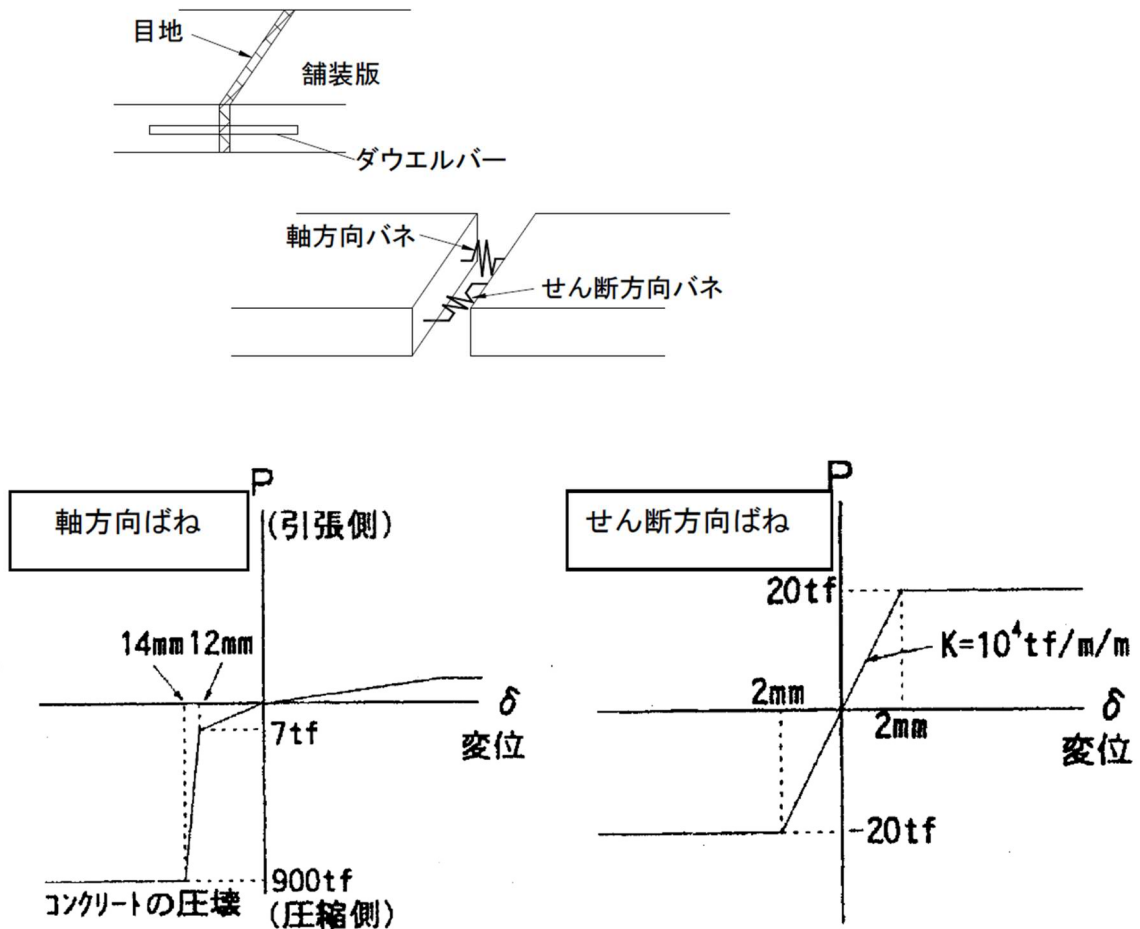


図-付 3.5 目地構造と非線形特性

#### (5) 舗装版の応答値

舗装版下部のばねの端部から、表層地盤のみの3次元モデルで求めた地表面の強制変位を入力して舗装版に生じる断面力と目地の開きなどを計算する。

#### 参考文献

- 1) 清宮理・藤澤孝夫: 空港内滑走路の耐震性評価手法の開発, 第23回地震工学研究会発表会, 土木学会耐震工学委員会, pp.545-548, 1995.

#### 付録-4 空港で利用される可能性の高い液状化対策工法の概要

一般的な液状化対策工法<sup>1)</sup>，原理をまとめて表-付 4.1 に示す。

空港土木施設の液状化対策は，施設を供用しつつ，実施しなければならない場合が多く，空港運用に支障が生じない方法を選定する必要がある。対策工法の概要<sup>1)</sup>及び空港土木施設での適用性について表-付 4.2 に示す。

表-付 4.1 液状化対策工法の一覧

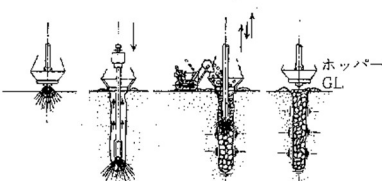
| 具体的工法          | 工法        | 対策の原理                 |
|----------------|-----------|-----------------------|
| サンドコンパクション工法   | 密度増大工法    | 密度の増大<br>有効応力の増大      |
| 振動棒工法          |           |                       |
| バイブロフローテーション工法 |           |                       |
| 重鎮落下締固め工法      |           |                       |
| 静的圧入締固め工法      |           |                       |
| 深層混合処理工法       | 固結工法      | 固結<br>せん断変形の抑制        |
| 注入固化工法         |           |                       |
| 生石灰パイル工法       |           |                       |
| 事前混合処理工法       |           |                       |
| 置換工法           | 置換工法      | 粒度の改良                 |
| ディープウェル工法      | 地下水位低下工法  | 飽和度の低下<br>有効応力の増大     |
| 柱状ドレーン工法       | 間隙水圧消散工法  | 間隙水圧の抑制・消散<br>間隙水圧の遮断 |
| 周辺巻き立てドレーン工法   |           |                       |
| 連続地中壁による工法     | せん断変形抑制工法 | 間隙水圧の遮断<br>せん断変形の抑制   |
| 格子状地盤改良工法      |           |                       |

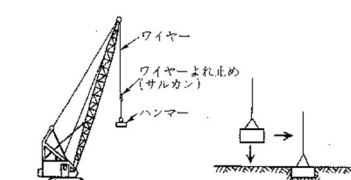
表-付 4.2(1) 液状化対策工法の概要

|         |  |  |
|---------|--|--|
| 工法名     | <b>サンドコンパクションパイル工法</b>   |  |
| 工法の概要   | <p>鋼管ケーシングを先端閉塞の状態では地に貫入させる。所定の深さに達したところでケーシング内に砂を入れ、砂を地中に圧入しながらケーシングを引き抜く。締固められた砂杭を形成する。このとき、周辺地盤を側方に圧縮するとともに、振動締固めを行う。(補給材: 砂, 碎石)</p>                   |  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・大深度・高密度化が可能</li> <li>・対象地盤に細粒分が多いと改良後の N 値が上昇しにくい。</li> <li>・粘性土地盤にも適用可能。</li> </ul>                               |  |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・振動により締固めるため、既設構造物との間には一定の距離が必要。</li> </ul>   |  |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。</li> <li>・一般的に大型の施工機械を用いるため滑走路を供用しながらの施工は困難であるが、小型の施工機械を用いることで滑走路を供用しながら施工できる工法もある。</li> </ul> |  |

|         |   |  |
|---------|---|--|
| 工法名     | <b>振動棒工法</b>  |  |
| 工法の概要   | <p>各種の特殊圧入ロッドを振動圧入することにより、緩い砂地盤を締固める工法で、その先端及び側面の突起には各種のものがある。ケーシングには鋼管あるいは H 鋼を使用する。(補給材: 砂, 砂利, 碎石)</p>   |  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・振動締固め効果を大きくするためロッドに特殊加工が施してある。</li> <li>・対象地盤に細粒分が多いと改良後の N 値が上昇しにくい。</li> <li>・施工機械が機動性に富み、施工能率がよい。</li> <li>・補給材として現地土砂の使用も可能。</li> </ul> |  |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・振動・騒音は、サンドコンパクションパイルよりやや少ない。</li> </ul>   |  |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。</li> </ul>   |  |

表-付 4.2(2) 液状化対策工法の概要

|         |  |
|---------|--|
| 工法名     | パイプロフローテーション工法   |
| 工法の概要   | <p>パイプロフロッツと呼ばれるパイプブレータを内蔵した鋼管を先端ノズルから水を噴出させながら地中に鉛直に貫入させる。所定の深さに達したらパイプブレータにより、管を振動させながら徐々に引き上げる。振動によって地盤が締め固められた結果、パイプロフロッツの周囲にできた間隙に砂利、鉦さい、砂などの粗流材を流し込む。(補給材：砂利、鉦さい、砂)</p>  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水締め効果も期待できる。</li> <li>・対象地盤に細粒分が多いと改良後のN値が上昇しにくい。</li> </ul>   |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平振動が主体。</li> <li>・振動・騒音は比較的少ない。</li> </ul>  |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。</li> </ul>  |

|         |  |
|---------|--|
| 工法名     | 重鎮落下締め工法   |
| 工法の概要   | <p>10～30tfのおもり（ハンマー）を自由落下させることにより発生する衝撃力で地盤を締め固める工法。</p>    |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・細粒分が多いと改良効果が低下する。</li> <li>・振動・衝撃が大きいので、影響を受ける構造物が周辺にない場合に使用される。</li> <li>・通常は、10m以浅の改良に用いられることが多い。</li> <li>・10m以上の改良には、大重量（25tf以上）のハンマーによるタンピングが必要。</li> </ul> |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・周辺構造物との間には、かなりの距離が必要。</li> </ul>   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設構造物近傍や舗装下では適用できない。</li> </ul>  |

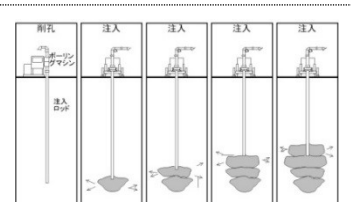
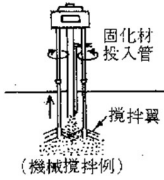
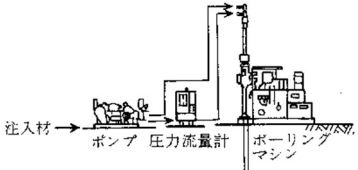
|         |   |
|---------|---|
| 工法名     | 静的圧入締め工法  |
| 工法の概要   | <p>極めて流動性の低いモルタルなどを地盤に注入し固結体を造成し地盤を押し広げることにより締め固め密度を増大させる。</p>  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・設備が小規模で狭い空間でも施工可能。</li> <li>・土層に応じた改良率の設定が可能で、中間に改良を必要としない層(粘土層等)がある場合にも対応可能。</li> </ul>                    |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・振動・騒音は少ない。</li> <li>・既設構造物との間には一定の距離が必要。</li> </ul>   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・滑走路等の舗装の下の改良が可能。</li> <li>・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。</li> </ul>   |

表-付 4.2(3) 液状化対策工法の概要

|         |  |   |
|---------|--|---|
| 工法名     | <b>深層混合処理工法</b>  |   |
| 工法の概要   | 固化材と原地盤を攪拌混合し、地盤を固化させる。<br>深層混合 <ul style="list-style-type: none"> <li>機械攪拌                         <ul style="list-style-type: none"> <li>スラリー系</li> <li>粉体系</li> </ul> </li> <li>高压噴射 (流体切削)                         <ul style="list-style-type: none"> <li>グラウト系</li> <li>エア-グラウト系</li> <li>水・エア-グラウト系</li> </ul> </li> </ul> |  <p>固化材投入管<br/>攪拌翼<br/>(機械攪拌例)</p> |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>土粒子の骨格が結合するため改良部分は液状化しない。</li> </ul>  |   |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>騒音・振動は少ない。</li> <li>施工時に周辺地盤に変位が生じる場合がある。</li> </ul>  |   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>既設構造物に影響がない範囲で適用可能。</li> <li>一般的に鉛直方向に施工するため滑走路等の舗装下の改良はできないが、水平方向・斜め方向へ施工可能な工法もあるため滑走路下への適用も可能。</li> </ul>   |   |

|         |   |   |
|---------|---|---|
| 工法名     | <b>注入固化工法</b>   |   |
| 工法の概要   | ボーリング孔を利用し、セメントグラウトなどを注入し、地盤を固化する。  |  <p>注入材 → ポンプ 圧力流量計 ボーリングマシン</p> |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>設備が小規模で狭い空間でも施工可能で騒音・振動に対する問題が少ない。</li> </ul>                        |   |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>隣接構造物への注入圧の影響と流出。</li> </ul>   |   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>既設構造物に影響がない範囲で適用可能。</li> <li>ボーリング孔を任意の角度に取れ、滑走路下への適用も可能。</li> </ul> |   |

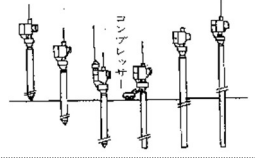
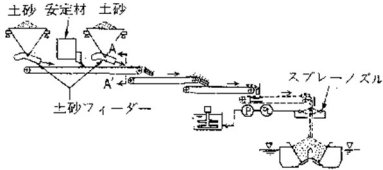
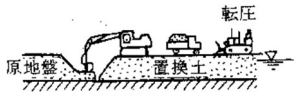
|         |  |   |
|---------|--|---|
| 工法名     | <b>生石灰パイル工法</b>  |   |
| 工法の概要   | 生石灰による吸水脱水硬化反応により固化する。吸水膨張時の周辺土の締固め効果も期待できる。   |  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>生石灰による吸水膨張による周辺地盤の締固め、側圧増大効果が期待できる。</li> </ul>  |   |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>騒音・振動は少ない。</li> <li>粉塵が生じる。</li> </ul>          |   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。</li> </ul> |   |

表-付 4.2(4) 液状化対策工法の概要

|         |   |
|---------|---|
| 工法名     | <b>事前混合処理工法</b>   |
| 工法の概要   | 埋立て土にセメントなどの改良材をあらかじめ混合した改良土をそのまま運搬し搬入する。<br> |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>埋立造成後の地盤改良が不要。</li> </ul>  |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>騒音・振動は少ない。</li> <li>水質汚濁に注意する必要がある。</li> <li>施工時に水質防止処置を施せば影響は低減される。</li> </ul>          |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>供用中の空港では適用できない。</li> <li>空港の造成に埋立土を用いる場合に適用できる。</li> </ul>                               |

|         |  |
|---------|--|
| 工法名     | <b>置換工法</b>  |
| 工法の概要   | 液状化の発生しにくい材料(例えば砕石)で置換する。<br> |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>良質材で置換。</li> <li>改良すべき地層が地表近くにあり広さも限られている場合に用いる。</li> </ul>               |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>少ない。</li> </ul>   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>広範囲を改良する場合や深層まで改良する場合には適さない。</li> </ul>                                   |

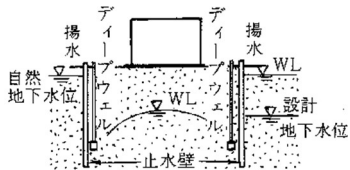
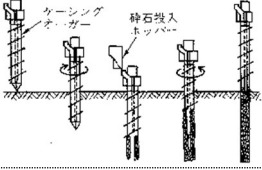
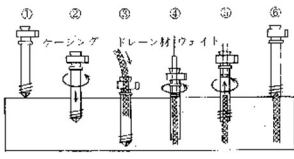
|         |   |
|---------|---|
| 工法名     | <b>ディープウェル工法</b>  |
| 工法の概要   | 構造物の周囲を止水壁で囲いその内部の地下水位をディープウェルなどにより低下させる。<br> |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>構造物直下に対策工が不可能な場合に適用。</li> </ul>  |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位低下により地盤沈下が生じる。</li> </ul>  |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>空港施設での適用も可能であるが、地盤沈下を適切に評価する必要がある。</li> </ul>  |



表-付 4.2(5) 液状化対策工法の概要

|         |  |   |
|---------|--|---|
| 工法名     | 柱状ドレーン工法（グラベルドレーン）   |   |
| 工法の概要   | ケーシングオーガーを所定の位置に回転貫入させた後砕石を地中に排出させながらケーシングを引き上げ地中に砕石パイルを造成する。地震時に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制する。                             |  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・低振動・低騒音の施工可能</li> <li>・周辺地盤の地盤変状を発生させることがないので、既設構造物近傍での施工が可能。</li> </ul> |   |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・少ない</li> </ul>   |   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。滑走路等の舗装下の改良はできない。</li> </ul>                          |   |

|         |  |  |
|---------|--|--|
| 工法名     | 柱状ドレーン工法（人工材料）   |  |
| 工法の概要   | ケーシングを圧入あるいは回転貫入させ人工材料のドレーン材を地中に設置する。ドレーン材の周辺はフィルター材で覆い目詰まりなどを防止する。過剰間隙水圧の上昇を抑制する。   |  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・人工材料を使用するため品質が一定している。</li> <li>・低振動・低騒音の施工可能。</li> <li>・近接施工に適する。 ・施工機械が小型。</li> </ul> |  |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・少ない。</li> </ul>  |  |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・滑走路等の舗装下の改良はできない。</li> </ul>   |  |

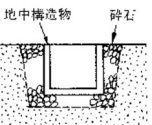
|         |   |   |
|---------|---|---|
| 工法名     | 周辺巻き立てドレーン工法  |   |
| 工法の概要   | 地中構造物の周辺埋戻しに礫・砕石材料を用いて構造物直下の地震時の過剰間隙水圧の上昇を抑制し、浮上りを防止する。   |  |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・比較的容易に施工可能。</li> <li>・液状化時に浮上る可能性のある軽量地下構造物に適用される。</li> </ul> |   |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・少ない。</li> </ul>   |   |
| 空港での適用性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・地下構造物の建設時に施される工法であるため、既設構造物に対しては適用できない。</li> </ul>            |   |

表-付 4.2(6) 液状化対策工法の概要

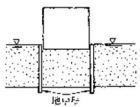
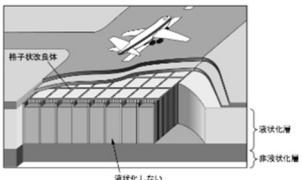
|         |   |
|---------|---|
| 工法名     | 連続地中壁   |
| 工法の概要   | 建物の外周に剛性の大きい連続地中壁を設置し、せん断変形を抑制する。杭と併用して地震時の変形を抑える。<br> |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・周辺からの間隙水圧の伝播を遮断することが可能。</li> <li>・地震時の変形を抑えることが可能。</li> <li>・地下水位低下工との併用も考えられる。</li> </ul>        |
| 周辺への影響  | ・少ない。   |
| 空港での適用性 | ・既設構造物に影響がない範囲で適用可能。  |

表-付 4.2(7) 液状化対策工法の概要

|         |  |
|---------|--|
| 工法名     | 格子状地盤改良工法  |
| 工法の概要   | 固化材と原地盤を攪拌混合し、格子状に安定処理土の壁を作る。内部の原地盤の地震時せん断変形を抑止することによって間隙水圧の上昇を抑制し、液状化を防止する。<br> |
| 工法の特徴   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・施工深度として 20m 程度まで対応可能である。</li> <li>・細粒分の多い土質に対しても適用が可能である。</li> <li>・格子状の改良形態であるため、液状化地盤全体を固化改良する場合と比較し経済的である。</li> </ul>     |
| 周辺への影響  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・騒音・振動は少ない。</li> <li>・基礎杭や周辺構造物に対し、変位などの影響を与えにくい。</li> </ul>  |
| 空港での適用性 | ・既設構造物への影響等の施工状況に応じて、施工方法として機械式攪拌工法（新設対応）及び高圧噴射式攪拌工法（既設対応）を使い分けることで適用可能である。  |

参考文献

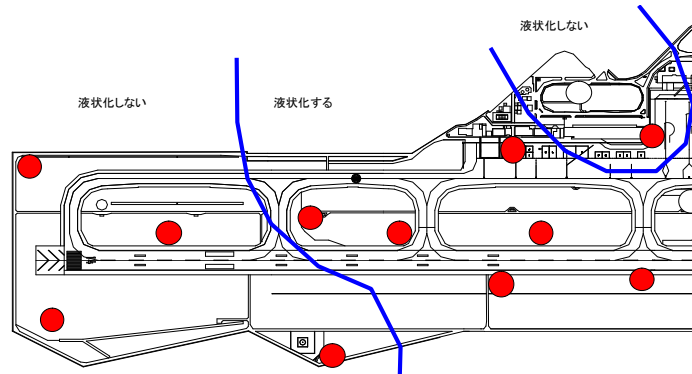
- 1) (社)地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，pp.138-152，1993。

## 付録-5 液状化対策工法の選定・照査

本付録は、既往の調査・実験・解析結果を基に、既に実績のある既存空港施設を対象とした密度増大工法<sup>1)</sup>及び薬液注入工法<sup>2)</sup>を対象とした液状化対策工法の改良範囲、改良率を縮減するための方法を説明するものである。地盤調査から液状化対策工法の選定・照査のフロー及び留意点を以下に示す。なお、液状化対策工法の選定・照査に先立ち、検討対象地点におけるレベル、レベル地震動の作成及び地震時、地震後に求められる当該空港の耐震性能の設定が必要である。

### 地形・地質的要因の把握

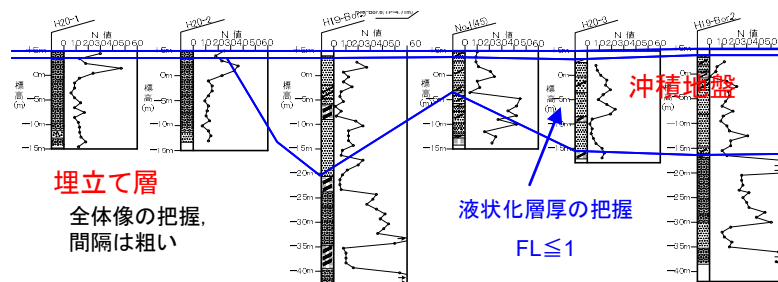
- ① 地形図上では判別し難い微細な起伏を表した微地形図及び既往ボーリング調査の結果を基に、液状化対策が必要なエリアの絞り込み及び施工上問題となるような既存構造物を把握する（**図-付5.1**）。



**図-付5.1 液状化・非液状化領域のゾーニング**

### 地盤調査（基本条件の整理）

- ② ボーリング調査により液状化層厚及び工学的基盤までの地層構成の把握を行う（**図-付5.2**）。この際、液状化予測・判定のため、 $N$ 値、粒度、弾性波速度の調査及び液状化試験等を実施する<sup>3)</sup>。特に、ボーリング調査は、GL-20.0mの深さで打ち止めることが一般的ではあるが、液状化に関する検討深度については、検討対象施設への影響を考慮して決定するものとする。



**図-付5.2 液状化判定、液状化層の概略把握**

- ③ 上記に加え、表面波探査、小規模アレイ等の物理探査手法を用い<sup>4)</sup>、ボーリング調査地点間の空間補間を実施し、液状化層の連続性・分布範囲を確認する（**図-付5.3**）。

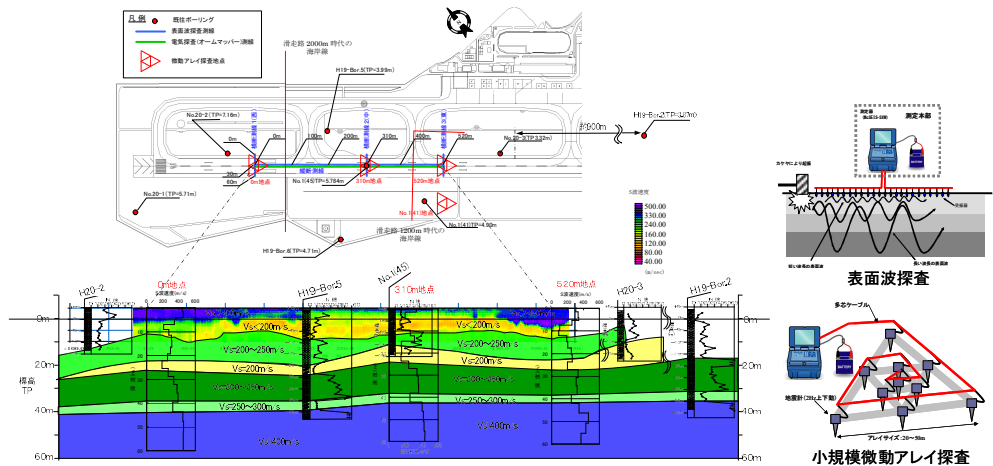


図-付 5.3 ボーリング・表面波探査・微動アレイによる地層断面図

- ④ ボーリング調査だけでは把握し得ない詳細な地層構成を把握した上で、液状化対策範囲を含め、未対策の場合の変形予測を実施し、耐震性能を満足するかの検討を実施する。

液状化対策工法の選定条件（一般）

- ⑤ 液状化対策工法の選定にあたっては、単なる土質との相性だけでなく、以下に示す施工性等を考慮する必要がある。
- a. 資機材の搬入・搬出及び施工が日々の作業サイクルの中で実施できること
  - b. 所定の改良効果（施設の耐震性能を含む）が確実に期待できること
  - c. 対策工法の施工等が既存施設に影響を及ぼさないこと
  - d. 設計・施工マニュアルが整備されていること

上記について、a.に関しては、空港毎に日々の作業可能時間が異なるため注意する必要がある。b.に関しては、低改良率の場合に注意する必要がある。また、c.に関しては、地震時以外の常時の供用性についても検討することが望ましい。d.に関しては、改良率を縮減する液状化対策工法であっても、施工管理等については通常の施工方法に準拠する必要があるため、マニュアル等が整備されている工法に限定しているが、試験施工等で施工方法を確認した場合はこの限りではない。

液状化対策工法の改良範囲等の縮減

液状化対策工法の改良範囲等の縮減とは、地盤改良工事における地盤改良範囲（余改良，部分改良）の縮小（図-付 5.4）及び低改良率の採用を意図しており<sup>5)</sup>、各工法の改良範囲の設定方法，留意事項，確認方法等について以下に示す。

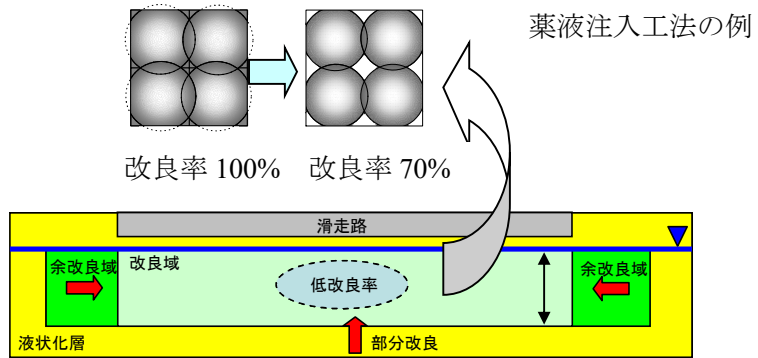


図-付 5.4 改良範囲及び形状のイメージ

⑥-1 密度増大工法における考え方

a. 余改良域縮小

従来、静的圧入締固め工法では、液状化層厚の  $0^\circ \sim 30^\circ$  の範囲で余改良域を設定していたが、変形照査次第で縮小が可能である (図-付 5.5)。余改良域の縮小は、周辺地盤の液状化により、過剰間隙水圧が改良体内に侵入するため、改良域中央部であっても消散に伴う沈下が生じる可能性がある。特に端部においてはその傾向が顕著であることが予想されるため、数値解析 (動解-圧密解析) あるいは模型実験により、過剰間隙水圧の伝搬状況を確認し、横断方向の滑走路端部の不等沈下 (勾配) を照査した上で、 $0^\circ \sim 30^\circ$  の範囲で適切に設定する必要がある。なお、液状化後における沈下量の簡易的な算定方法としては、液状化地盤については Ishihara and Yoshimine<sup>6)</sup> (図-付 5.6a)、過剰間隙水圧の伝搬後、消散するような場合には、菅野ら<sup>7)</sup>が実施した要素試験による過剰間隙水圧-体積ひずみ (背圧のみ負荷) 関係 (図-付 5.6b) を用いた算出方法もある。

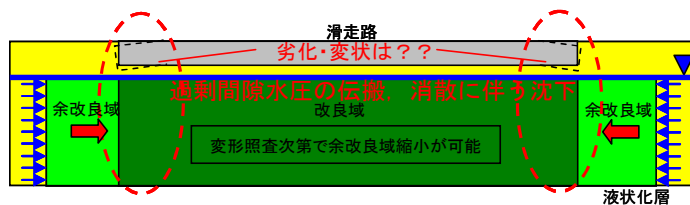


図-付 5.5 余改良域の縮小のイメージ

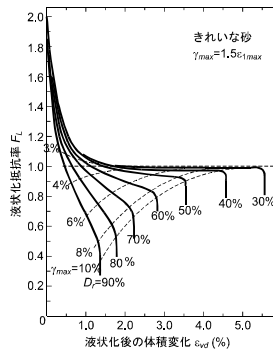


図-付 5.6a 体積ひずみと  $F_L$  の関係 (参考文献 6 を修正)

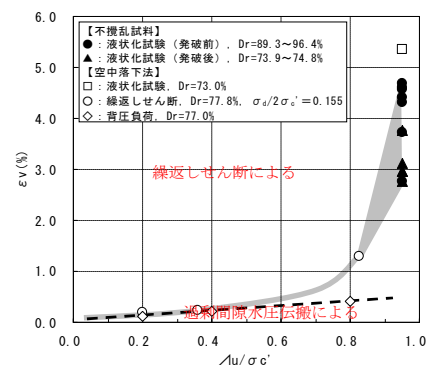
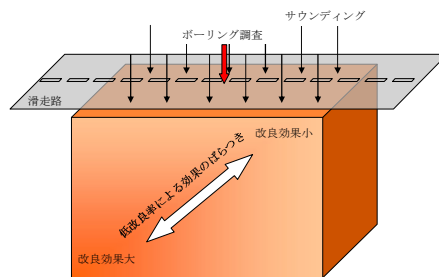


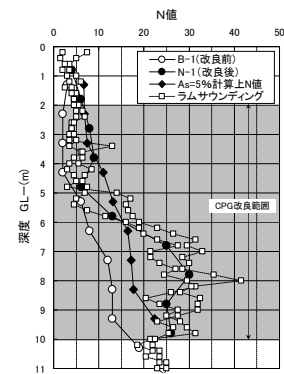
図-付 5.6b 過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係 (参考文献 7 を修正)

b. 改良率の低減

採用した工法で定められている最低改良率を更に下回る改良率で施工する場合、あるいは施工ピッチを通常よりも拡げて施工する場合、事前に試験施工を実施し改良効果を確認する。この際、 $N$  値（あるいは  $K$  値）及び液状化強度の増加を確認する必要があるが、低改良率であることから、改良効果にバラツキがみられる場合もある。改良効果の確認として、ボーリング 1 本では改良域全体の平均値として評価することは難しいため、最近用いられている PDC、ミニラム等の簡易なサウンディング試験<sup>8),9)</sup>により、改良体物性を平面、深度方向に連続的かつ空間的に確認し、品質をチェックする必要がある（**図-付 5.7**、**図-付 5.8**）。



**図-付 5.7 改良効果確認のイメージ**



**図-付 5.8 SPT とミニ・ラムサウンディングによる改良効果の調査事例<sup>8)</sup>**

c. 部分改良

深度方向の部分改良については、深度方向の余改良域の検討や概念が元々ないため、液状化層全体を改良する必要がある。

➔ ⑥-2 薬液注入工法・セメント改良系の地盤改良工法における考え方

a. 部分改良

**図-付 5.9** に示すように、部分改良率は 70%以上を確保する必要があり、設定にあたっては液状化層の分布範囲、連続性を十分に把握する必要がある。これについては、②、③等で示す調査結果を十分に活用する。なお、部分改良率の設定にあたり、数値解析（動解+圧密解析）、模型実験により、縦横断方向の滑走路端部の不等沈下（勾配）で照査を行う必要がある<sup>10)</sup>。また、改良効果確認については、サンプリング等により供試体が自立することが最低限の判断基準であり、施工後改良範囲の確認としては、不透水層・液状化層の判断が可能な三成分コーンや PDC 等のサウンディングにより改良範囲の確認を行う必要がある<sup>11)</sup>。

b. 改良率の低減

現場実験において、70%までは確認済みであるため、対象地点の地盤条件によっては改良率を 70%まで低減できる可能性がある。ただし、改良率 100%では改良域全体を不透水層水と見なせるため、数値解析におけるパラメータの設定が比較的容易であるが、**図-付 5.10** に示す様に改良率を低下させると、改良体が過剰間隙水圧の伝搬の影響を受け、過剰間隙水圧が発生することが現場実験で確認さ

れている。したがって、改良率を低減させる場合には、若干ではあるが、過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみについても考慮しなければならない場合もある。簡易な手法として、要素試験による過剰間隙水圧-体積ひずみ（背圧のみ負荷）関係<sup>12)</sup>（図-付 5.11）を用いた算出方法もある。

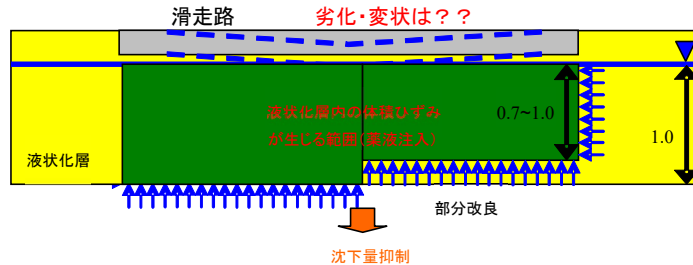


図-付 5.9 部分改良のイメージ

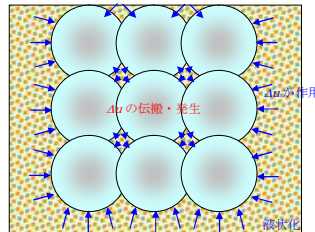


図-付 5.10 改良率 100%未満の場合の過剰間隙水圧伝搬のイメージ

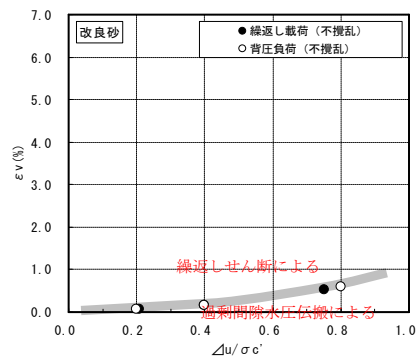


図-付 5.11 溶液型薬液注入供試体における過剰間隙水圧-体積ひずみの関係（参考文献 12 を修正）

c. 液状化層の基盤が傾斜している場合

基盤が傾斜の場合、地盤改良域直下の液状化層が流動する可能性があり（図-付 5.12）、現状では部分改良率 100%とすることが望ましい。例えば、横断方向の流動を抑えるため、滑走路端部直下のみ、部分改良率を 100%とする門型着底構造のような改良仕様が考えられるが、現状では周辺からの過剰間隙水圧の伝搬の影響を否定できないため、改良率は 100%とするか、変形照査について十分かつ慎重な検討を実施し、耐震性能を満足することを確認する必要がある。

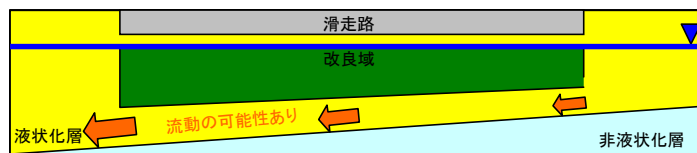


図-付 5.12 基盤が傾斜している場合のイメージ

変形照査（液状化対策工法選定・仕様決定後）

- ⑦ 本付録は、液状化対策工法の改良範囲、改良率を縮減するための方法を示しているが、選定した液状化対策工法の設計・施工の詳細については、各種工法マニュアルに従って実施する必要がある。また、最終的には、設計要領で定められている滑走路縦横断方向の管理規定値（変形勾配）について照査する必要がある。

## 参考文献

- 1) 例えば, (一財)沿岸技術研究センター:液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアルーコンパクトシヨングラウチング工法ー, 2013.
- 2) 例えば, (一財)沿岸技術研究センター:浸透固化処理工法技術マニュアル, 2010.
- 3) (公社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018.
- 4) 例えば, 村上弘行, 比留間誠之, 菅野高弘, 中澤博志:空港滑走路下の液状化対象層の連続性把握に関する一考察, 第 63 回土木学会年次学術講演会, III-191, pp.381-382, 2009.
- 5) 中澤博志, 菅野高弘:空港における滑走路を対象とした液状化対策に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.27-43, 2010.
- 6) Ishihara. K and Yoshimine. M: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 7) 菅野高弘, 中澤博志, 藤井照久, 山田和弘, 木村康隆:過剰間隙水圧とせん断剛性および体積ひずみの関係に関する考察, III-159, pp.317-318, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 2009.
- 8) 澤田俊一, 吉澤大造, 比留間誠之, 長瀬雅美, 菅野高弘, 中澤博志:間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法ーその 10 不同沈下評価ー, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.187-188, 2008.
- 9) 規矩大義, 菅野高弘, 中澤博志, 山口和也, 及川綾子, 多田守夫, 日比野七生, 村上実嘉子, 山口恵美:液状化した地盤の水圧消散と地盤強度の回復に関する原位置試験, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.1829-1830, 2008.
- 10) 中澤博志, 菅野高弘, 藤井照久, 山田和弘, 木村康隆:液状化による臨海部埋立空港滑走路の残留変形に関する現場実大実験および再現解析, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.269-274, 2009.
- 11) 池野勝哉, 吉田誠, 菅野高弘, 中澤博志:滑走路直下における人工液状化地盤の RI-CPT 調査報告, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.1837-1838, 2008.
- 12) 中澤博志, 菅野高弘, 池野勝哉, 三藤正明:溶液型薬液注入供試体の非排水変形特性(変形・強度特性), III-487, pp.973-974, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 2009.





## 付録-6 二次元地盤の有効応力解析と橋梁構造の弾塑性解析を組み合わせた解析法の例

本付録では、レベルII地震時に周辺地盤の変位の影響を受ける橋梁構造の耐震照査法の概要を示す。ここでは、進入灯橋梁を対象に説明するが、解析法は杭基礎や杭式栈橋などに応用できる。

### 6.1 進入灯橋梁の構造及び設置状況

進入灯橋梁の橋梁形式は、設置される空港が海上空港か、又は山岳空港かによって大きく2つに分けることができる。表-付 6.1 に進入灯橋梁の設置状況と地震時に進入灯橋梁が受ける影響を空港形式毎に分けて示す。

表-付 6.1 進入灯橋梁の設置状況と地震時の影響要因

|   |
|---|
| ①海上空港   |
| 設置状況：護岸に接続<br>   |
| 影響要因<br>1. 橋梁の地震時慣性力<br>2. 海水の動水圧<br>3. 地盤変位（海底地盤の液状化による流動変位など）<br>4. 護岸変位（埋立土、置換砂の液状化に起因する変位など）    |
| ②山岳空港   |
| 設置状況：高盛土に接続<br> |
| 影響要因<br>1. 橋梁の地震時慣性力<br>2. 地盤変位（高盛土の変位など）   |

海上空港に設置される進入灯橋梁は、海上の空港島の護岸に橋台を設け、海上に伸び出しており、橋脚の基礎地盤は軟弱な海成堆積層となっていることが少なくない。また、フーチングを設けずに橋脚と基礎杭が一体となったパイルベントやジャケットを含む多柱式基礎とな

っている例が多い。地震時には護岸から海底にかけて液状化に伴う地盤流動が発生するリスクを抱えている。

一方、山岳空港に設置される進入灯橋梁は、盛土の肩部に橋台を設け、盛土斜面から法先に橋脚を設置する構造となっている。盛土は高盛土となっていることが多く、橋脚の高さが大きく変化する。橋脚はトレススル構造が用いられ、基礎形式は杭基礎あるいは深礎杭となっている例が多い。基礎地盤となっている盛土の地震時の安定が、進入灯橋梁の耐震性能の確保の前提条件となる。

## 6.2 地震時挙動

過去に進入灯橋梁が地震による被害を受けた事例はほとんど無い。したがって、ここでは数値解析によって予測した進入灯橋梁の地震時挙動を示す。

前述のように海上空港であれば護岸、山岳空港であれば高盛土に橋台を設け、そこから張り出す形で進入灯橋梁は設置される。それゆえ、進入灯橋梁の地震時挙動は高盛土、護岸及び周辺地盤の変位の影響を受ける。図-付 6.1 及び図-付 6.2 に、それぞれ地震時に海上空港に設置された進入灯橋梁の被災する主な要因及び被災例を示す。

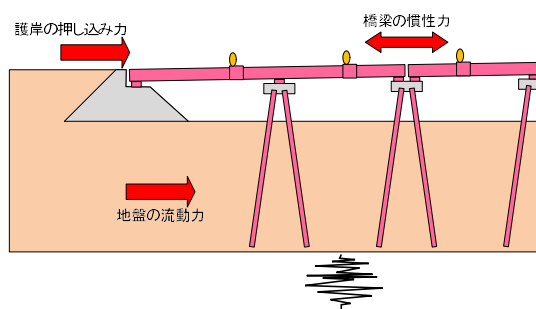


図-付 6.1 被災する主な要因

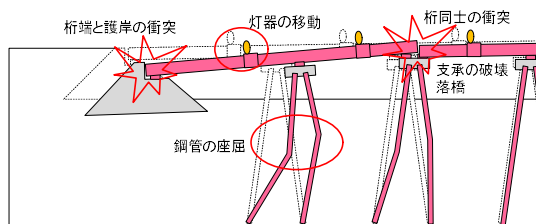


図-付 6.2 被災例

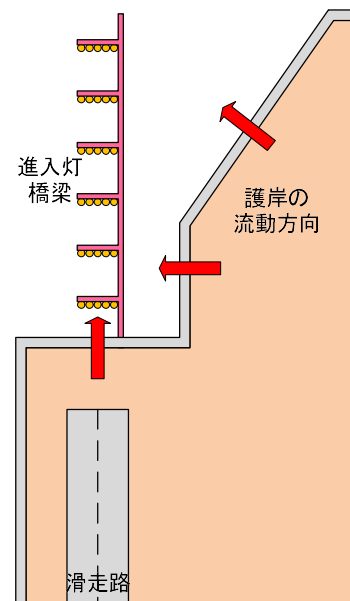


図-付 6.3 多方向からの影響  
(平面図)

多くの護岸は、レベル二地震時には基礎地盤の塑性化や液状化により大きく海側に変位すると考えられる。進入灯橋梁は護岸上の橋台に設置されている場合が多く、橋台に押されるように護岸とともに変位する。また、護岸より深いところにおいても、地盤が海側へ流動しようとするので、海底面より深いところで鋼管杭などの基礎が被害を受ける。また、図-付 6.3 に示す

ように進入灯橋梁の設置位置によっては、多方向からの護岸やその周辺地盤の影響を受ける。このように、周辺地盤の変位の影響が大きいと予想される場合は、進入灯橋梁自身の慣性力とあわせて地盤変位の影響評価が必要である。

### 6.3 解析手法

構造物の基礎と地盤との相互作用を考慮した解析手法として、様々な方法が提案されている<sup>1)</sup>。ここでは、地震時において基礎地盤の軟化（液状化を含む）による地盤変位、橋梁構造の非線形特性を考慮できる解析手法の概要を示す。

前述の地盤変位の影響を考慮するため、進入灯橋梁の耐震性能照査は、上部構造（桁）、橋脚、基礎まで含めた橋梁全体系で実施する必要がある。また、慣性力と地盤変位の作用は一般に位相が異なることが多いため、静的解析でなく動的解析を用いることが望ましい。橋梁全体系を対象とした動的解析による照査法として、次の2つの方法が考えられる。

#### ①一体モデル

地盤と橋梁が一体の有限要素モデルで耐震性能を照査する方法である。図-付 6.4 に解析モデルの概略を示す。地震時における地盤の挙動を精度良く求める場合、複雑な地盤の構成モデルを用いる必要がある。一般的に、このような地盤の構成モデルは2次元平面モデルのみ利用可能で、解析プログラムも2次元モデルに限られる場合も多く、一体モデルとすれば橋梁も2次元のモデルとなる。それゆえ、平面的な挙動のみ表現可能で橋軸直角方向の照査はできない。

地盤と杭の節点を同一とすると杭は壁のような挙動となり、地盤が杭間をすり抜ける挙動を表現することができない。それゆえ、地盤と杭の間には相互作用ばねを設けることが望ましい。

#### ②分離モデル（多入力解析）

地盤だけの地震応答解析より進入灯橋梁の基礎位置の応答を求め、基盤の加速度とあわせて橋梁と基礎をモデル化した骨組みモデルへ入力する方法である。入力は地盤ばねを介してされるが、地盤ばねの位置によって地盤応答は異なるため、解析では地盤ばね毎に、予め求めた地盤応答を入力することになり、それゆえ多入力解析<sup>2)</sup>と呼ばれている（多入力モデル、多点入力とも呼ばれる）。

この方法では、図-付 6.5 に示すように地盤と橋梁を分けて解析することができる。例えば、地盤は港湾構造物を対象とした有効応力解析で広く用いられている FLIP<sup>3)</sup>（付-1.3 参照）、橋梁は道路橋を対象とした非線形動的解析で広く用いられている TDAP<sup>4)</sup>と、それぞれの解析分野で得意な解析プログラムを分けて用いることができる。また、先の一体解析では地盤の解析にあわせて橋梁も2次元モデルとなるが、多入力では地盤は2次元、橋梁は3次元モデルとすることができ、複雑な橋梁の3次元的な挙動を求めることができる。

また、橋軸方向に対する地盤の応答や地震波を用いれば、同一の3次元骨組みモデルで橋軸直角方向の照査も可能である。さらに、あらかじめ水平2方向の地盤応答を求め、橋梁モデルに入力すること図-付 6.3 に示す、水平2方向の地盤変位の影響を考慮した解析も可能である。

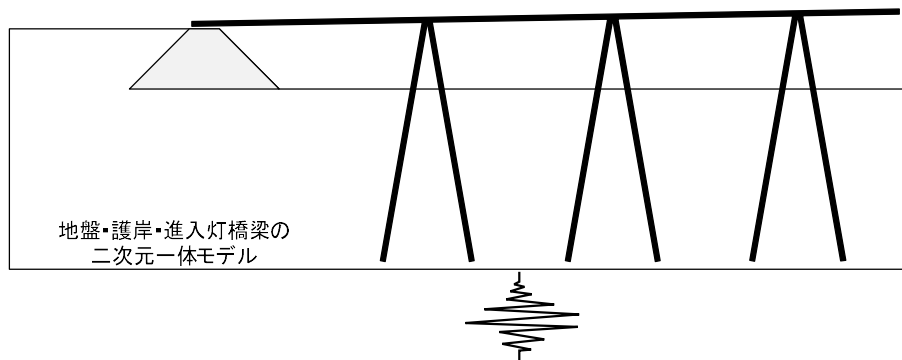


図-付 6.4 地盤・橋梁一体モデル

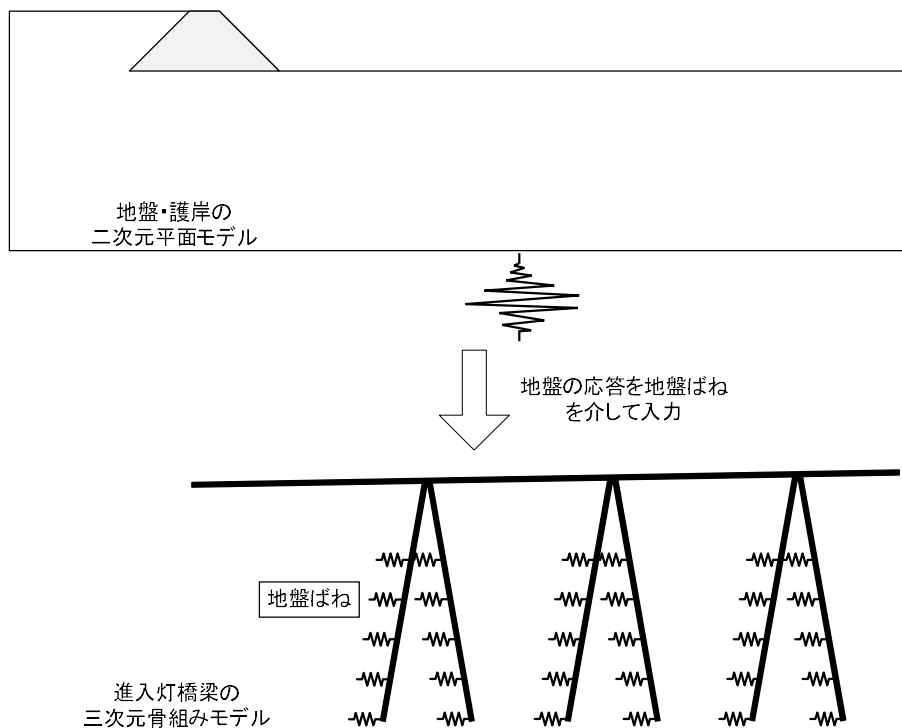


図-付 6.5 地盤・橋梁分離モデル（多入力解析）

### 参考文献

- 1) 日本地震工学会：基礎と地盤の動的相互作用を考慮した耐震設計ガイドライン（案），基礎—地盤系の動的応答と耐震設計法に関する研究委員会報告，164pp，2007.
- 2) 田中勉，吉田望，亀岡裕行，長谷川豊：地中構造物の多入力解析，第38回土木学会年次学術講演会講演概要集，第1部，pp.49-50，1983.
- 3) S. Iai, Y. Matsunaga and T. Kameoka: Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, Rep. of the Port and Harbour Res. Inst., Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990.
- 4) アーク情報システム：TDAPIII理論説明書 バージョン3.00，2007.

## 付録-7 空港舗装直下地盤への格子状地盤改良の適用

付録-4 に示した液状化対策工法のうち、格子状地盤改良を空港舗装直下地盤へ適用の際に留意すべき舗装の地震時挙動及び変形照査手法について以下に示す。

### 7.1 格子状地盤改良の特徴

格子状地盤改良は深層混合処理の形式の一つであり、**図-付 7.1** に示すように固化体を平面的に格子状に配置した形式である。断面を見ると地盤内に固化体の壁を作ることに対応し、地震時に発生する格子内の地盤（未改良地盤）のせん断変形を抑制することで液状化を防止できる（**図-付 7.2** 参照）。格子状地盤改良は、液状化層をすべて改良することで液状化を完全に防止できるブロック状改良とは液状化抑制メカニズムが異なり、ブロック状改良と比べて改良土量を削減できるため経済的な形式である。そのため、格子状地盤改良は固結工法である深層混合処理工法のうち改良率を低減させた工法、又は、固化体壁によりせん断変形を抑制するせん断変形抑制工法に分類される。

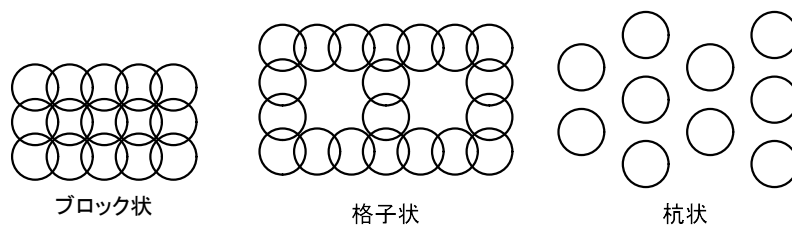


図-付 7.1 深層混合処理工法における固化体の平面配置

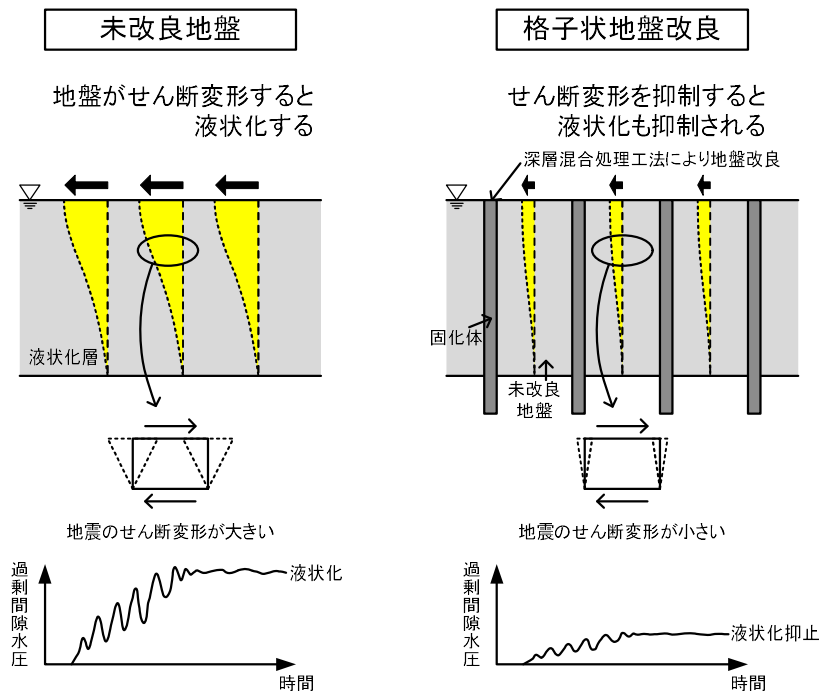


図-付 7.2 格子状地盤改良の液状化抑制メカニズム

空港舗装直下地盤に格子状地盤改良を適用する場合において、コスト縮減や工期短縮のため、固化材の量を減らせるよう格子間隔を広く設定することが有力な方法であるが、格子間隔が広くなれば改良効果は小さくなる。そのため、対象施設の要求性能に照らし合わせた格子間隔の設定が重要である。図-付 7.3 は舗装下地盤の格子間隔の違いに関する模型振動台実験の結果<sup>1,2)</sup>を示すが、格子間隔が十分に狭い場合には改良地盤上の舗装は沈下しない。一方、間隔が広く改良効果が十分でない場合には格子内未改良部に過剰間隙水圧の上昇が見られ、未改良部上の舗装が沈下して固化体上との間で不陸が生じ、平坦性が損なわれる。

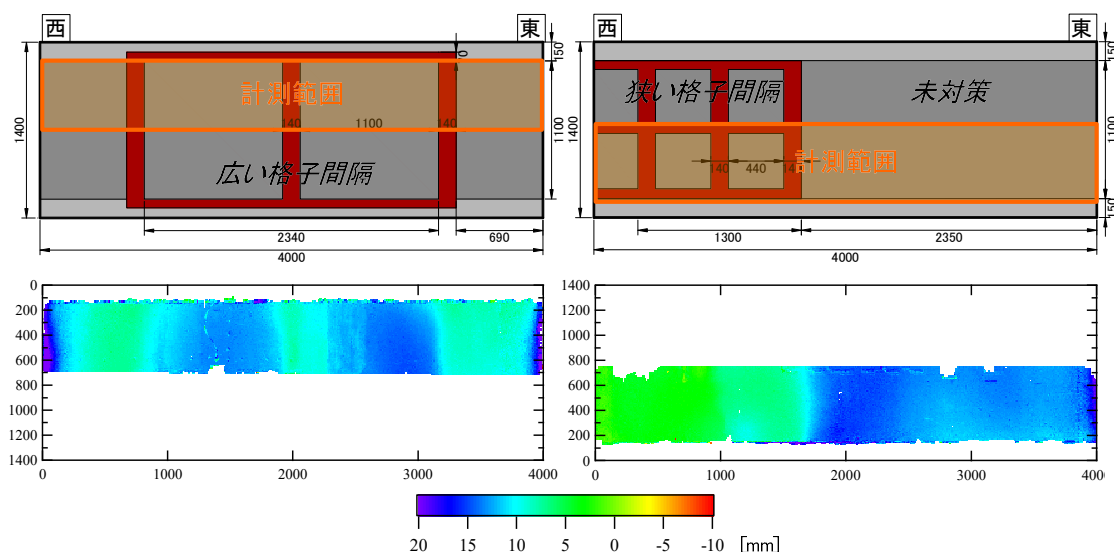


図-付 7.3 レーザースキャナーで計測した舗装表面の沈下量の色塗りコンター図

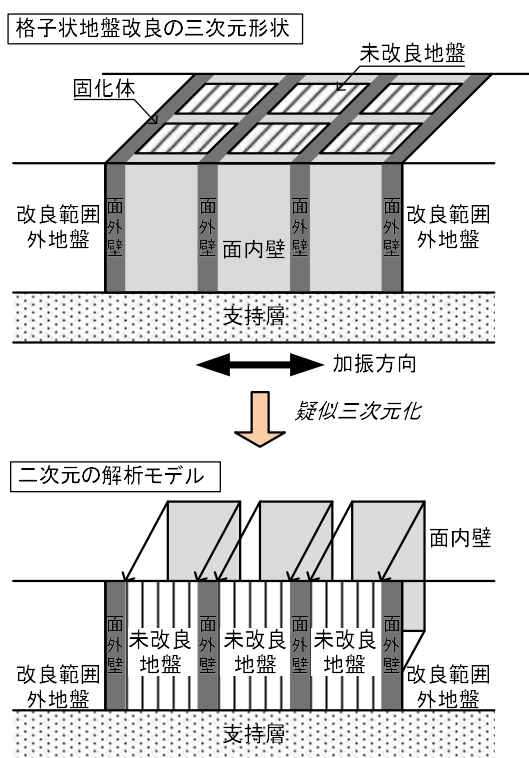
## 7.2 変形照査手法、格子状地盤改良のモデル化

滑走路や誘導路を対象とした耐震性能照査においては、上述のような地震後の平坦性に関する照査が必要であり、特にレベルII地震動に対する検討では、数値解析による照査が求められる。砂地盤の液状化を対象とした地震応答解析では、付録-1.3 で示した港湾分野の実務で実績が多い有効応力解析コード FLIP<sup>3)</sup>が広く用いられている。しかし、一般的な FLIP の解析手法は、短い地震動継続時間中の砂地盤における過剰間隙水圧の消散を無視した非排水条件を仮定したもので、過剰間隙水圧の消散による地盤の体積収縮を考慮することができない。そのため、液状化層の体積収縮を別途、室内試験結果から得られたチャート<sup>4)</sup>に照らし合わせて簡便に求める方法が広く用いられている。地震応答解析の後に、過剰間隙水圧の消散による地盤の変形を土水連成解析（以後、圧密解析と称する）より求めることで、空港舗装で必要な平坦性を評価することが可能である。

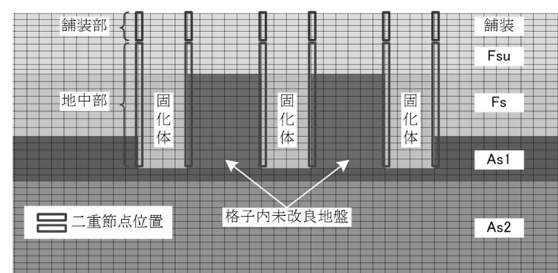
数値解析における格子状地盤改良のモデル化において、三次元モデルは計算負荷が大きく、モデル構築に十分な地盤情報も取得できないため、実務での適用は難しい。よって、図-付 7.4 に示すような、格子状地盤改良の三次元形状を疑似的に二次元でモデル化することが必要となる<sup>2,5)</sup>。ここで、固化体を面外壁と面内壁に分け、前者は未改良地盤、支持層、改良範囲外の地盤と一体としてモデル化し、後者は未改良地盤と重ね合わせ、面内壁と面外壁で重複する節点

は結合している。

格子状地盤改良では、地盤内に地盤と固化体といった剛性差の大きい材料同士が隣接しているため、地盤と固化体が連続した節点で共有されていると、自重解析の際、剛性が小さく変形が大きな地盤の変形が、剛性が大きく変形の小さな固化体にぶら下がる形状となるため、地盤の応力が過小評価される。そのため、固化体と地盤の境界は二重節点として両者の鉛直変位を分離させる必要があり、その範囲は格子状地盤改良の上部に位置する表層非液状化層及び舗装を含む（**図-付 7.5** 参照）。同様に、二重節点により格子状地盤改良直上の舗装部において解析上の不連続な変形が生じないように解析内容に適した二重節点の変位拘束条件を設定する（**表-付 7.1** 参照）。



**図-付 7.4 解析モデルの二次元化**



**図-付 7.5 二重節点の位置**

**表-付 7.1 二重節点の変位拘束条件**

| 位置  | 自由度 | 自重解析 | 地震応答解析 | 圧密解析 |
|-----|-----|------|--------|------|
|     | 方向  |      |        |      |
| 舗装部 | 鉛直  | 自由   | 接合     | 接合   |
|     | 水平  | 接合   | 接合     | 接合   |
| 地中部 | 鉛直  | 自由   | 接合     | 自由   |
|     | 水平  | 接合   | 接合     | 接合   |

自由：2つの節点が互いに自由に変位

接合：2つの節点の変位が同一（等変位拘束）

## 参考文献

- 1) 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘, 今井政之, 東中邦夫, 佐伯嘉隆: 格子間隔が広い格子状改良直上のアスファルト舗装の変形に関する模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp.I-227-I\_241, 2014.
- 2) 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘, 今井政之, 東中邦夫, 金田一広, 本多剛: 空港舗装直下地盤への格子状地盤改良工法の適用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, 2015.
- 3) Iai S., Matsunaga Y. and Kameoka T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 4) Ishihara K. and Yoshimine M.: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soil and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 5) 佐伯嘉隆, 大矢陽介, 小濱英司, 佐藤成: 格子状改良を施した空港基本施設における地震時の変形照査手法, 第 34 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, 論文番号 C11-679, 8pp., 2014.



# 設計例

## 例-1 耐震性能検討に係る空港施設の地震被害事例

国内の空港施設の地震による被害事例を以下に示す。これまでの主な地震によって被害を受けた空港は、**例表-1.1**に示すように22空港あり、空港施設が受けた被害は、舗装部、建築物、護岸、排水施設、共同溝等で発生しており、液状化が確認された空港は4空港あった。

これらの地震による空港施設の被害事例を**例表-1.3～例表-1.16**に示す。なお、**例表-1.3～例表-1.16**内に示している被害程度（Ⅰ～Ⅳ）は、文献等での記載内容から**例表-1.2**に示すような被害程度を推定したものである。

**例表-1.1 地震による被害を受けた空港**













| 空港      | 地震               | 被害                        | 液状化 |
|---------|------------------|---------------------------|-----|
| 宮崎空港    | 日向灘地震（1961）      | 舗装部                       |     |
| 新潟空港    | 新潟地震（1964）       | 舗装部、防潮堤、排水施設、ターミナルビル      | あり  |
| 函館空港    | 十勝沖地震（1968）      | 電源施設※                     |     |
| 仙台空港    | 宮城県沖地震（1978）     | 舗装部、排水施設                  |     |
| 秋田空港    | 日本海中部地震（1983）    | 庁舎                        |     |
| 新東京国際空港 | 千葉県東方沖地震（1987）   | ターミナルビル、場周柵基礎※            |     |
| 釧路空港    | 釧路沖地震（1993）      | 舗装部、高盛土、庁舎、調整池            |     |
| 奥尻空港    | 北海道南西沖地震（1993）   | 舗装部、排水施設、照明施設             |     |
| 中標津空港   | 北海道東方沖地震（1993）   | NDB、飛行場灯台※                |     |
| 関西国際空港  | 兵庫県南部地震（1995）    | 舗装部、護岸、建築施設、共同溝           |     |
| 大阪国際空港  |                  | 舗装部、建築施設、照明施設             |     |
| 米子空港    | 鳥取県西部地震（2000）    | 舗装部、護岸                    | あり  |
| 松山空港    | 芸予地震（2001）       | 着陸帯                       | あり  |
| 釧路空港    | 十勝沖地震（2003）      | ターミナルビル                   |     |
| 能登空港    | 能登半島地震（2007）     | 舗装部                       |     |
| 仙台空港    | 東北地方太平洋沖地震（2011） | 舗装部、排水施設、消防水利施設、鉄道橋梁、鉄道擁壁 | あり  |
| 花巻空港    |                  | ターミナルビル、航空灯火              |     |
| 山形空港    |                  | 庁舎                        |     |
| 福島空港    |                  | 管制塔                       |     |
| 百里飛行場   |                  | ターミナルビル、庁舎                |     |
| 成田国際空港  |                  | 貨物上屋                      |     |
| 熊本空港    | 熊本地震（2016）       | 舗装部、ターミナルビル※、排水施設※、場周柵※   |     |

※地震被害事例として報告されているが、文献等からは被害状況を把握できなかったもの。

例表-1.2 被害程度の分類

| 項目    | 分類  | 推定被害程度  |
|-------|-----|---|
| 空港の施設 | I   | 軽微なひび割れの発生，表面の許容変形量を満足，基礎地盤が液状化しない等   |
|       | II  | 早期復旧可能な程度の残留沈下量以下，表面に沈下や段差が若干発生し許容変形量を一部逸脱する，部分的な液状化が発生する等  |
|       | III | 表面に沈下や段差が発生し許容変形量を逸脱する，液状化が発生する等  |
|       | IV  | 液状化発生等に伴い沈下・段差が生じることで許容変形量を逸脱し，空港機能を維持出来ない被害レベルであるが，二次的災害は引き起こさない等                                |
| 地中施設  | I   | 損傷無し，構造部材の応答が弾性限界内，液状化が発生しない等   |
|       | II  | 地震時断面力が保有断面耐力以下，部分的な液状化が発生する等   |
|       | III | 崩壊しない，二次的災害を引き起こさない等  |
|       | IV  | 崩壊する，応急復旧は不可能なレベルで再構築が必要等   |
| 橋梁    | I   | 損傷なし又は若干の補修が必要な損傷，構造部材の応力が弾性限界内等  |
|       | II  | 地震時断面力が保有断面耐力以下，補修が必要な損傷等   |
|       | III | 崩壊しない，二次的災害を引き起こさない，補修が必要で場合によっては部材の取り替えが必要な損傷等   |
|       | IV  | 崩壊はするが，二次的災害を引き起こさない等   |
| その他   | I   | 損傷無し，構造部材の応答が弾性限界内等   |
|       | II  | 軽微な損傷レベル，地震時断面力が保有断面耐力以下等   |
|       | III | 崩壊ないし倒壊しない，舗装面に大規模なひび割れが発生しない等  |
|       | IV  | 崩壊ないし倒壊するが二次的災害を引き起こさない，舗装面に大規模なひび割れが発生する等  |
| 用地    | I   | 損傷無し，関連計器の許容固定精度以下の変形，損傷なし又は若干の補修が必要な損傷，構造部材の応答が弾性限界内，液状化が発生しない等                                  |
|       | II  | 地震時断面力が保有断面耐力以下，構造的安定を確保，関連計器の許容固定精度を超過する変形が発生，短期間で復旧可能なレベルの変形，部分的な液状化が発生（護岸の場合），液状化発生無し（高盛土の場合）等 |
|       | III | 崩壊しない，（液状化が発生するが）二次的災害を引き起こさない，補修が必要で場合によっては再構築が必要な損傷（擁壁）関連計器の倒壊などは誘発しない等                         |
|       | IV  | （崩壊又は倒壊するが）二次的災害を引き起こさない等   |







例表-1.3 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その1）

| 地震名              | 資料名<br>【出典】  | 空港名           | 空港土木施設被害程度（I～IV） |                       |      |      |     |          |      |        |      |       |            |      |       | 被害内容 |   |      |   |                             |
|------------------|--|---------------|------------------|-----------------------|------|------|-----|----------|------|--------|------|-------|------------|------|-------|------|---|------|---|-----------------------------|
|                  |  |               | 空港の施設            |                       |      | 地中施設 |     | 橋梁       |      | その他    |      | 用地    |            |      |       |      |   |      |   |                             |
|                  |  |               | 着陸帯<br>滑走路等      | 誘導路及び誘導路帯<br>滑走路端安全区域 | エプロン | 地下道  | 共同溝 | ライフライン施設 | 排水施設 | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 進入灯橋梁 | プラスチックフェンス | 防音施設 | その他施設 |      | 護岸  | 道路擁壁 | 鉄道擁壁  | 高盛土                         |
| 日向灘地震<br>(1961年) | 日向灘地震による被害<br>【土木学会誌(1961.8)】  | 宮崎（空港）<br>飛行場 | I                | -                     | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -          | -    | -     | -    | -   | -    | -   | 滑走路に亀裂や陥没が生じた。<br>滑走路、亀裂、陥没 |
| 新潟地震<br>(1964年)  | 防災・安全な国土形成を目指して大震災を踏<br>まえた空港施設の耐震性強化への取り組み 地震に<br>強い滑走路の建設【月刊建設】<br><br>・新潟地震と防災技術(1994)<br>・昭和39年新潟地震震害調査報告<br>第9編 港湾(1966)<br>・新潟空港災害復旧工事報告(1967)<br>※記載内容は同じ | 新潟空港          | III              | III                   | III  | III  | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -          | -    | -     | -    | -   | -    | 基本施設である舗装構造体への被害は、広範囲に液状化が発生し、舗装には大規模な亀裂や不等沈下が生じた。<br>舗装構造体、液状化、亀裂、不等沈下   |                             |
|                  |  | 新潟空港          | III              | III                   | III  | III  | -   | -        | III  | -      | -    | -     | -          | -    | -     | III  | -   | -    | 空港の基本施設である滑走路、着陸帯、誘導路及びエプロンならびに付帯施設である道路、駐車場及びターミナルビル等は破壊、亀裂及び沈下などの激甚な災害を受け、また地下水の噴出、防<br>潮堤の破損による海水の浸入等によってたん水区域を生じ、空港機能は完全に麻痺状態に陥った。<br>◆A滑走路:A滑走路の南端から300mくらい所で断層性の亀裂を生じた。これは旧砂丘地帯とほんらん原の境で、その南側はほとんど被害が見られず、北側の破損が著しかった。すなわち南側か<br>ら500mくらい縦断勾配の変化点付近で舗装版のせり上がり破壊が見られた。また北側残り約800mは不等沈下により舗装面に波状の凹凸を生じた。<br>◆B滑走路:B滑走路の両端から150mくらいの所に階段状の断層を生じた。これは海岸砂丘とほんらん原との境であると思われるが、海岸砂丘側の舗装は完全に亀裂破壊している。また本滑走路面<br>に至る不同沈下により、舗装面に凹凸を生じた。<br>◆着陸帯:旧砂丘地帯を除く着陸帯全域で地下水の噴出にともない、砂(泥土あるいはシルトをともな5)の噴出が各所に発生した。<br>◆排水施設:排水は横断する1800mmと1200mmの鉄筋コンクリート管きよにより集水流下し、前述のごとくポンプアップしていたが(昭和30年以後の地盤沈下により必要となり、昭和34年に設置した)<br>地震により、排水管はジョイントが開き、砂が流入し、また不等沈下により凹凸を生じ流下不能となり、また揚水ポンプ及びびび管が破損し、空港をふくめ、流域に相当面積のたん水区域を生じた。<br>◆ターミナルビル:ターミナルビルは1m埋没傾斜した。またターミナルビルに隣接したエプロン駐車場は、ビルに吸込まれるように傾斜して沈下した。 |                             |
|                  |  | 新潟空港          | III              | III                   | III  | III  | -   | -        | III  | -      | -    | -     | -          | -    | -     | III  | -   | -    | 基本施設、付帯施設、破損、亀裂、沈下、破壊、地下水の噴出  |                             |
|                  |  | 新潟空港          | III              | III                   | III  | III  | -   | -        | III  | -      | -    | -     | -          | -    | -     | III  | -   | -    |       |                             |
| 新潟空港             | III  | III           | III              | III                   | -    | -    | III | -        | -    | -      | -    | -     | -          | III  | -     | -    | 【A滑走路】南端より300m付近の断層性のき<br>れつ<br>【A滑走路】南端より500m付近の舗装版のも<br>り上がり破壊<br>【A滑走路・着陸帯】滑走路端の地下水の噴<br>出口<br>【B滑走路】西端より100m付近の断層性の横<br>方向のきれつ<br>滑走路、亀裂<br>滑走路、もり上がり<br>滑走路、着陸帯、液状化、噴砂<br>滑走路、亀裂、段差  |      |   |                             |
| 新潟空港             | III  | III           | III              | III                   | -    | -    | III | -        | -    | -      | -    | -     | -          | III  | -     | -    |     |      |   |                             |
| 新潟空港             | III  | III           | III              | III                   | -    | -    | III | -        | -    | -      | -    | -     | -          | III  | -     | -    | 【B滑走路】西端より400m付近の縦方向のき<br>れつ<br>【B滑走路】西端より700m付近の地下水の噴<br>出<br>【B滑走路】西端より150m付近の横方向きれ<br>つ<br>【B滑走路】東側のかん水及び中央付近のわ<br>ん曲<br>滑走路、亀裂<br>滑走路、地下水噴出<br>滑走路、亀裂<br>滑走路、かん水、わん曲  |      |   |                             |
| 新潟空港             | III  | III           | III              | III                   | -    | -    | III | -        | -    | -      | -    | -     | -          | III  | -     | -    |     |      |   |                             |
| 新潟空港             | III  | III           | III              | III                   | -    | -    | III | -        | -    | -      | -    | -     | -          | III  | -     | -    | 【B滑走路】舗装上に地下水とともに噴出さ<br>れた泥土<br>【誘導路】南端より300m付近のきれつ<br>【エプロン】エプロンのたん水状況<br>滑走路、噴砂<br>誘導路、亀裂<br>エプロン、たん水   |      |   |                             |

例表-1.4 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その2）

| 地震名                | 資料名<br>【出典】                                     | 空港名          | 空港土木施設被害程度（I～IV） |           |      |      |     |          |      |        |      |      |          |      |       | 被害内容 |      |      |     |   |
|--------------------|---|--------------|------------------|-----------|------|------|-----|----------|------|--------|------|------|----------|------|-------|------|------|------|-----|---|
|                    |   |              | 空港の施設            |           |      | 地中施設 |     |          | 橋梁   |        |      | その他  |          |      | 用地    |      |      |      |     |   |
|                    |   |              | 滑走路等             | 誘導路及び誘導路帯 | エプロン | 地下道  | 共同溝 | ライフライン施設 | 排水施設 | 消防水利施設 | 鉄道橋梁 | 進入橋梁 | プラストフェンス | 防音施設 | その他施設 | 護岸   | 道路擁壁 | 鉄道擁壁 | 高盛土 |   |
| 新潟地震<br>(1964年)    | 甲信越・北関東地方の地盤特性と<br>工事例新潟地震の地震被害と耐震対策事例<br>【基礎工】 | 空港被害<br>事例なし | -                | -         | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 記載事例なし  |
|                    | 地盤改良技術 巻出し工法による<br>液状化対策新潟空港拡張工事<br>【土木施工】      | 新潟空港         | III              | III       | III  | III  | III | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 新潟空港の被害の多くは砂地盤の液状化によるものであり、空港の基本施設である滑走路、誘導路、エプロン等の諸施設は破壊、亀裂、沈下、地下水の噴出等により激甚な災害を受け空港機能は完全に麻痺状態に陥った。   |
|                    | 新潟地震調査概報  | 新潟空港         | III              | III       | III  | III  | III | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 液状化、滑走路、誘導路、エプロン、破壊、亀裂、沈下、地下水噴出<br>・新潟飛行場入口付近の砂丘斜面に、交叉する地割れが生じた。地割れは典型的なクロスセットを形成している。地割れのクロスセットを解析すると、最大偏差応力はほぼ東の方向で、引張り応力である。低地の方向が沈下するような変形が生じたものと考えられる。またA滑走路の中央部にアスファルトがぶつかりあって衝上げた跡があった。表面層の流動稼働を予想させる。またA滑走路南部を横断した沈下による割れ目があり東側土手から数百メートル続いていた。これは旧水路跡に当たるものと思われる。<br>・土砂の液化現象による地盤の変動は、飛行場周辺の道路附近及び滑走路により反映されていた。平坦な低地への境界付近で、亀裂、陥没は低地に向けて階段状に現われ、また滑走路に生じたコンクリート舗装の噛みあつた破壊は、1mにも及ぶ盛り上りを示し、一番沈降した地点で起つたのも当然なことではある。それらの現象を起させる要因である地下水は、調査当日においてもまだ跡を残し、約1mも沈んだ3階建空港ターミナル建物が、それによって、あたかも水上に浮んでいるごとくに見えていた。   |
| 十勝沖地震<br>(1968年)   | 北海道地方における<br>1968年十勝沖地震災害の概要<br>【土木学会誌(1968.7)】 | 空港被害<br>事例なし | -                | -         | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 記載事例なし  |
| 宮城県沖地震<br>(1978年)  | 1978年宮城県沖地震災害調査報告<br>【土研報告No.159】               | 仙台空港         | I                | -         | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 仙台空港においては、滑走路等にクラックが生じたりして一時発着が不能となったが、大きな障害がなく、間もなく平常運行がなされた。また、長距離輸送の確保のための協力要請に応じて、(株)全日本空輸は仙台-東京間の臨時に1往復便して運行を行った。  |
|                    | 1978年宮城県沖地震港湾被害報告<br>【港研資料No.325】               | 仙台空港         | -                | -         | -    | -    | -   | -        | II   | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 滑走路、クラック<br>地震動により生じた異常は、軽微なものを含め十数箇所発生したが、補修が必要と判断された箇所は、下記のボックスカルバート上付近における施設である。一時的に滑走路を閉鎖し沈下の状態を詳しく調査し、滑走路表面の補修で安全性を確保すると判断されたので、アスファルトのオーバーレイにより補修した。<br>・AR/Wショルダーの沈下(2箇所)・AR/Wの沈下(1箇所)   |
|                    | 1978年宮城県沖地震報告<br>【土木学会誌(1978.12)】               | 空港被害<br>事例なし | -                | -         | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | ボックスカルバート、沈下<br>記載事例なし  |
| 日本海中部地震<br>(1983年) | 1983年日本海中部地震港湾被害報告<br>【港研資料No.511】              | 秋田空港         | -                | -         | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 昭和58年(1983年)日本海中部地震に対して、空港土木施設は無被害であった。空港全体では、運輸省東京航空局秋田空港出張所の建物の床の1部にクラックが入り、その建物の上部にある管制室の天井の化粧パネルが落下するなどの影響があった。以下、被害があった施設について記す。<br>◆照明塔：エプロン照明のための大型照明塔があるが、そのうちの1基の地覆コンクリートにクラックが発生した。照明塔の機能や構造には全く異常がなかった。<br>◆建築物：秋田空港出張所の鉄筋コンクリート建築物の床の一部にクラックが発生した。また、同建築物の上部にある管制室の天井の化粧パネルにクラックが入り、パネル破片が多数落下した。<br>※航空機への影響：地震発生時、着陸のために秋田空港へ進入中の航空機があった。前記のとおり、管制室天井に被害が発生し、管制官に危険な状態となったため、管制官は航空機に空中待機を指示し、いったん退避した。   |
|                    | 日本海中部地震報告<br>【土木学会誌(1983.9)】                    | 空港被害<br>事例なし | -                | -         | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | 照明塔、地覆コンクリート、クラック、RC建築物、管制室、パネル破片落下<br>記載事例なし   |
| 釧路沖地震<br>(1993年)   | 1993年釧路沖地震港湾施設被害報告<br>【港研資料No.766】              | 釧路空港         | I                | -         | I    | -    | -   | II       | -    | -      | -    | -    | -        | II   | -     | -    | -    | II   | -   | ◆滑走路及び誘導路：幅1～3mmのクラックが路面の横断方向に発生した。クラック幅は小さく、段差も生じていないため、航空機の離着陸に全く支障は出していない。クラックの間隔に注目してみると、クラックは概ね350～100m間隔で路面横断方向に入る傾向にあり、その傾向は滑走路北側の高盛土に近い側で顕著である。現在、滑走路舗装の設計では地震動の影響を考慮していないが、地震動が比較的大きかったことから、このようなせん断によるクラックが入ったものと考えられる。<br>◆空港北側の高盛土：表面被覆土の一部に局所的なひび割れ、円弧滑りが発生した。土砂流出量は2,000m <sup>3</sup> 、植生流出量は1,000m <sup>3</sup> 程度であった。なお、現在工事中の延長部分の高盛土施工地区での被害は全く発生しなかった。<br>◆空港南西側及び南東側盛土：盛土全体に渡って崩壊が発生し、土砂流出量は2,500m <sup>3</sup> 、植生流出量は1,500m <sup>3</sup> であり、場周権に破損が生じた。滑走路等の基本施設には全く支障はないが、場周道路において大型車の通行に支障が生じた。南東側盛土では、法肩部にひび割れが発生し、植生流出量が500m <sup>3</sup> 発生し、重量法枠が大きく変形した。<br>◆北側調整池及び場周道路：北側調整池では、地割れによる法枠破損(重量法枠破損、堤体の破損)が生じた。また、空港場周道路では、ひび割れによる舗装の破損が生じた。 |
|                    |   |              |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |          |      |       |      |      |      |     | 滑走路、誘導路、クラック、高盛土、円弧滑り、崩壊、ひび割れ、変形、地割れ、法枠破損、舗装破損  |

例表-1.5 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その3）

| 地震名   | 資料名<br>【出典】                                      | 空港名  | 空港土木施設被害程度（I～IV） |           |      |     |     |          |      |        |      |      |       | 被害内容 |        |       |    |      |      |     |  |  |   |  |  |
|---|--|------|------------------|-----------|------|-----|-----|----------|------|--------|------|------|-------|------|--------|-------|----|------|------|-----|--|--|---|--|--|
|   |  |      | 空港の施設            |           | 地中施設 |     |     | 橋梁       |      | その他    |      | 用地   |       |      |        |       |    |      |      |     |  |  |   |  |  |
|   |  |      | 滑走路等             | 誘導路及び誘導路帯 | エプロン | 地下道 | 共同溝 | ライフライン施設 | 排水施設 | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 鉄道橋梁 | 進入付橋梁 | 防音施設 | 防音フェンス | その他施設 | 護岸 | 道路擁壁 | 鉄道擁壁 | 高盛土 |  |  |   |  |  |
| 釧路沖地震<br>(1993年)                              | 1993年釧路沖地震港湾施設被害報告<br>【港研資料No.766】               | 釧路空港 | I                | -         | -    | I   | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -     | -    | -      | -     | -  | -    | -    | -   | -  | <br>【滑走路のクラック状況】幅1～3mmのクラックが路面の横断方向に発生した。クラック幅は小さく、段差も生じていないため、航空機の離発着に全く支障は出ていない | <br>【滑走路のクラック状況】同左 | <br>【釧路空港北側の高盛土被害状況】表面被覆土の一部に局所的なひび割れ、円弧滑りが発生した | <br>【釧路空港南側の高盛土被害状況】盛土全体に渡って崩壊が発生し、揚周槽に破損が生じた |
|   |  |      |                  |           |      |     |     |          |      |        |      |      |       |      |        |       |    |      |      |     |  |  | 滑走路、クラック  | 同左   | 高盛土、ひび割れ、円弧滑り  |
|   | 特集 基礎と地震 最近の地震における<br>港湾・空港の被害<br>【基礎工(1993.12)】 | 釧路空港 | I                | -         | -    | I   | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -     | -    | -      | -     | -  | -    | -    | -   | -  | <br>【釧路空港南東側の高盛土被害状況】法肩部にひび割れが発生し、重量法枠が大きく変形した                                    |   |  |  |
|   |  |      |                  |           |      |     |     |          |      |        |      |      |       |      |        |       |    |      |      |     |  |  | 高盛土、法肩部、ひび割れ  |  |  |
| 1993年釧路沖地震被害調査報告<br>【北海道開発局開発土木研究所報告(1993.9)】 | 釧路空港   | -    | -                | -         | -    | -   | -   | -        | -    | -      | -    | -    | -     | -    | -      | -     | -  | -    | -    | -   | <p>滑走路北端の高さ60mの高盛土の法面の3ヵ所に水平方向に軽微な亀裂が発生した。この高盛土では地震観測が実施されてきており、今回の地震でも800Galを超える大きな記録が得られている。非常に大きな加速度が作用したにもかかわらず、被害がほとんどなかったことが注目される。また、滑走路南端の場周道路の盛土部分の法面でかなり大きな亀裂・段差が生じた。さらに、滑走路・誘導路には、横断方向にへアクラックが発生したが、これらの被害による空港機能の支障は生じなかった。</p> | <br>【釧路空港の滑走路のへアクラック】滑走路・誘導路には、横断方向にへアクラックが発生したが、これらの被害による空港機能の支障は生じなかった。        |   |  |  |
|   |  |      |                  |           |      |     |     |          |      |        |      |      |       |      |        |       |    |      |      |     |  | 高盛土、亀裂、盛土(場周道路)、亀裂、段差、滑走路、誘導路、へアクラック   | 滑走路、誘導路、へアクラック  |  |  |
|   |  |      |                  |           |      |     |     |          |      |        |      |      |       |      |        |       |    |      |      |     | 法面に局所的なひび割れが発生したのみで航空機の離発着には支障がない状況であった。<br>法面、ひび割れ  |  |   |  |  |







例表-1.6 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その4）

| 地震名                     | 資料名<br>【出典】  | 空港名          | 空港土木施設被害程度（I～IV）  |           |   |      |   |          |   |        |      |      |       |          |      | 被害内容 |       |    |      |      |   |
|-------------------------|--|--------------|---|-----------|---|------|---|----------|---|--------|------|------|-------|----------|------|------|-------|----|------|------|---|
|                         |  |              | 空港の施設   |           |   | 地中施設 |   |          | 橋梁  |        | その他  |      | 用地    |          |      |      |       |    |      |      |   |
|                         |  |              | 滑走路等  | 誘導路及び誘導路帯 | エプロン  | 地下道  | 共同溝   | ライフライン施設 | 排水施設  | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 鉄道橋梁 | 進入付橋梁 | プラストフェンス | 防音施設 |      | その他施設 | 護岸 | 道路擁壁 | 鉄道擁壁 | 高盛土   |
| 釧路沖地震<br>(1993年)        | 1993年釧路沖地震における<br>港湾・漁港・空港の被害<br>【土と基礎(1993.6)】                      | 釧路空港         | -   | -         | -   | -    | -   | -        | -   | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -    | -     | -  | -    | II   | 高盛土の法面に局所的なひび割れが発生したが、航空機の離発着には支障がない状況であった。<br>法面、ひび割れ  |
|                         | 1993年釧路沖地震における被害の概要<br>【土と基礎(1993.6)】                                | 釧路空港         | I   | -         | -   | -    | -   | -        | -   | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -    | -     | -  | -    | II   | ・盛土端部の滑走路に数本の亀裂<br>・盛土部法面に小規模な円弧すべり   |
|                         | 高盛土の地震応答解析<br>【日本地震工学シンポジウム<br>論文集(1998.11)】                         | 釧路空港         | -   | -         | -   | -    | -   | -        | -   | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -    | -     | -  | -    | II   | 滑走路、亀裂、盛土法面、円弧すべり<br>釧路空港高盛土では、地震の影響により、法中及び法先付近の法面に長さ約10m幅約15cmの亀裂が数箇所発生したが、盛土全体の安定、航空機の離発着などには全く影響がなかった。また、動應力測定を目的として、高盛土の合計6箇所に水平・鉛直変位を計測しており、地震により2～3cm程度の残留水平変位が法肩から法先へ向かう方向盛土全体にわたって発生、また、残留鉛直変位としては、法肩付近では10cm程度沈下、逆に法先付近では10cm程度隆起するものとなった。  |
|                         | 防災・安全 安全な国土形成を目指して大震災を踏<br>まえた空港施設の耐震性強化への取り組み 地震に<br>強い滑走路の建設【月刊建設】 | 釧路空港         | -   | -         | -   | -    | -   | -        | -   | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -    | -     | -  | -    | II   | 高盛土、亀裂<br>空港用地の法面が崩壊したが、重大な被害とはなっていない。<br>法面、崩壊   |
| 北海道<br>南西沖地震<br>(1993年) | 防災・安全 安全な国土形成を目指して大震災を踏<br>まえた空港施設の耐震性強化への取り組み 地震に<br>強い滑走路の建設【月刊建設】 | 奥尻空港         | II  | -         | -   | -    | -   | -        | -   | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -    | -     | -  | -    | -    | 基本施設である舗装構造体への被害は、比較的大規模な亀裂や沈下が生じている。<br>舗装構造体、液状化、亀裂、不等沈下  |
| 北海道<br>東方沖地震<br>(1994年) | 1994年北海道東方沖地震における<br>港湾・漁港の被害<br>【土と基礎(1995.4)】                      | 空港被害<br>事例なし | -   | -         | -   | -    | -   | -        | -   | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -    | -     | -  | -    | -    | 釧路空港の延長部の高盛土は釧路沖地震の際に、航空輸送に支障のない程度の局所的なひび割れが法面に生じたが、東方沖地震では他の空港も含めほとんど災害を受けなかった。  |
| 兵庫県南部地震<br>(1995年)      | 1995年兵庫県南部地震による<br>港湾施設等被害報告<br>【港研資料No.857】                         | 大阪国際空港       | I   | -         | I   | -    | -   | -        | -   | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -    | -     | -  | -    | -    | ◆土木施設：滑走路と誘導路に軽微なクラックが多数発生した。クラック幅は数mmのものがほとんどであった。地下道、共同溝等の地下埋設物には被害はみられなかった。<br>◆建築施設：大阪国際空港の建築施設は建造後約30年を経ており、神戸市内で発生したような大きな被害はなかったものの、多少の被害があった。<br>・庁舎：管制塔ペアガラスにクラック発生、5階から8階までの各階の柱、壁、床にクラック発生、消防庁舎、変電所にクラック発生及び屋上防水工破壊<br>・旅客ターミナルビル：外部廻りでは、コンクリートパネルの脱落、外壁の破損、屋上エキスパンション部の破損、ガラスの破損など。内部では、内壁の破損、天井の破損落下、床亀裂、エキスパンション破損、ブレース破断、ガラス破損、シャッター破損など。設備関係では、給水管破損、トイレ、スプリンクラー、同配管より水漏れ、空調用配管破損、吹出口破損、ボアディングブリッジ故障など。<br>◆無線施設：無線機器室内のケーブルラックの一部脱落等があったが、機器本体には被害はなかった。<br>◆航空灯火：進入角指示灯の仰角異常、誘導路中心線灯周辺の舗装剥離、進入路指示灯の不点灯、進入路指示灯基礎コンクリートにクラック、電源設備取付ボルトの破損などの被害があったが、航空機の離着陸に重要な施設は速やかに復旧が行われた。<br>◆機械施設：発電装置の一部に横ずれ等があったが、機器そのものに支障はなかった。空調設備の配管等が変形した。<br>滑走路、誘導路、クラック、航空灯火、舗装剥離 |
|                         |  |              |  |           |  |      |  |          |  |        |      |      |       |          |      |      |       |    |      |      |   |
|                         |  |              | 【土木施設】A滑走路のクラック。滑走路と誘導路に軽微なクラックが多数発生した。クラック幅は数mmのものがほとんどであった。                         |           | 【土木施設】同左  |      | 【建築施設】屋上エキスパンション部の破損(旅客ターミナル)   |          | 【航空灯火】誘導路中心線灯周辺の舗装剥離  |        |      |      |       |          |      |      |       |    |      |      |   |
|                         |  |              | 滑走路、誘導路、クラック  |           | 滑走路、誘導路、クラック  |      | 旅客ターミナル、破損  |          | 航空灯火、誘導路、舗装剥離   |        |      |      |       |          |      |      |       |    |      |      |   |




















例表-1.8 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その6）

| 地震名                | 資料名<br>【出典】   | 空港名  | 空港土木施設被害程度（I～IV） |           |      |      |     |      |        |      |      |       |          |      |       | 被害内容 |      |      |     |   |  |  |  |                                       |  |
|--------------------|---|--|------------------|-----------|------|------|-----|------|--------|------|------|-------|----------|------|-------|------|------|------|-----|---|--|--|--|---------------------------------------|--|
|                    |   |  | 空港の施設            |           |      | 地中施設 |     |      | 橋梁     |      |      | その他   |          |      | 用地    |      |      |      |     |   |  |  |  |                                       |  |
|                    |   |  | 滑走路等             | 誘導路及び誘導路帯 | エプロン | 地下道  | 共同溝 | 排水施設 | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 鉄道橋梁 | 進入灯橋梁 | プラストフェンス | 防音施設 | その他施設 | 護岸   | 道路擁壁 | 鉄道擁壁 | 高盛土 |   |  |  |  |                                       |  |
| 兵庫県南部地震<br>(1995年) | 土木学会 阪神大震災調査緊急報告会資料<br>港湾・空港・河川グループ調査報告<br>【阪神大震災被害調査緊急報告会資料(1995)】 | 関西国際空港   | I                | -         | -    | I    | -   | -    | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -     | II   | II   | -    | -   | 土木関連施設の被害はほとんどなく、滑走路に15本×60m、誘導路に13本×45mの最大幅2mmのクラックが、整備エプロンに0.2mm×100mのヘヤークラック、揚周道路の一部にクラックが入った程度である。また、海上アクセス船の岸壁が少しずれた程度でよく見なければ判別できない程度である。なお、橋梁・軌道系に被害はない。 |                         |   |  |                                       |  |
|                    |   |  |                  |           |      |      |     |      |        |      |      |       |          |      |       |      |      |      |     |   | 【関西国際空港のエプロンのヘヤークラック】 土木関連施設の被害はほとんどなく、滑走路に15本×60m、誘導路に13本×45mの最大幅2mmのクラックが、整備エプロンに0.2mm×100mのヘヤークラックが生じた。 | 【関西国際空港の岸壁の軽微被害】 揚周道路の一部にクラックが入った。   |  |                                       |  |
|                    |   |  |                  |           |      |      |     |      |        |      |      |       |          |      |       |      |      |      |     |   | 滑走路、誘導路、揚周道路、クラック  | 滑走路、誘導路、クラック   | 揚周道路、クラック  |                                       |  |
|                    |   | 「土木構造物の被害原因の分析」<br>「土木構造物の応急復旧、補修、補強」<br>「土木構造物の被害」<br>「交通施設と農業施設の被害と復旧」<br>【阪神・淡路大震災調査報告(1998)】 | 大阪国際空港           | I         | -    | -    | -   | -    | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -     | -    | -    | -    | -   | -   | -  |   |   |                                       |  |
|                    |   |  |                  |           |      |      |     |      |        |      |      |       |          |      |       |      |      |      |     |   |  |  | 【大阪国際空港A滑走路のクラック】 数mm幅のクラックが滑走路を横断している   | 【旅客ターミナルビルエクスパンション部の破損】 ビルとビルのつなぎ目が破損 |  |
|                    |   |  |                  |           |      |      |     |      |        |      |      |       |          |      |       |      |      |      |     |   |  | 滑走路、クラック   | 旅客ターミナル、つなぎ目、破損  |                                       |  |
|                    | 関西国際空港  |  | -                | -         | -    | I    | -   | -    | -      | -    | -    | -     | -        | -    | -     | -    | -    | II   | -   | -   |                        |  |  |                                       |  |
|                    |   |  |                  |           |      |      |     |      |        |      |      |       |          |      |       |      |      |      |     |   |  | 【旅客ターミナルビル前歩道の沈下状況(補修中)】 歩道が約15cm沈下  | 【護岸中央部のクラック(補修後)】 護岸中央部のケーソンとの視目付近にクラックが発生   | 【エプロンのクラック(補修後)】 エプロンに波状にクラックが入っている   |  |
|                    |   |  |                  |           |      |      |     |      |        |      |      |       |          |      |       |      |      |      |     |   |  | 旅客ターミナル、歩道、沈下  | 護岸、クラック  | エプロン、クラック                             |  |

例表-1.9 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その7）

| 地震名                | 資料名<br>【出典】   | 空港名             | 空港土木施設被害程度（I～IV） |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      | 被害内容  |    |      |      |     |  |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|--------------------|---|-----------------|------------------|-----------|------|------|-----|----------|------|--------|------|------|-------|----------|------|-------|----|------|------|-----|--|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|--|
|                    |   |                 | 空港の施設            |           |      | 地中施設 |     |          | 橋梁   |        | その他  |      | 用地    |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 | 滑走路等             | 誘導路及び誘導路帯 | エプロン | 地下道  | 共同溝 | ライフライン施設 | 排水施設 | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 鉄道橋梁 | 進入行橋梁 | プラストフェンス | 防音施設 | その他施設 | 護岸 | 道路擁壁 | 鉄道擁壁 | 高盛土 |  |   |   |   |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
| 鳥取県西部地震<br>(2000年) | 平成12年（2000年）鳥取県西部地震による<br>港湾施設等の被害報告<br>【港研資料No.1015】 | 米子空港<br>(美保飛行場) |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆滑走路：路肩部分に延長1000mにわたり幅5～8cmのクラックが発生。滑走路延長方向に延長100～200mにわたり幅1cmのクラック。滑走路横断方向に幅1cmのクラック4箇所発生。</li> <li>◆誘導路：路肩部分で液状化による盛り上がり、幅3cm程度のクラックが延長30～60mにわたり2箇所発生</li> <li>◆拡張用地護岸：隅角部において5cmの目地の開きが2箇所発生したほか、護岸と場周道路の間に目地の開き、段差が延長400mにわたり発生。拡張用地（着陸帯）に2箇所にわたり噴砂が認められた。</li> <li>◆場周道路：延長400mにわたり沈下が発生するとともに、延長100mにわたりクラックが発生。</li> </ul> | <br>【滑走路路肩部分のクラック】 | <br>【滑走路路肩部分のクラック】 |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   | 滑走路路肩部分、クラック  | 同左  |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | <br>【滑走路路横断方向のクラック】  | <br>【滑走路路肩部分のクラック】 | <br>【護岸目地部開き】 | <br>【護岸と場周道路の段差】 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | 滑走路、クラック  | 噴砂、クラック   | 護岸、目地部開き   | 護岸、場周道路、段差  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | <br>【護岸と場周道路の段差】   | <br>【着陸帯の噴砂】       |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | 護岸、場周道路、段差  | 着陸帯、噴砂  |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | 2000年鳥取県西部地震および<br>2001年芸予地震被害調査WG<br>【コンクリート工学年次論文集(2002.6)】   | 米子空港<br>(美保飛行場)   | I  | -   | - | I | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 米子空港では液状化現象が見られ、滑走路及び平行誘導路等において最大7.5cm程度のひび割れが発生した。  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | 液状化、滑走路、平行誘導路、ひび割れ  |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | 平成12年鳥取県西部地震災害緊急調査連報<br>【土と基礎(2001.1)】  | 米子空港<br>(美保飛行場)   | I  | II  | - | I | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | <p>滑走路に5条の横断亀裂と両側2条の走路方向の亀裂が生じるとともに、オーバーランの部分とその延長上の草地及び誘導路の一部の脇で液状化による噴砂が生じた。突端の防波堤は、背後に8cmの隙間があり、海側にせり出している可能性がある。</p>  |  |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  |   |   |   | <p>【米子空港の誘導路脇に生じた噴砂】 滑走路に5条の横断亀裂と両側2条の走路方向の亀裂が生じるとともに、オーバーランの部分とその延長上の草地及び誘導路の一部の脇で液状化による噴砂が生じた。</p> <p>【米子空港の滑走路突端の防波堤背後の隙間と段差】 突端の防波堤は、背後に8cmの隙間があり、海側にせり出している可能性がある。</p> |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |
|                    |   |                 |                  |           |      |      |     |          |      |        |      |      |       |          |      |       |    |      |      |     |  | 滑走路、亀裂、噴砂、防波堤、せり出し  | クラック、液状化、噴砂   | 防波堤、せり出し  |   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |   |  |



例表-1.10 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その8）

| 地震名                                   | 資料名<br>【出典】  | 空港名               | 空港土木施設被害程度（I～IV） |          |      |      |     |          |      |        |      |       |       | 被害内容     |      |       |    |      |      |     |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------------|--|-------------------|------------------|----------|------|------|-----|----------|------|--------|------|-------|-------|----------|------|-------|----|------|------|-----|---|---|---|---|---|---|
|                                       |  |                   | 空港の施設            |          |      | 地中施設 |     | 橋梁       |      | その他    |      | 用地    |       |          |      |       |    |      |      |     |   |   |   |   |   |   |
|                                       |  |                   | 着陸帯等             | 誘導路及誘導路帯 | エプロン | 地下道  | 共同溝 | ライフランシ施設 | 排水施設 | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 鉄道路橋梁 | 進入付橋梁 | プラストフェンス | 防音施設 | その他施設 | 護岸 | 道路擁壁 | 鉄道擁壁 | 高盛土 |   |   |   |   |   |   |
| 鳥取県西部地震<br>(2000年)<br>芸予地震<br>(2001年) | 電子基準点を利用する防災DGIS<br>(動的地理情報システム)<br>鳥取県西部地震・芸予地震の前兆と被害<br>【先端測量技術 No.8(2001.11)】 | 空港被害<br>事例なし      | -                | -        | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | -    | -   | - | 記載事例なし  |   |   |   |   |
| 芸予地震<br>(2001年)                       | NHK地震関連ニュース  | 松山空港              | -                | II       | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | -    | -   | - | 液状化の現象が確認されたのは松山空港のエプロンに近い「着陸帯」と呼ばれる草地の部分で、液状化は2箇所それぞれ、幅3m長さ7m、幅50cm、長さ1mにわたって、砂が吹き出していた。この液状化は以前の陸地と新しく埋め立てられた部分の境目付近で起きていて、この境目では、地震の揺れの伝わり方が変化した衝撃で、元々緩かった砂の地盤が地表に吹き出したのではないかと分析している。  |   |   |   |   |
|                                       | 愛媛大学芸予地震学術調査団報告書<br>【愛媛大学HP】   | 松山空港              | -                | II       | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | -    | -   | - | 松山空港では点検用の通路と裸地との境界で液状化による噴砂が生じた。写真に液状化による噴砂の広がりを示す。噴砂は3箇所確認されたが、点検用通路脇の裸地での噴砂であり、滑走路、誘導路、道路などに被害はなかった。埋立て部周辺の護岸や背後の道路には軽微な亀裂が見られた。液深理立による造成で、液状化地点は埋立境界（旧海岸線）付近で生じた。境界を挟んで常時微動測定を実施したところ、大きく異なることはないが埋立地側が卓越周期がやや長かった。現状では空港機能には問題ないと考えられるが、影響を詳細に検討する必要がある。   |    | 【松山空港における液状化の様子】点検用の通路と裸地との境界で液状化による噴砂が生じた。   |   |   |
| 十勝沖地震<br>(2003年)                      | 平成15年（2003年）十勝沖地震被害に係わる<br>現地調査報告書<br>【国総研資料No.233】                              | 釧路空港              | -                | -        | -    | -    | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | -    | -   | - | 空港ターミナルビル・釧路空港管制塔などの<br>天井が落下した。  |    |  | 【空港ターミナルビルの地震直後の状況】吹抜けとなっている出発ロビー部分の天井650㎡(36m×18m)のうち、約1/2に当たる約300㎡の天井材及び野縁が落下した     | 【釧路空港管制塔最上階(管制室)の地震直後の状況】管制室の天井全体が落下した。天井材、野縁(一部、野縁受け)及びグラスウールが管制室全体に散乱している |
|                                       |  | 能登半島地震<br>(2007年) | 能登空港             | I        | -    | I    | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | -    | -   | - | ◆地震により滑走路に発生した横断方向のクラック14箇所のうち、主要なものは5箇所であり工事記録と照合すると切盛境に発生していた。縦断方向のクラックは主に施工目地が開く形で発生しており、さらに縦断方向に2～3mm程度のずれが生じていた。横断方向のクラックで最大幅2cm、段差2cmと報告された箇所があったが、補修工事前の点検では開き・段差とも解消されていた。補修段階では、クラック最大幅1.5cm、最大段差1.5cmであった。断定はできないが、余震により再度動いたためと判定された。<br>◆また、縦横断測量結果からは、滑走路センターで最大7cmの沈下量が確認された（平成18年8月測量結果との比較）。この位置は、ほぼ最大盛土厚30mの位置にあたる。測量結果からは、縦横断とも規定の勾配を満足していることがわかった。 |  | 【能登空港滑走路クラック】左が発生クラック、右が応急復旧による補修   |  | 【能登空港切盛図】着色部が盛土部分   |
|                                       |  |                   |                  |          |      |      |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |   | 空港ターミナル、天井、落下   | 空港ターミナル、天井、落下   | 管制室、天井、落下   | 滑走路、誘導路、亀裂、段差   | クラック、段差   |

例表-1.11 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その9）

| 地震名               | 資料名<br>【出典】  | 空港名  | 空港土木施設被害程度（I～IV）                         |           |      |     |      |        |      |       |          |      |     |    |     |   | 被害内容 |   |   |  |
|-------------------|--|------|--|-----------|------|-----|------|--------|------|-------|----------|------|-----|----|-----|---|------|---|---|--|
|                   |  |      | 空港の施設                                    | 滑走路及び誘導路帯 | エプロン | 共同溝 | 排水施設 | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 進入灯橋梁 | プラストフェンス | 誘導標識 | その他 | 用地 | 高盛土 |   |      |   |   |  |
| 東北地方太平洋沖地震（2011年） | <ul style="list-style-type: none"> <li>平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震による仙台空港の舗装に関する被害報告【国総研資料No.680】</li> <li>2011年東日本大震災に対する国土技術政策総合研究所の取り組み【国総研報告No.52】</li> </ul> ※記載内容は同じ | 仙台空港 | I  | II        | I    | IV  | -    | -      | -    | -     | -        | -    | -   | -  | -   | - | -    | - | - | <p>◆滑走路：B滑走路の目視調査では、計12本のひび割れが確認された。ひび割れ幅は最大で5mm程度、段差は最大で5mm程度であり、航空機の走行の支障になると考えられるひび割れは確認されなかった。また、ほとんどのひび割れは滑走路全幅にわたって横断方向に貫通していた。ひび割れ部3か所においてコアボーリングを実施したところ、どのコアにおいてもひび割れはアスファルト混合物層(表層、基層、アスファルト安定処理上層路盤)を貫通していることが確認された。空港の地下を南北に縦断する県道とB滑走路が交差する箇所、木曳堀とB滑走路が交差する箇所については、地震発生前から液状化の発生が予測されていたため地盤改良が実施済みであり、段差や局所沈下など、平坦性が悪化している箇所は確認されなかった。</p> <p>◆誘導路：平行誘導路及び取付誘導路の目視調査では、平行誘導路で計11本のひび割れが確認された。ひび割れ幅は最大で3mm程度であり、いずれのひび割れにおいても段差は確認されなかった。また、ほとんどのひび割れは誘導路全幅にわたって横断方向に貫通していた。目視調査では①平行誘導路最西のC1誘導路、②空港の地下を南北に縦断する県道と平行誘導路が交差する箇所、③木曳堀と平行誘導路が交差する箇所において沈下が確認された。これらは、地震発生前から液状化の発生が予測されていた箇所であり、地盤改良が順次実施されていたが、地震発生時点で、未改良であった箇所において局所沈下が発生したと考えられた。県道周辺部では、県道のボックスカルバートに沿って局所的に沈下していた。沈下形状は未計測であるものの、沈下の幅はボックスカルバートの両側とも5m程度、沈下の深さはショルダーで、数十cm程度であった。</p> <p>◆エプロン：エプロンは無筋コンクリート舗装(エプロン誘導路の一部はPPC舗装)であり、路盤の設計支持力係数は70MN/m<sup>2</sup>、コンクリート版厚は42cmである。エプロンの目視調査を実施したところ、東側の1番、2番、3番スポットにおいて多数のひび割れ及び局所沈下が確認された。エプロンでは、15列と16列の版の目地を境としてターミナル側及びB滑走路側に向けてそれぞれ10.5%の下り勾配が確保されていたが、1番スポット東側付近、2番スポット中心線付近及び2番スポットと3番スポットの中間において大きく沈下していた。エプロンに発生したひび割れの幅は最大で3mm程度であり、いずれのひび割れにおいても段差は確認されなかった。また、コンクリート舗装の目地についても段差は確認されなかった。これらのひび割れは局所沈下部周辺に集中していたことから、地震動により発生したのではなく、地盤が液状化し、版が大きく局所沈下したことに起因して発生したと考えられた。</p> |
|                   |  |      | 滑走路、ひび割れ、段差、誘導路、ひび割れ、沈下、エプロン、ひび割れ、沈下、液状化 |           |      |     |      |        |      |       |          |      |     |    |     |   |      |   |   |  |
|                   |  |      | <p>仙台空港全体図と舗装に関する被災状況</p>                |           |      |     |      |        |      |       |          |      |     |    |     |   |      |   |   |  |

例表-1.12 地震による空港施設の被害程度及び被害内容（その10）

| 地震名   | 資料名<br>【出典】  | 空港名  | 空港土木施設被害程度（I～IV）   |           |      |  |     |          |      |        |      |       |       | 被害内容     |      |       |    |      |      |     |  |
|---|--|------|--|-----------|------|--|-----|----------|------|--------|------|-------|-------|----------|------|-------|----|------|------|-----|--|
|   |  |      | 空港の施設  |           |      | 地中施設   |     | 橋梁       |      | その他    |      | 用地    |       |          |      |       |    |      |      |     |  |
|   |  |      | 滑走路等   | 誘導路及び誘導路帯 | エプロン | 地下道  | 共同溝 | ライフライン施設 | 排水施設 | 消防水利施設 | 道路橋梁 | 鉄道路橋梁 | 進入灯橋梁 | プラストフェンス | 防音施設 | その他施設 | 護岸 | 道路擁壁 | 鉄道擁壁 | 高盛土 |  |
| 東北地方太平洋沖地震<br>(2011年)   | 東日本大震災と仙台空港の復旧<br>【予防時報 249号】                      | 仙台空港 | I  | II        | I    | IV   | IV  | I        | -    | I      | I    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | II   | -   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>◆空港基本施設（滑走路・誘導路・エプロン等）                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・空港内全域に土砂・瓦礫・自動車等が散乱</li> <li>・一部エリアの冠水</li> <li>・舗装のひび割れ発生</li> <li>・液状化による陥没（宮城県道地下道横断部）</li> <li>・規定勾配を超える舗装沈下等</li> <li>・空港側面を囲む塙周柵の倒壊</li> </ul> </li> <li>◆ライフライン                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・東北電力の商用電源の停電</li> <li>・バックアップ用の非常用発電設備の水没</li> <li>・空港事務所の給水ポンプ設備の水没</li> <li>・電話等通信設備が水没により不通</li> </ul> </li> <li>◆ターミナル地区                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・空港構内道路全域に土砂、瓦礫等が散乱</li> <li>・道路案内標識等安全施設の一部損傷</li> <li>・雨水排水溝の一部破損</li> <li>・歩道の一部沈下</li> </ul> </li> <li>◆アクセス施設                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・仙台空港アクセス鉄道トンネルの水没</li> <li>・宮城県道空港線（仙台空港トンネル）の水没</li> </ul> </li> </ul> |  |      |  |           |      |  |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |  |
| 基本施設、ひび割れ、液状化、陥没、沈下、ライフライン、水没、ターミナル地区、損傷、沈下、アクセス施設、水没   |  |      |  |           |      |  |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |  |
| 熊本地震<br>(2016年)   | 平成28年（2016年）熊本地震による<br>港湾施設等被害報告<br>【国総研資料No.1042】 | 熊本空港 | I  | -         | I    | I  | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | -    | -   |  |
|   |  |      |             |           |      |                                       |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |  |
| <p>【滑走路25端部に生じたひび割れ】滑走路25端部では4箇所ひび割れが確認され、一部は施工目地が開いたものであった。最大ひび割れ幅は2cm程度、3箇所ひび割れはアスファルト混合物層（厚さ27cm程度）を貫通していた。</p>  |  |      | <p>【誘導路T6部に生じたひび割れ】誘導路T6部では2箇所ひび割れが確認され、最大ひび割れ幅は1cm程度、1箇所のひび割れはアスファルト混合物（厚さ34cm程度）を貫通していた。</p> |           |      | <p>【GSE通行帯近傍のエプロンに生じたひび割れと段差】エプロン部では2箇所ひび割れが確認され、最大ひび割れ幅2cm程度、コンクリート版（厚さ23cm程度）を貫通していた。アスファルト舗装部のひび割れ部では若干の段差が確認された。</p> |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |  |
| 滑走路、ひび割れ、目地部開き  |  |      | 誘導路、ひび割れ   |           |      | エプロン、ひび割れ、段差   |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |  |
| 平成28年（2016年）熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について<br>(4月17日12:00現在)<br>【内閣府HP】  |  | 熊本空港 | -  | -         | -    | -  | -   | -        | -    | -      | -    | -     | -     | -        | -    | -     | -  | -    | -    | -   |  |
| ターミナルビルでは天井部分崩落、水漏れ、保安区域の柱にクラック等が発生した。  |  |      |  |           |      |  |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |  |
| ターミナルビル、天井、崩落、クラック  |  |      |  |           |      |  |     |          |      |        |      |       |       |          |      |       |    |      |      |     |  |











## 例-2 入力地震動の設定事例

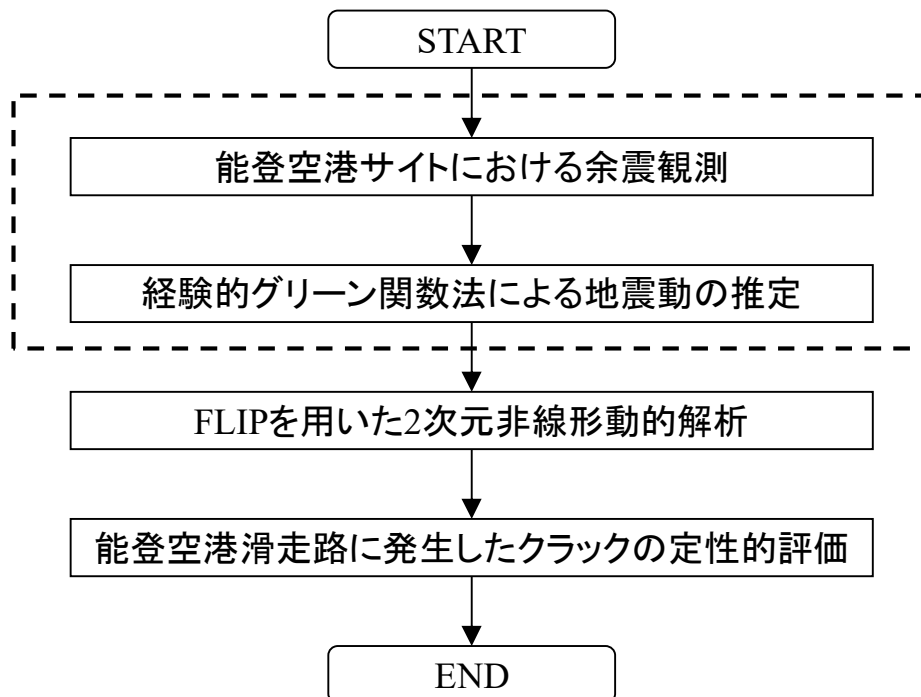
耐震設計における要件の一つである（入力）地震動について、限られた条件下のもとでの1つのアプローチとして実施された能登空港での入力地震動の設定の事例を示す。

### 2.1 概要

2007年3月25日に能登半島地震(M6.9)が発生し、能登空港においては当日供用が停止したが、翌日の3月26日には供用を再会した。空港施設は大規模な地震災害時において救援・救助・物資輸送の拠点としての役割が期待されている。

検討では、地震発生後に設置された余震観測に基づき、経験的グリーン関数法による能登空港内における本震予測波に対し、滑走路横断面方向におけるFLIPを用いた2次元非線形動的解析を実施することによって、能登空港滑走路において発生したクラックの原因の定性的な評価を例図-2.1に示す概略フローにて実施している。

このうち、本資料では破線枠の部分を実例として示す。



例図-2.1 概略フロー

## 2.2 能登空港内推定本震波形

### 2.2.1 断層モデルパラメータの設定

#### (1) 空港内での余震観測

能登半島地震後に能登空港に地震計を設置し、地震観測を行った。

空港敷地内の地震観測は、施設管理者が地震情報を取得するのみでなく、空港耐震性評価のための基礎資料取得に供するものである。観測された地震観測データは、震源からの地震動の伝搬特性を含んだ貴重な資料であり、基礎データの蓄積に基づいて、本震の再現及び設計へのフィードバック等に帰することが可能となる。

地震計（振動センサー）の種類としては、現地の立地条件を考慮してボアホールタイプのサーボ型加速度計を選定した。

地震観測システムは、空港敷地内に仮設のボックスを設置し、無停電装置を経由してボックス内収録装置 MO に地震記録を蓄積するシステムである。

地震計の設置期間は3ヶ月間とし、月1回の定期点検及びデータ回収を実施することによって継続監視した。

#### (2) 余震観測結果と要素地震の選定

例図-2.2 は 2007 年能登半島地震の断層モデル（暫定）に対して本震メカニズムとその震央を加筆したものである。同図中には、能登空港で観測された主要な余震の震央とその地震メカニズムについても示している。要素地震の候補とした地震は、以下の3つである。

①要素地震Ⅰ：2007年4月6日の地震(M4.3)

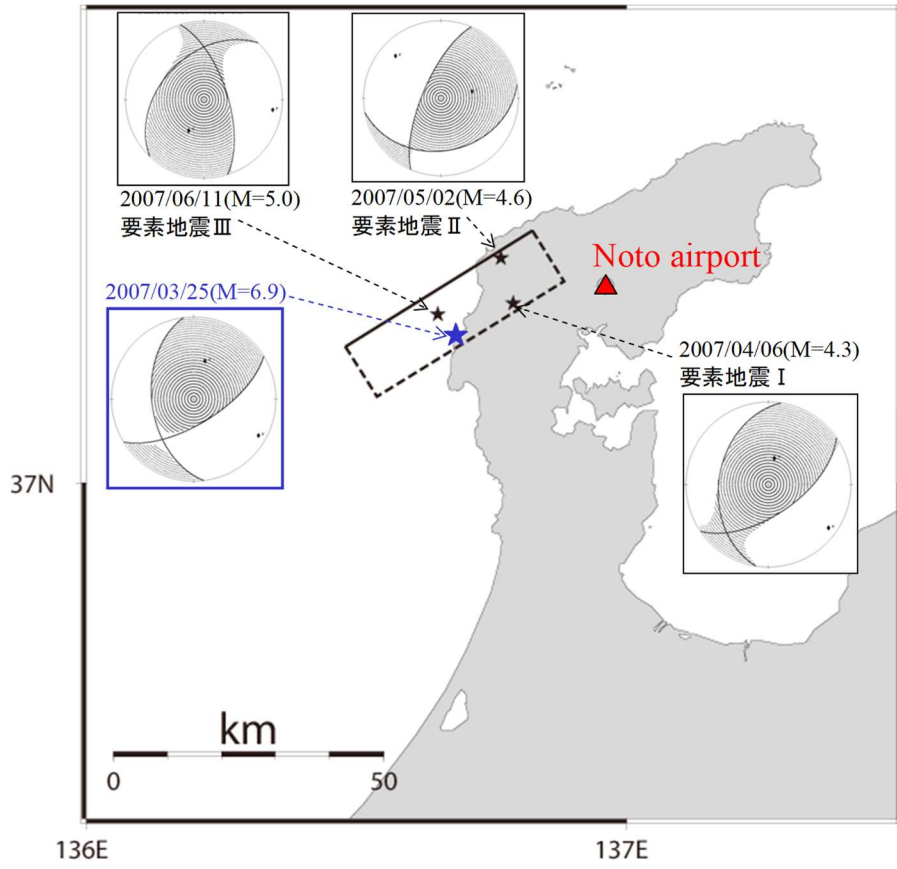
②要素地震Ⅱ：2007年5月2日の地震(M4.6)

③要素地震Ⅲ：2007年6月11日の地震(M5.0)

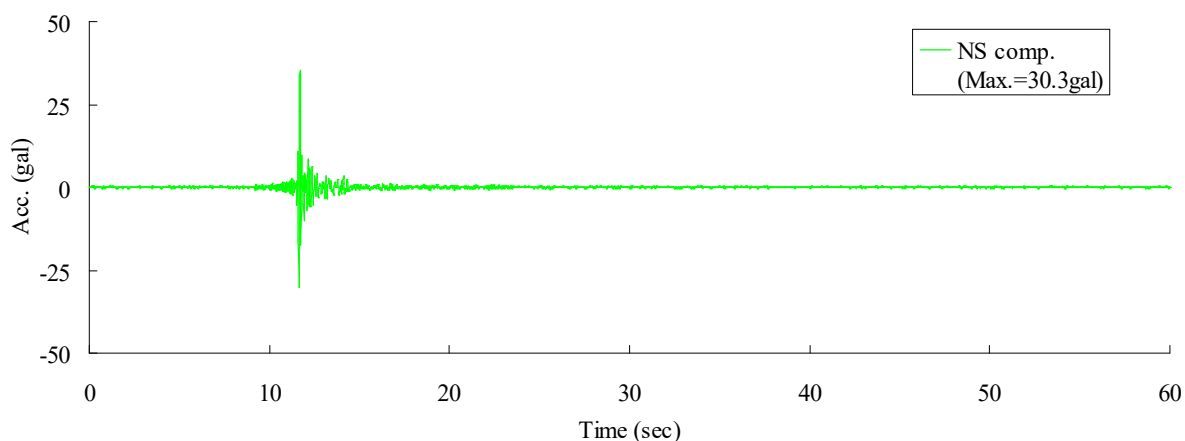
能登空港で観測された余震の加速度時刻歴（例図-2.3～例図-2.5）及びそのフーリエスペクトル（例図-2.6）をそれぞれ示す。

これらの図より本震のメカニズムと最も類似している要素地震候補は、要素地震Ⅰであるものの、地震規模マグニチュードは候補の中で最も小さい。また要素地震Ⅰ及び要素地震Ⅱの震央位置は、本震の震央位置と比べて比較的離れている。

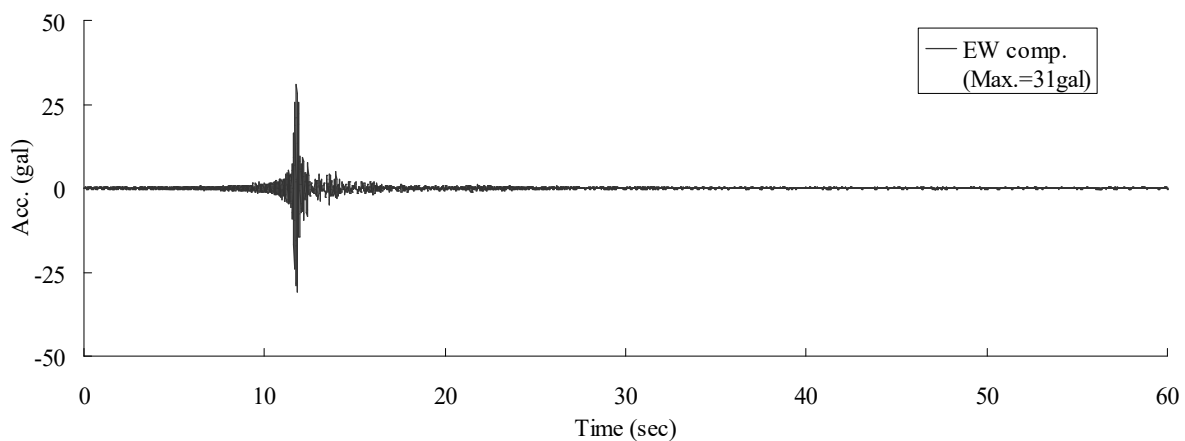
検討では、要素地震Ⅲ(2007年6月11日の地震(M5.0))を経験的グリーン関数法における要素地震として採用した。その理由としては、本震と若干地震メカニズムが異なるものの、本震の震源との距離が最も近く、地震規模マグニチュードや地震モーメントも要素地震の中では最大となっており、経験的グリーン関数法における重ね合わせ数が少なくなることを考慮したためである。また要素地震Ⅲは、観測波のフーリエスペクトルからわかるように、特定の周波数領域でスペクトルが卓越しているのではなく、いずれの周波数に対しても一様に卓越していることについても勘案した。



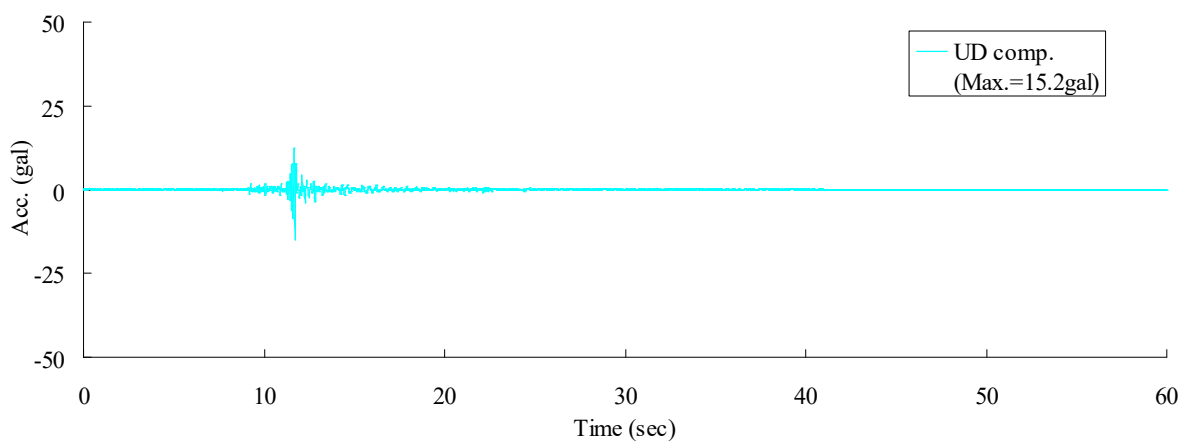
例図-2.2 要素地震の選定



(a) 2007年4月6日の地震：NS成分

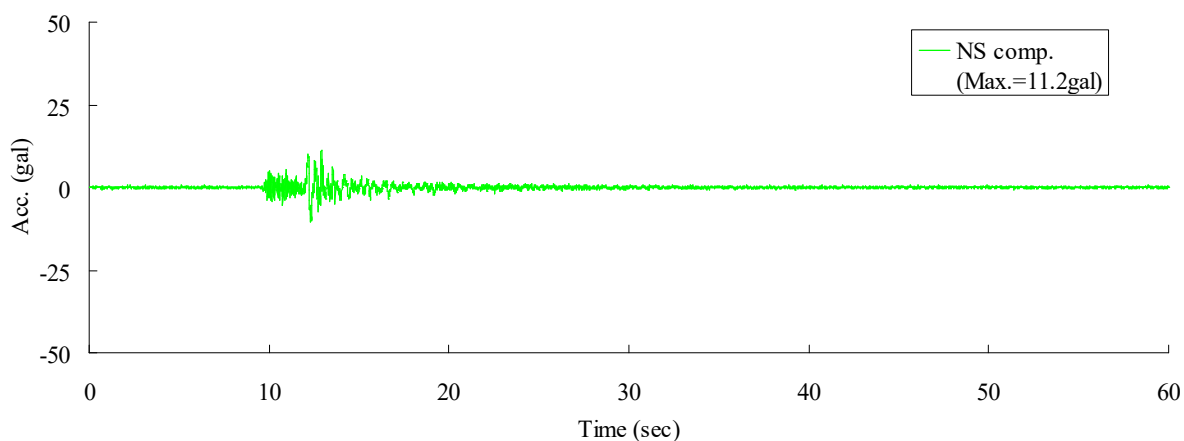


(b) 2007年4月6日の地震：EW成分

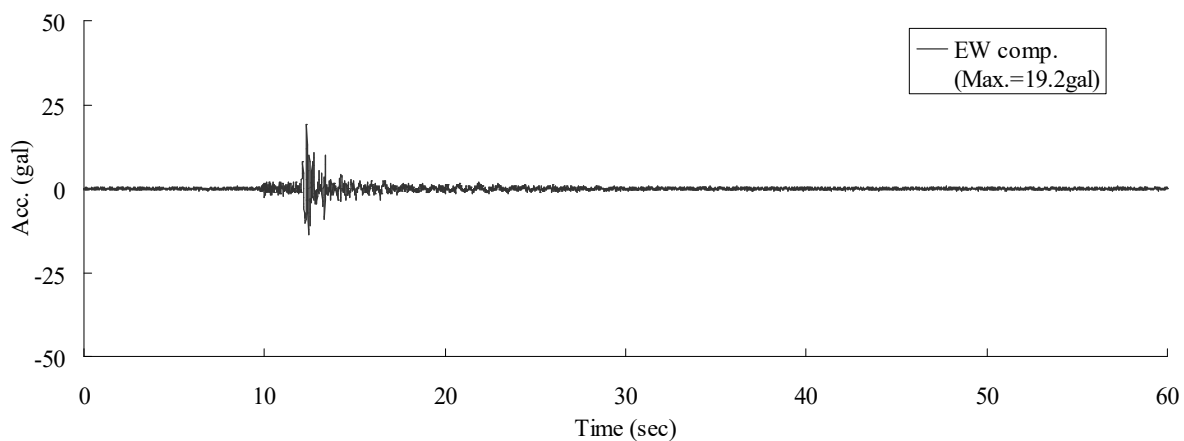


(c) 2007年4月6日の地震：UD成分

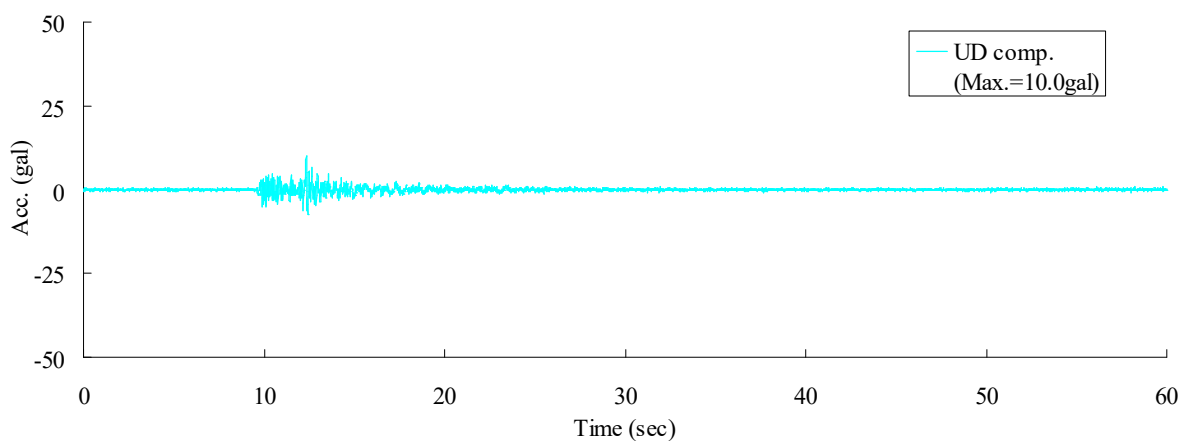
例図-2.3 能登空港で観測された余震の加速度時刻歴



(a) 2007年5月2日の地震：NS成分

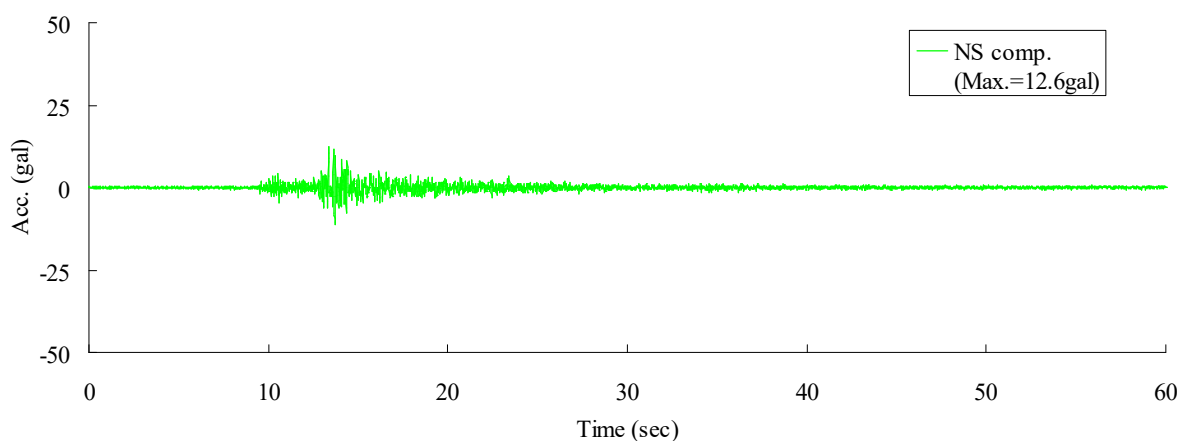


(b) 2007年5月2日の地震：EW成分

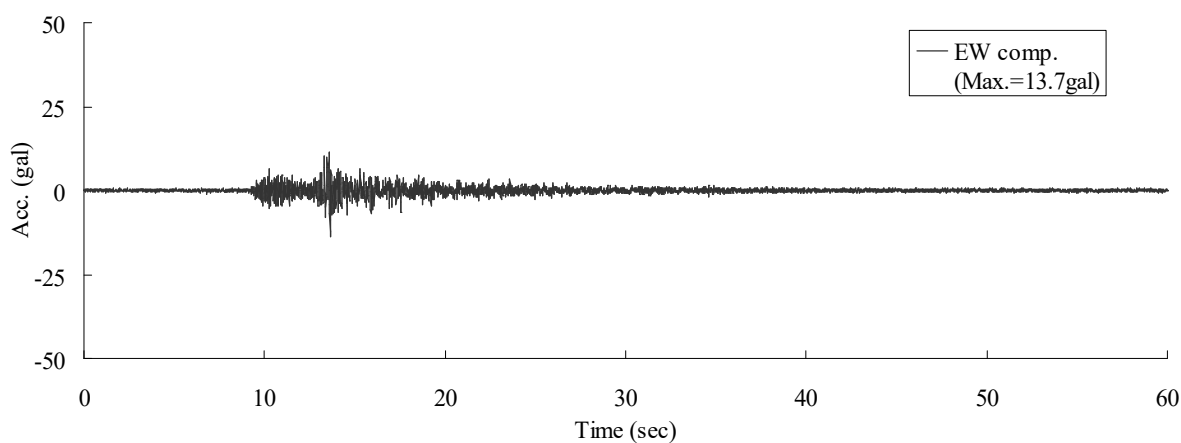


(c) 2007年5月2日の地震：UD成分

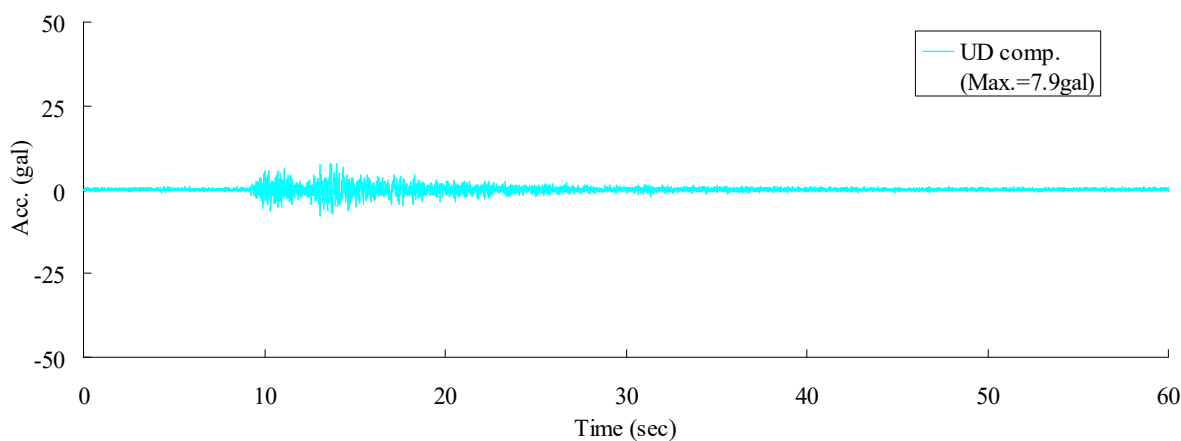
例図-2.4 能登空港で観測された余震の加速度時刻歴



(a) 2007年6月11日の地震：NS成分

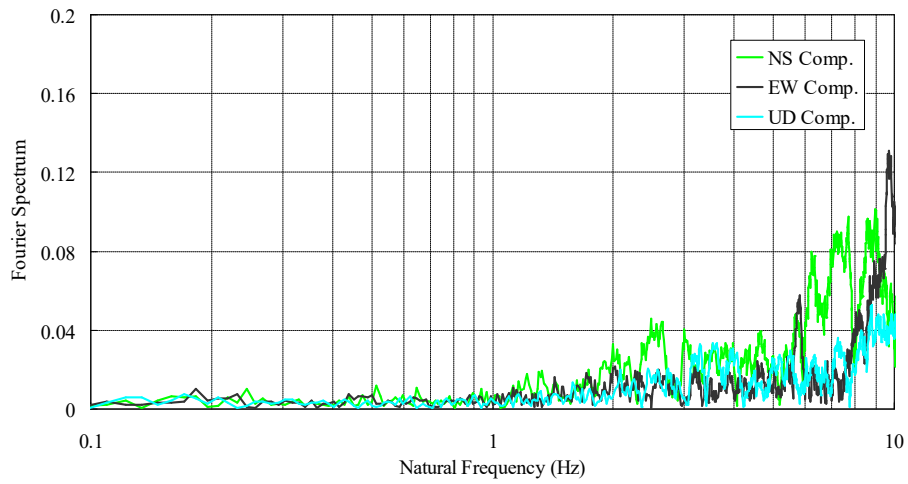


(b) 2007年6月11日の地震：EW成分

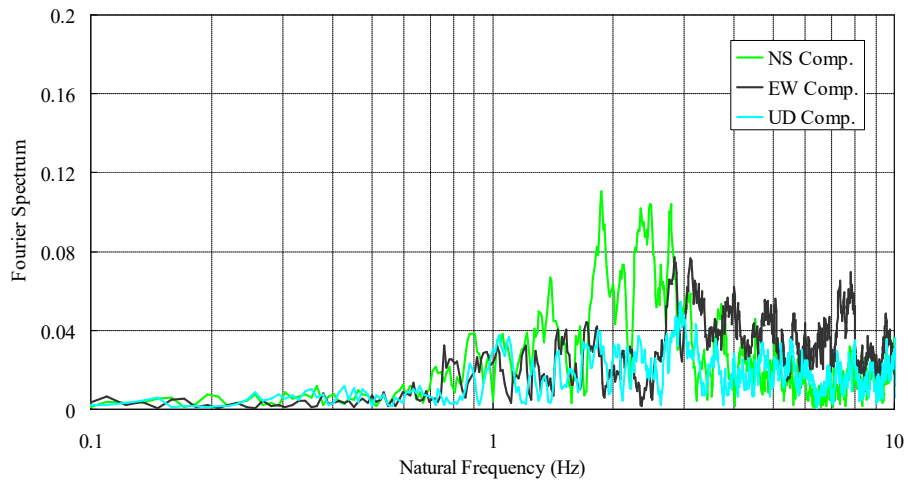


(c) 2007年6月11日の地震：UD成分

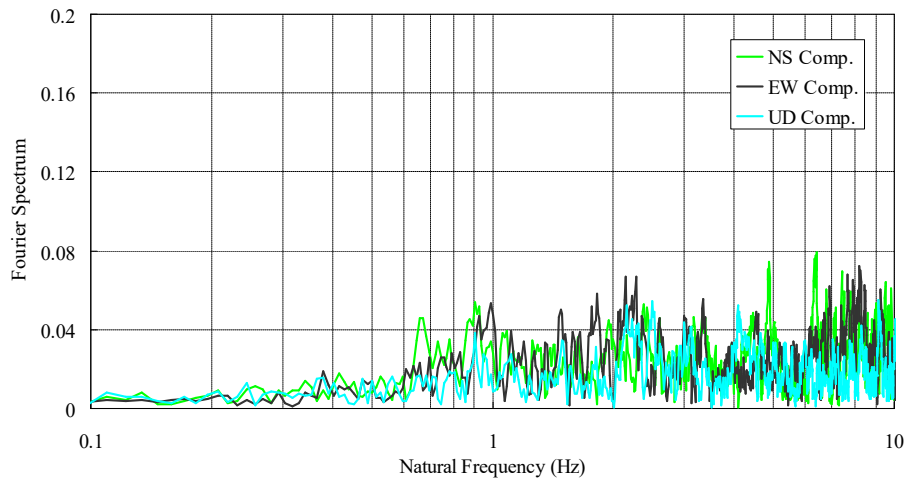
例図-2.5 能登空港で観測された余震の加速度時刻歴



(a) 2007年4月6日の地震



(b) 2007年5月2日の地震



(c) 2007年6月11日の地震

例図-2.6 能登空港で観測された余震の加速度フーリエスペクトル

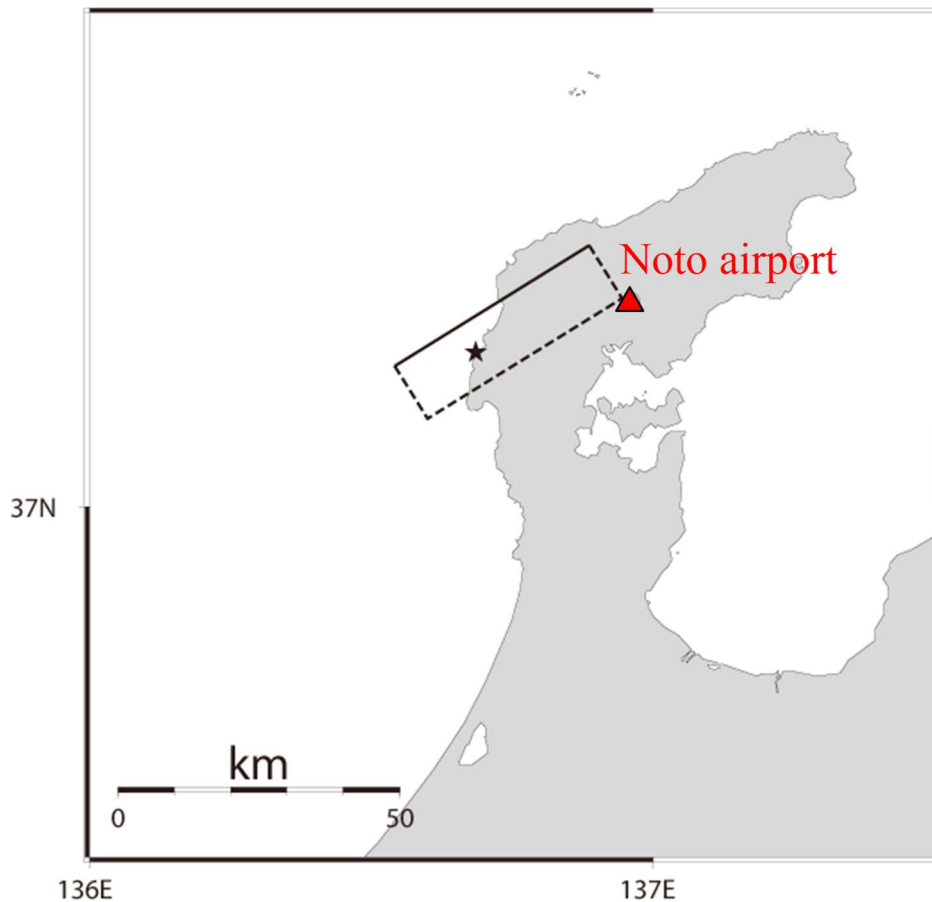


### (3) 断層パラメータの設定

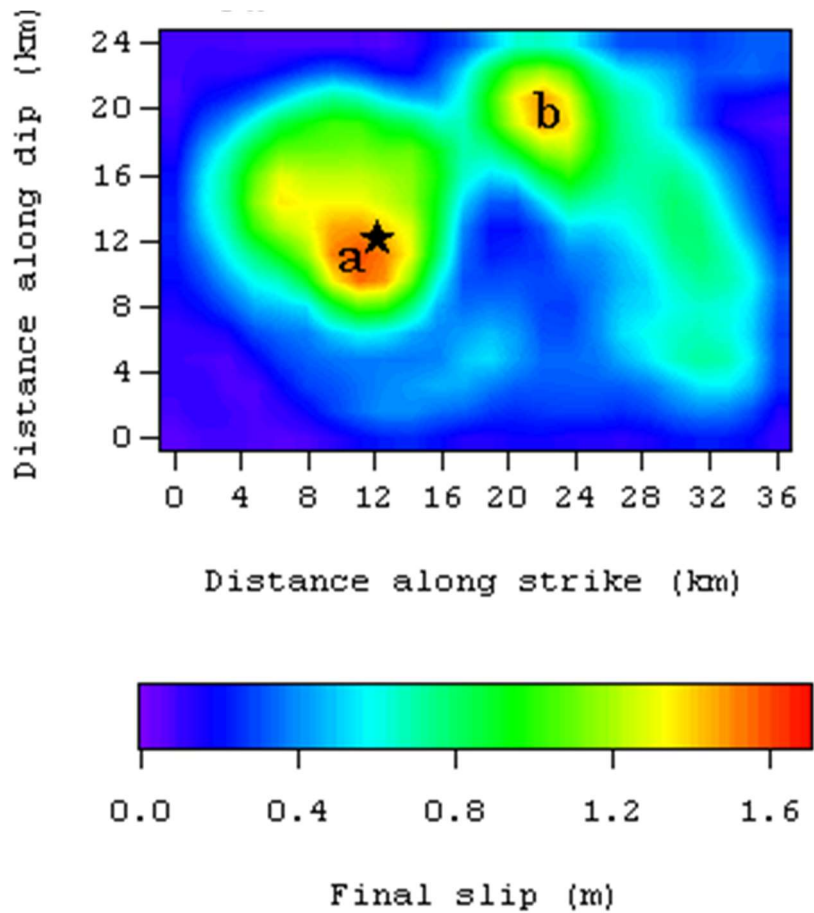
例図-2.7 は使用する断層モデルの平面図である。検討では野津りによる断層モデル(第二版)を採用した。例図-2.8 は野津りにより求められた断層モデル内のすべり変位の分布(第二版)である。本検討では、例図-2.8 のすべり変位の分布に基づいてアスペリティの位置を例図-2.9 に示すとおり設定した。採用断層モデルにおいては、計3つのアスペリティを設定し、アスペリティ面積は、断層面積の2割程度を目安とした。

例表-2.1 は設定した断層モデルパラメータの一覧である。巨視的断層パラメータ、微視的断層パラメータ、その他の断層パラメータともに野津りによる断層パラメータを基本として設定している。ただし、ライズタイムに関しては片岡ほか<sup>2)</sup>に基づいて設定した。なお、断層の破壊の伝播は、放射状に広がるものと仮定した。

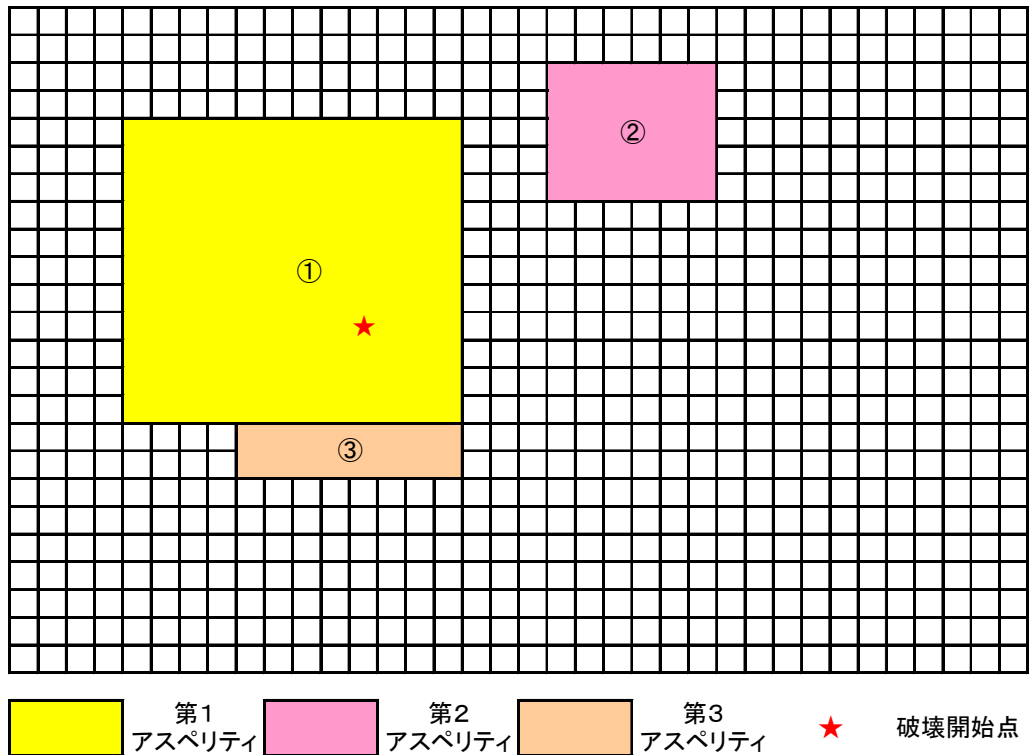
例表-2.2 は経験的グリーン関数法における要素地震(小地震)の重ね合せ条件を一覧にしたものである。重ね合せ数に関しては、重ね合せ数に関しては相似則を満足し、3方向の重ね合せ数がほぼ同等になるよう試行錯誤の結果設定した。



例図-2.7 2007年能登半島地震の断層モデル



例図-2.8 2007年能登半島地震の断層モデルのすべり変位の分布



例図-2.9 断層モデルにおけるアスぺリティの分布

例表-2.1 設定した断層モデルパラメーター一覧

|              |                         |                        |                       |
|--------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 巨視的断層パラメーター  | 断層位置 (北東上端)             |                        | N37.3711, E136.8865   |
|              | 断層長さ (km)               |                        | 36                    |
|              | 断層幅 (km)                |                        | 24                    |
|              | 断層面積 (km <sup>2</sup> ) |                        | 864                   |
|              | 走向 (deg.)               |                        | 58                    |
|              | 傾斜 (deg.)               |                        | 66                    |
|              | 気象庁マグニチュード              |                        | 6.9                   |
|              | 地震モーメント (N・m)           |                        | 1.39×10 <sup>19</sup> |
| 微視的断層パラメーター  | アスペリテイ                  | 個数                     | 3                     |
|              |                         | 地震モーメント (N・m)          | 5.55×10 <sup>18</sup> |
|              |                         | 面積 (km <sup>2</sup> )  | ①132, ②30, ③16        |
|              |                         | 総面積 (km <sup>2</sup> ) | 178                   |
|              | 背景領域                    | ライズタイム (sec)           | ①0.77, ②0.35, ③0.14   |
|              |                         | 総面積 (km <sup>2</sup> ) | 686                   |
|              |                         | 地震モーメント (N・m)          | 8.05×10 <sup>18</sup> |
| その他の断層パラメーター | 破壊開始点位置                 |                        | N37.220, E136.685     |
|              | 破壊開始点深さ (km)            |                        | 11                    |
|              | 破壊伝播方向                  |                        | 破壊開始点より放射状            |
|              | 破壊伝播速度 (km/sec)         |                        | 3.55                  |

※ライズタイムは片岡ほか<sup>2)</sup>を参考に設定

※破壊の伝播は放射状に広がるものと仮定

例表-2.2 小地震の重ね合せ条件一覧

| アスペリテイ<br>又は<br>背景領域 |   | 長さ<br>(km) | 幅<br>(km) | 重ね合わせ数 |   |     | 応力降下量の<br>比率 | 合成地震<br>モーメント<br>(N・m) |
|----------------------|---|------------|-----------|--------|---|-----|--------------|------------------------|
|                      |   |            |           | 長さ     | 幅 | すべり |              |                        |
| アスペリテイ               | ① | 12         | 11        | 3      | 3 | 4   | 5.98         | 4.392E+18              |
|                      | ② | 6          | 5         | 2      | 2 | 2   | 5.98         | 9.759E+17              |
|                      | ③ | 8          | 2         | 1      | 1 | 1   | 5.98         | 1.220E+17              |
| 背景領域                 |   | 36         | 24        | 8      | 8 | 8   | 0.84         | 8.774E+18              |
| 重ね合わせ合成地震モーメント (N・m) |   |            |           |        |   |     |              | 1.426E+19              |
| 本震の地震モーメント (N・m)     |   |            |           |        |   |     |              | 1.426E+19              |

### 2.2.2 キャリブレーション

設定した断層モデルの適用性について検討するために、能登空港周辺の強震観測点において観測された要素地震波を用いて、経験的グリーン関数法により本震の地震動を推定することによって、実際の観測波形との比較検討を行う。

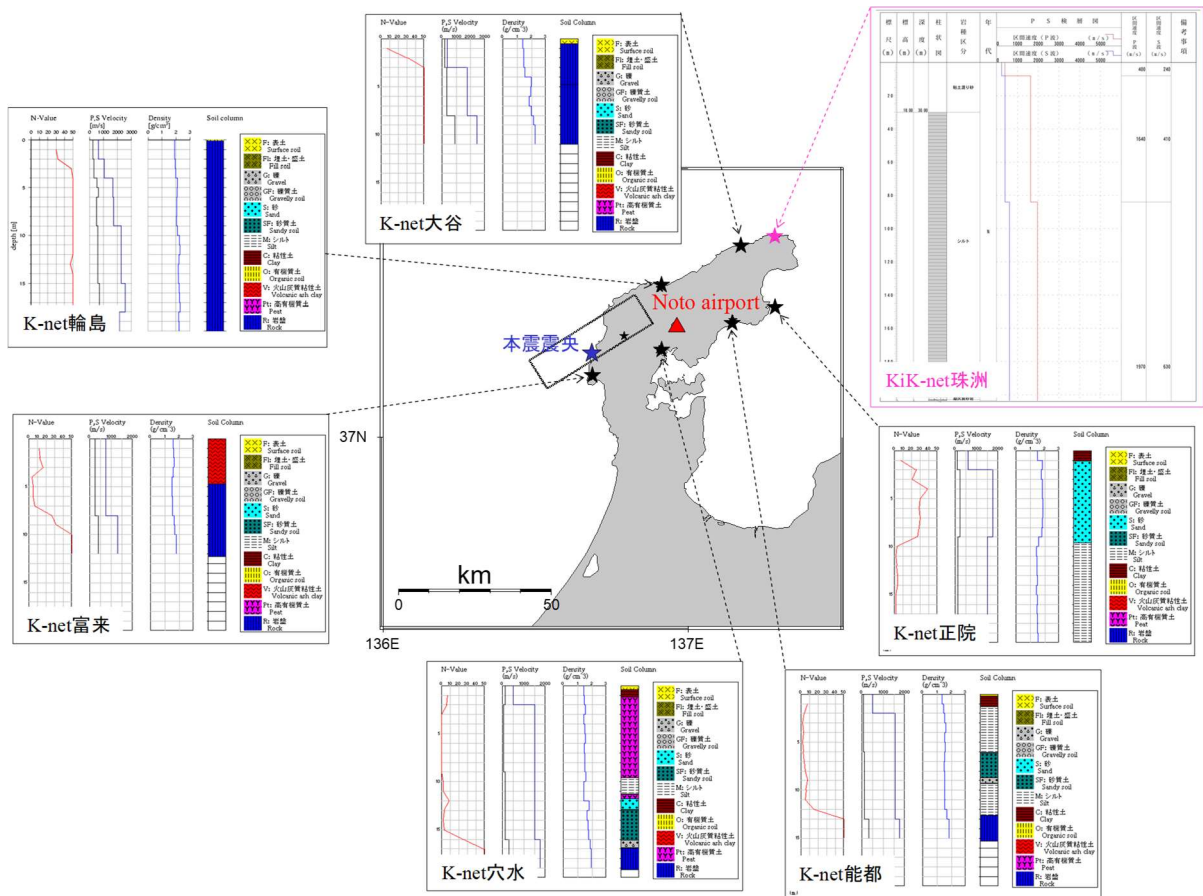
**例図-2.10** に能登空港周辺の強震観測点の分布と地盤柱状図を示す。

**例表-2.3** には、能登空港周辺の強震観測点の緯度経度と能登空港からの最短距離の一覧を示す。

これらの図表より能登空港サイトから最も近いのは、K-net 穴水である。しかしながら K-net 穴水は、軟弱地盤が厚く堆積しており、強震時における地盤非線形の影響を強く受けていると考えられるため、ここでは K-net 穴水に次いで能登空港サイトに近く、さらに岩盤上に位置する K-net 輪島を比較検討対象として選定した。

**例図-2.11** に K-net 輪島における観測波形と経験的グリーン関数法による推定波形の加速度時刻歴を重ね合せたものを示す。この図より、推定波形では主要動後のスパイク状の比較的長周期の波の再現性が劣るものの、両者の加速度振幅や波形形状は NS 成分及び EW 成分ともに概ね類似する傾向にある。

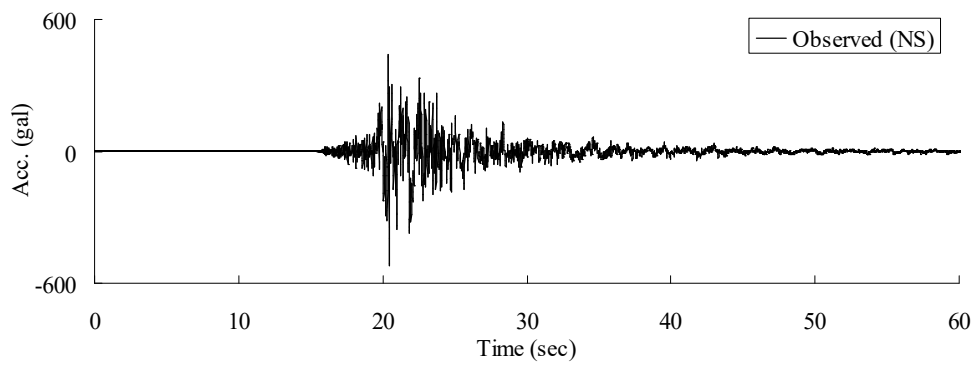
よって、検討で設定した断層モデルを使用すれば、2007 年能登半島地震の本震の地震動を比較的良好に推定できる可能性が高いものと考えられる。



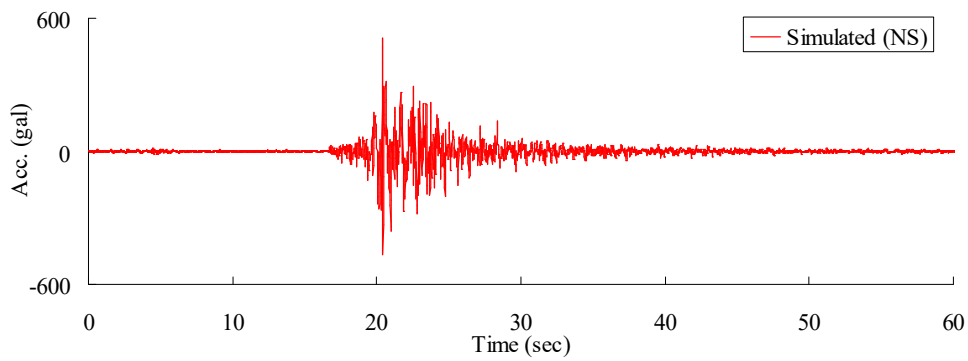
例図-2.10 能登空港周辺の強震観測点の分布

例表-2.3 能登空港周辺の強震観測点一覧

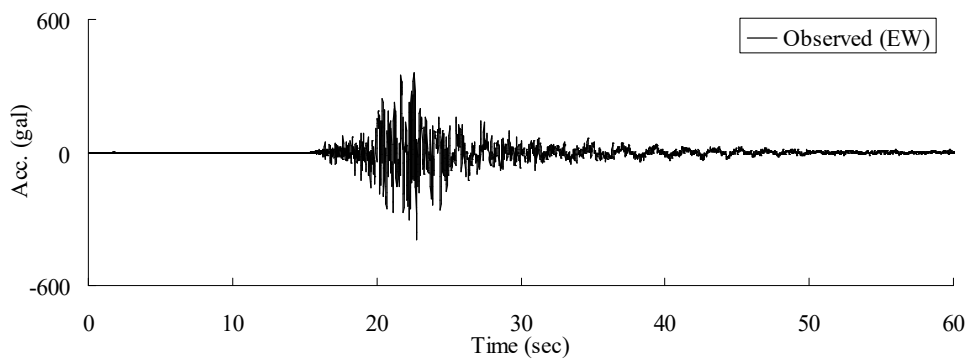
|   | 観測点名称      | 観測点位置     |           | 能登空港地震計位置からの最短距離 (km) |
|---|------------|-----------|-----------|-----------------------|
|   |            | 緯度 (deg.) | 経度 (deg.) |                       |
| 1 | K-net 大谷   | 37.4999   | 137.1764  | 29.466                |
| 2 | K-net 正院   | 37.3443   | 137.2877  | 33.156                |
| 3 | K-net 輪島   | 37.3919   | 136.9083  | 11.483                |
| 4 | K-net 能都   | 37.3080   | 137.1470  | 16.491                |
| 5 | K-net 穴水   | 37.2307   | 136.9039  | 8.963                 |
| 6 | K-net 富来   | 37.1602   | 136.6897  | 28.429                |
| 7 | KiK-net 珠洲 | 37.5236   | 137.2875  | 38.246                |



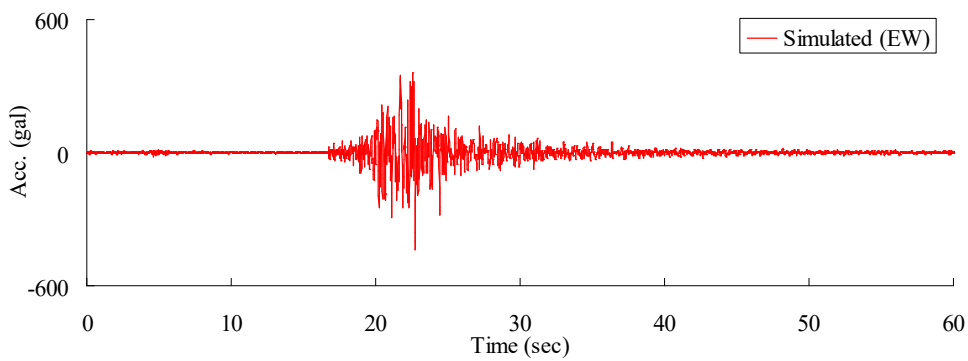
(a) 観測波 (NS 成分)



(b) 推定波 (NS 成分)



(c) 観測波 (EW 成分)



(d) 推定波 (EW 成分)

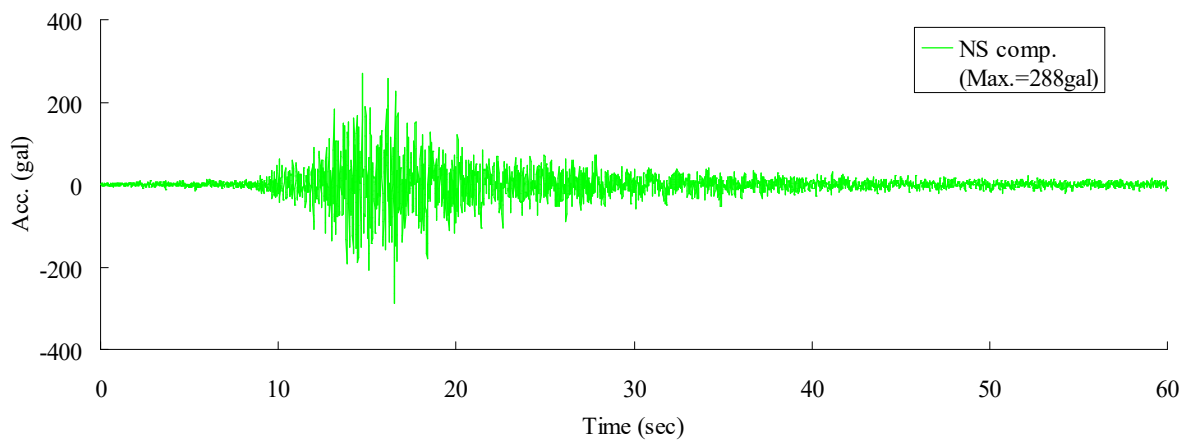
例図-2.11 K-net 輪島における加速度時刻歴の比較

### 2.2.3 能登空港における地震動の推定

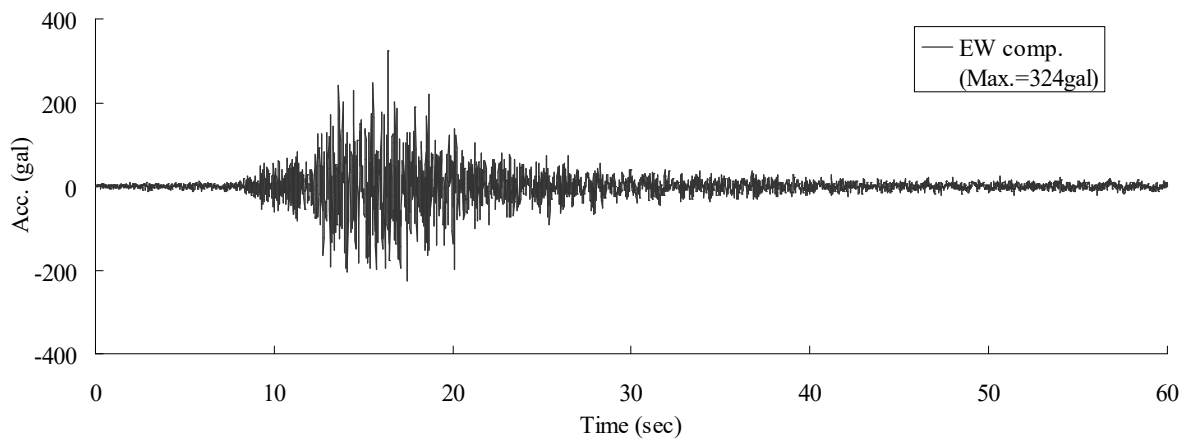
**例図-2.12** は経験的グリーン関数法を用いて設定した能登空港サイト(地表面)における2007年能登半島地震の地震動推定結果である。この図によれば能登空港サイトでは、本震時に300gal程度の最大加速度が作用したことがわかる。またこの推定加速度波形から計算した震度は、震度5弱～5強程度となっている。

**例図-2.13** は推定した地震動の加速度応答スペクトルである。この図より長周期になるほど絶対加速度値が緩やかに低下していることから、3成分ともに比較的短周期成分が卓越した地震動であることが読み取れる。

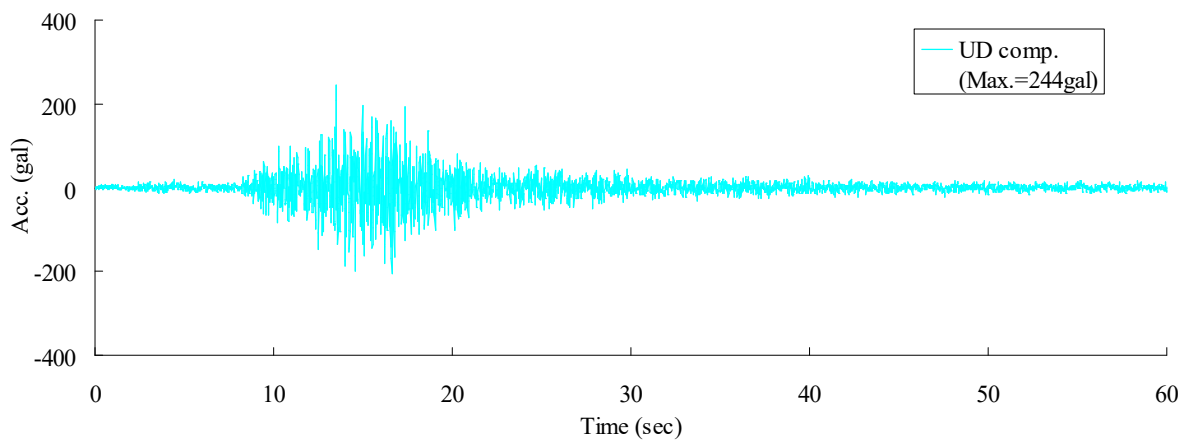
**例図-2.14** は推定した地震動の妥当性を検証するために、司・翠川<sup>3)</sup>の最大加速度に関する距離減衰式に対して、推定した地震動の最大加速度値をプロットしたものである。この図より推定した地震動の最大加速度は、距離減衰式の標準偏差内にあることから地震動の加速度レベルの妥当性を確認することができる。



(a) NS 成分



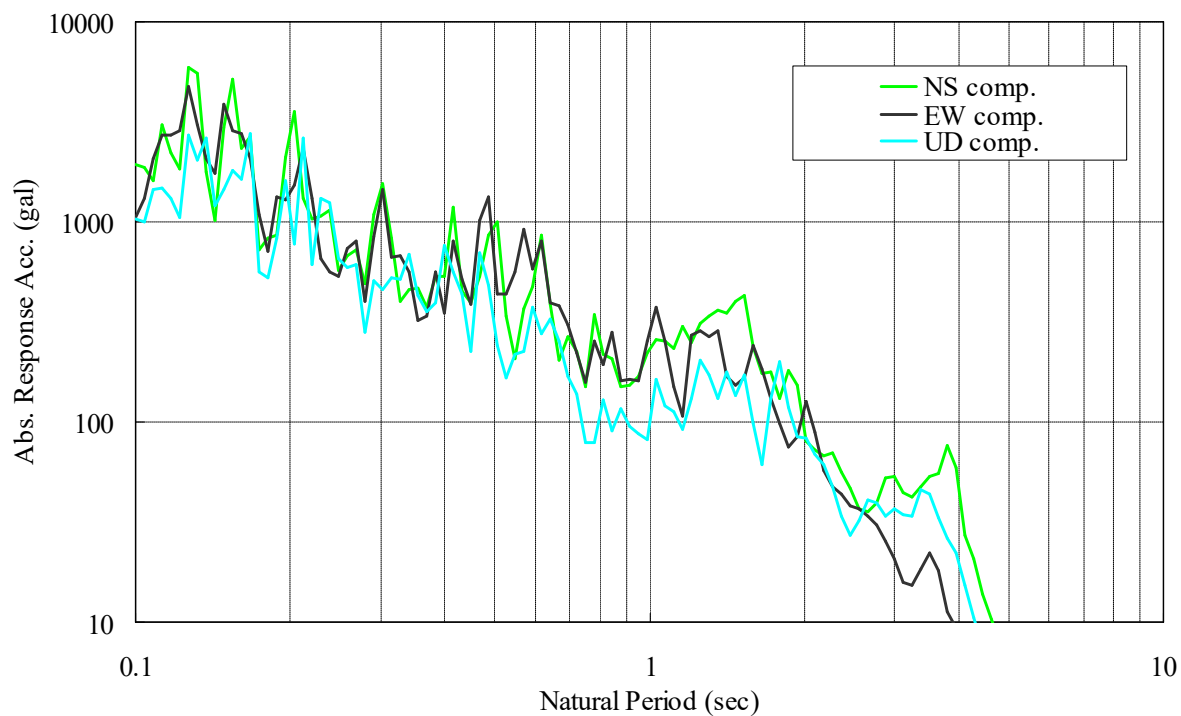
(b) EW 成分



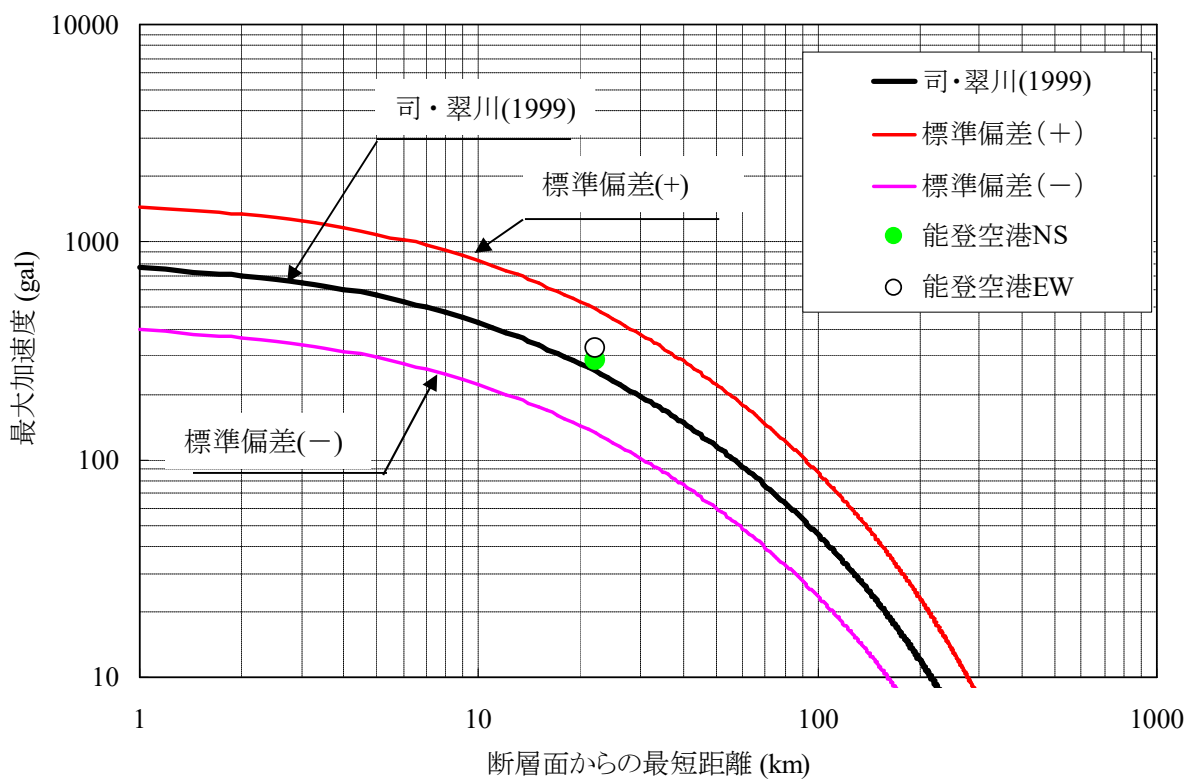
(c) UD 成分

例図-2.12 能登空港サイトにおける地震動推定結果（地表面）





例図-2.13 推定地震動の加速度応答スペクトル



例図-2.14 距離減衰式による妥当性の確認

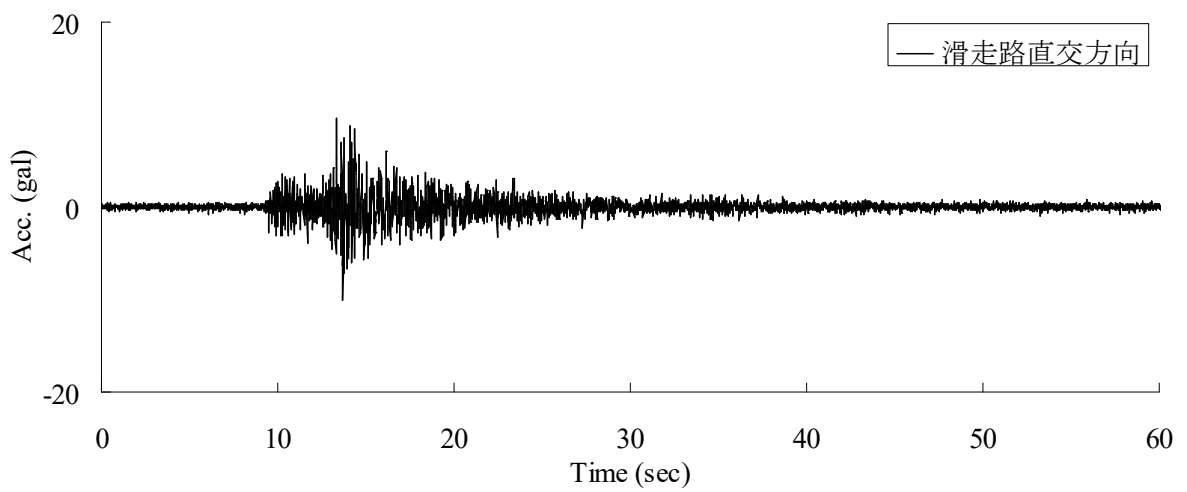
#### 2.2.4 入力地震動の設定

上記では能登空港サイトの地表面を対象として地震動の推定を行った。FLIP を用いた 2 次元非線形動的解析を実施するためには、解析モデル(FEM モデル)底面相当の地震動を推定する必要がある。よってここでは FEM 解析に用いる入力地震動の設定を行う。

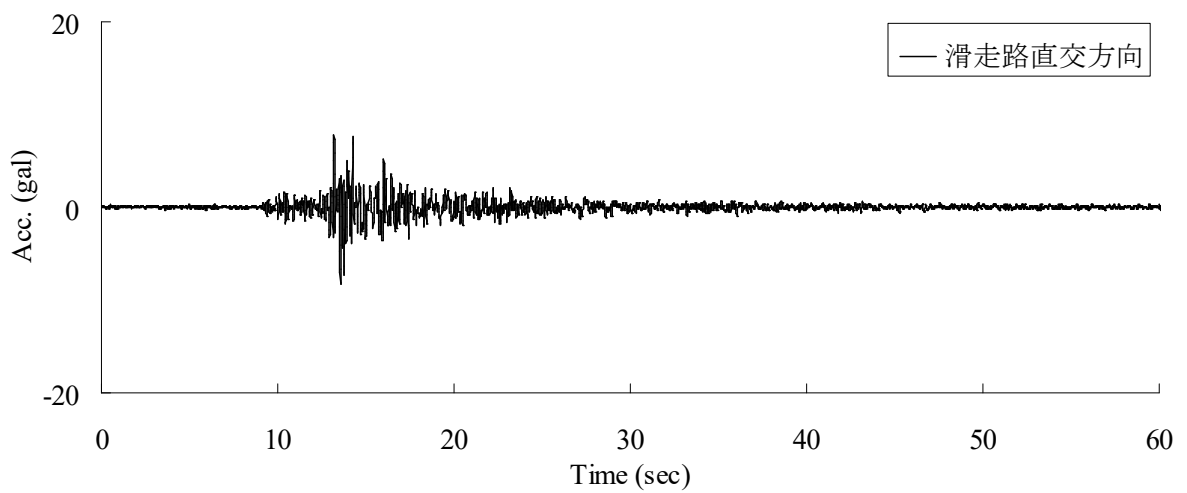
**例図-2.15** は、上記で採用した要素地震波（地表面相当波）について、2次元 FEM 解析を行う滑走路直交方向に座標変換を施したものである。

**例図-2.16** は、**例図-2.15** で設定した滑走路直交方向の波形を FEM 解析底面相当(標高 E.L.=50m 相当)に引戻した解析モデル底面の入射波（2E 波）である。SHAKE を用いた 1 次元地震応答計算（引戻し計算）に用いた能登空港地震計設置地点相当の 1 次元地盤モデルを**例図-2.18** に示す。1 次元地盤モデルの地盤構成、地盤物性値(単位体積重量、せん断波速度等)、減衰定数に関しては、既存の文献資料を参考に設定した。

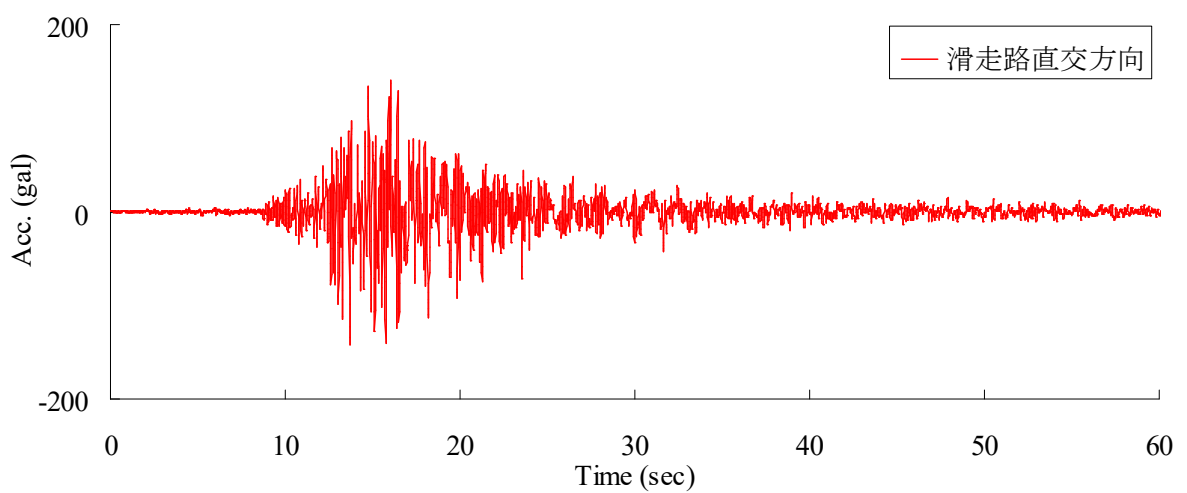
**例図-2.17** は、**例図-2.16** で示した地震動を要素地震として経験的グリーン関数法を用いて推定した能登空港サイトにおける FEM 解析底面相当(標高 E.L.=50m 相当)の地震動である。FEM 解析では、当波形を入力地震動として非線形地震応答解析を実施した。



例図-2.15 滑走路直交方向の要素地震の波形（地表面）



例図-2.16 滑走路直交方向の要素地震の2E波（FEM解析モデル底面相当）



例図-2.17 入力地震動の設定

| 標高<br>(m) | 能登空港地震計設置地点 |           |            |                                    |                       |             |
|-----------|-------------|-----------|------------|------------------------------------|-----------------------|-------------|
|           | 標高<br>(m)   | 深度<br>(m) | 地盤<br>構成   | 単位体積<br>重量<br>(tf/m <sup>3</sup> ) | せん断波<br>速度<br>(m/sec) | 減衰定数<br>(-) |
| 210       | 215         | 0         |            |                                    |                       |             |
|           | 205         | 10        | 強風化岩       | 2.000                              | 270                   | 0.03        |
| 190       |             |           | 中軟岩<br>～硬岩 | 2.485                              | 520                   | 0.01        |
| 170       |             |           |            |                                    |                       |             |
| 150       |             |           |            |                                    |                       |             |
| 130       |             |           |            |                                    |                       |             |
| 110       |             |           |            |                                    |                       |             |
| 90        |             |           |            |                                    |                       |             |
| 70        |             |           |            |                                    |                       |             |
| 50        | 50          | 215       |            |                                    |                       |             |

例図-2.18 一次元地盤モデル

**参考文献**

- 1) 野津厚：2007年能登半島地震の震源モデル（第二版）ーデジタルデータ付きー，研究ノート No.23，2007.
- 2) 片岡正次郎，日下部毅明，村越潤，田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究，国土技術政策総合研究所研究報告，No.15，2003.
- 3) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，1999.

### 例-3 液状化対策範囲の検討例

液状化対策範囲を設定するため、平成19年10月に石狩湾新港において制御発破による地盤の液状化現象を再現し、実物大の空港施設の液状化時挙動を把握することを試みた現場実大実験を実施した。本資料は、実験結果のうち付録-5に関連する以下の内容について取りまとめたものである。

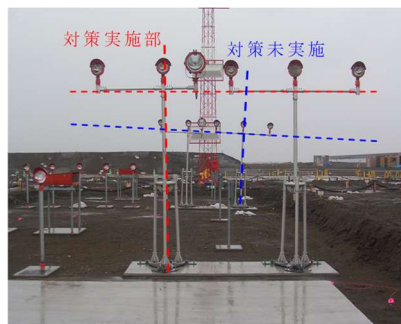
- ①現象把握
- ②液状化対策効果及びコスト縮減案の検討

#### 3.1 現象把握

液状化後の過剰間隙水圧の消散に伴い各種空港施設に変状が生じた。アスファルト舗装、進入灯、ローライザー及びグライドスロープなどの空港施設（以上、いずれも未改良域に施工された施設、例写真-3.1～例写真-3.3）に、沈下あるいは不等沈下の被害が生じ、また、アスファルト舗装脇のローライザー基礎周辺において、激しい噴砂が生じ、施設によっては機能の重大な影響を与えることが確認された。



例写真-3.1  
液状化後のアスファルト舗装の変状



例写真-3.2  
液状化後の進入灯の傾斜状況



例写真-3.3 液状化後のローライザー基礎周辺の変状

液状化後の地盤性状については、液状化時に発生する過剰間隙水圧の消散、地盤の密実化により、地盤の剛性や強度が回復傾向を示すことが考えられたが、液状化直後から実施したラムサウンディング及びスウェーデン式サウンディングによる調査を時系列で確認した結果、液状化後の剛性や強度の回復傾向が確認されなかった。

実験後2週間以上経過してからの現場調査結果によると、標準貫入試験によるN値及び密度検層による実験後の密度値については、増加傾向にあることが確認されたが、同調査でサンプリングした試料における液状化強度は、むしろ液状化後における強度低下の傾向が顕著であり、相反する結果を示した。

以上の結果より、液状化時の過剰間隙水圧の消散と地盤の強度回復、増加過程が一致しない可能性が考えられるが、過剰間隙水圧が完全に消散した後であれば、原位置試験結果から、地盤の剛性や強度は、液状化前と同等であると考えられる。

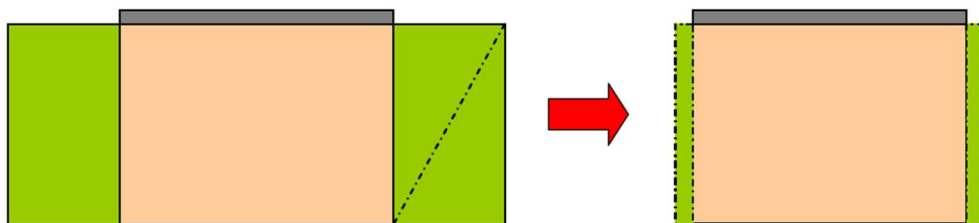
現場液状化実験により、空港施設の挙動が液状化時に顕著であることや、過剰間隙水圧が完全に消散した後であれば、地盤の剛性や強度は、液状化前と同等まで回復することが確認された。このような現象は、粒度特性、透水係数、応力履歴等の個別の地盤条件により異なると考えられることから、事前に地盤条件を把握し、液状化継続時間を含めた予測手法の構築が必要であると考えられる。

## 3.2 液状化対策効果及びコスト縮減案の検討

### 3.2.1 余改良域の縮小についての検討

静的圧入締固め（CPG）工法における余改良域は、**例図-3.1**に示す地盤改良域とその周辺の未改良域との緩衝領域としての役割を果たしているが、余改良域を縮小するためには以下の内容を確認する必要がある。

- ① 模型振動台実験及び現場液状化実験により、液状化に伴い発生する過剰水圧伝搬に伴う改良域の改良効果の持続性を確認する。
- ② 液状化後における滑走路機能（地盤の支持力）を確認する。液状化後の地盤剛性の低下あるいは回復状況を調査し、改良前の地盤よりも地盤剛性が十分に確保されていることを確認する。
- ③ 液状化後における滑走路機能（規定勾配）を確認する。



例図-3.1 余改良幅縮小のイメージ

#### (1) 過剰間隙水圧伝搬に伴う改良域の改良効果の持続性

##### ① 既往の模型振動台実験の事例

善ら<sup>1)</sup>は、締固め領域と緩詰め領域を隣接させた模型地盤、及び両領域との間に改良域の施工に伴う周辺地盤の影響を考慮した余改良域を設けた模型地盤により振動台実験を実施している。この実験では、今回の現場液状化実験では検討し得なかった振動に対する影響について、締固め領域と緩詰め領域境界付近の過剰間隙水圧、地表面沈下量に着目して整理しており、そ

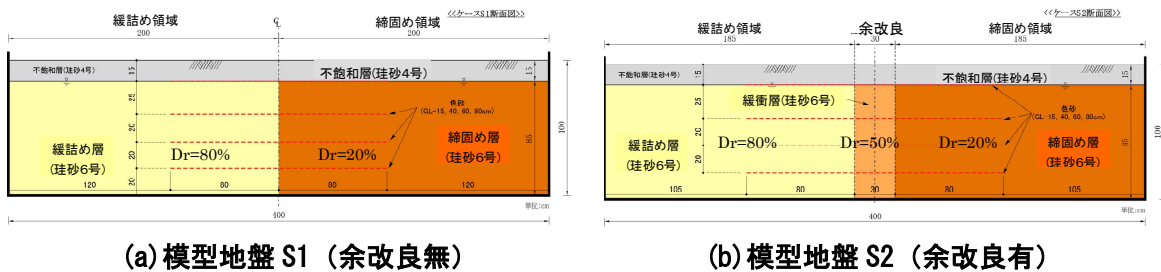
の内容は以下のとおりである。

実験は、長さ 4m、高さ 1.5m、奥行 2.8m の鋼製土槽を用い、**例図-3.2** に示す 2 ケース (S1, S2) について同時に加振した。実験ケースは、S1 が締固め領域 (改良地盤) と緩詰め領域 (非改良地盤) を直接隣り合わせたケース、S2 が締固め領域 (改良地盤) と緩詰め領域 (非改良地盤) の間に余改良域を設けたケースを設定している。入力波は正弦波 (周波数 3Hz, 波数 20 波) とし、50Gal, 100Gal, 200Gal, 300Gal を段階的に与え、加速度、変位、間隙水圧が計測項目である。

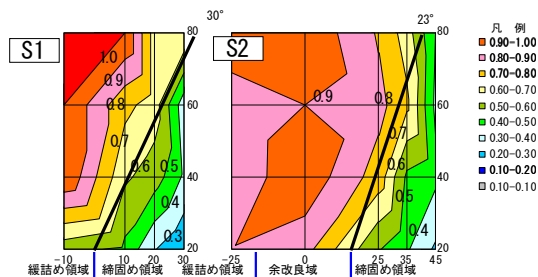
**例図-3.3** に締固め領域、緩詰め領域境界付近の最大過剰間隙水圧比の断面図を示す。締固め領域において、過剰間隙水圧比が 0.5 以上となる範囲は S1 で土槽下端から約 30° の範囲、S2 で土槽下端から約 23° の範囲となり、余改良域があると水圧の伝搬がやや抑えられている様子がわかる。

**例図-3.4** に地表面沈下量 (300Gal 加振完了後の最終沈下量) の水平分布図を示す。緩詰め領域の沈下量は 15mm 程度に対し、締固め領域は 2mm 程度とかなり小さい様子がわかる。境界部付近に着目すると、余改良域有りが余改良域無しに対して沈下量がやや小さく、締固め領域の沈下による地表面勾配は 0.17~1.67%程度と、余改良域無しの場合の勾配 0.5~1.83%に比べやや低い傾向にあることが確認できる。

上記より、改良された地盤 (余改良域含む) であれば過剰間隙水圧の影響を受けたとしても地表面に大きな沈下は生じないことが確認された。



例図-3.2 模型地盤 (文献 1) に修正・加筆



例図-3.3 最大過剰間隙水圧比の分布例 (文献 1) に修正・加筆

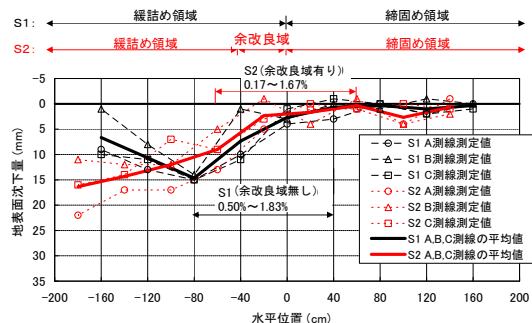
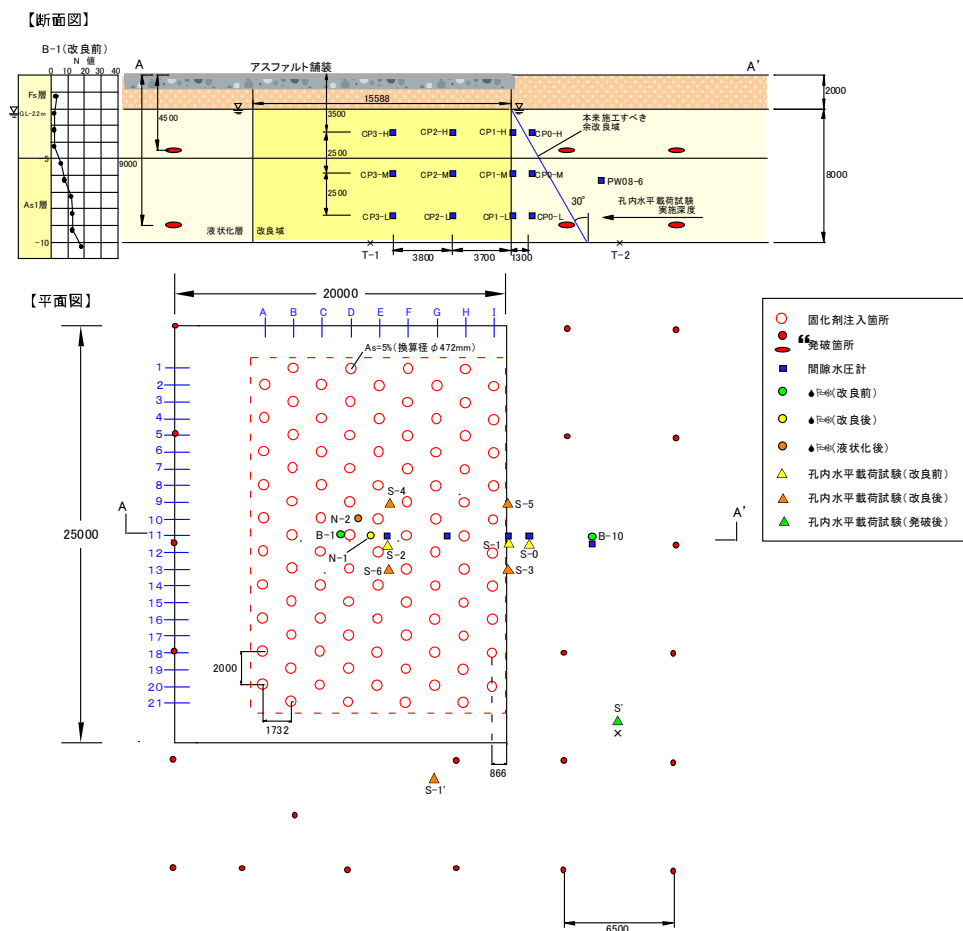


図-3.4 地表面沈下量の水平分布図

## ②現場液状化実験による確認

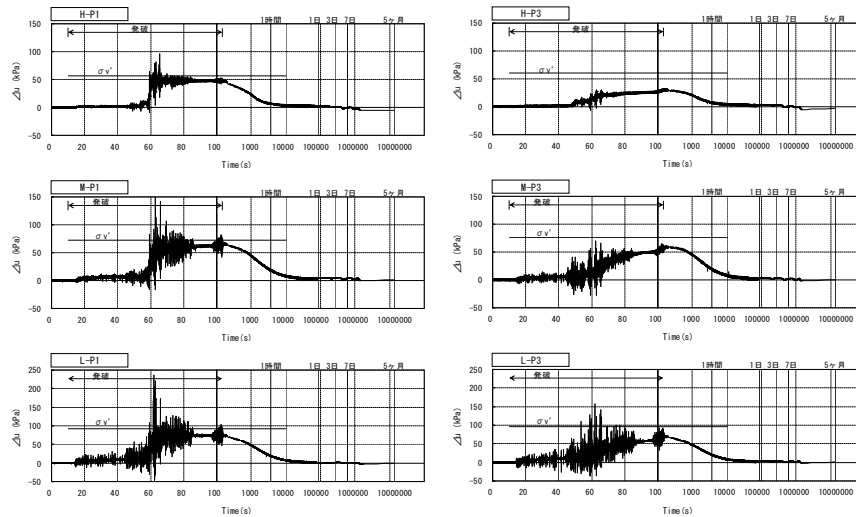
例図-3.5 に現場液状化実験における調査位置図、例図-3.6 に過剰間隙水圧の時系列データと伝搬状況をそれぞれ示す。例図-3.6 より、発破中の改良部周辺の液状化及び改良体内部への過剰間隙水圧の伝搬が確認され、発破中のピーク時における改良体端部で過剰間隙水圧比は概ね 0.7 前後を示していることがわかる。また、改良体内部の部位にかかわらず、過剰間隙水圧の消散過程は同様であり、一時間後には過剰間隙水圧比が 0.2 程度を示し、一日後にはほぼ 0 を示している様子がわかる。

上述の①、②より、現場液状化実験における過剰間隙水圧の改良体内部への伝搬はやや大きいものの、振動台実験における改良体付近の過剰間隙水圧の伝搬傾向と概ね一致すること、また、液状化後の改良体内の過剰間隙水圧の消散については、周辺の液状化地盤と同等であることが確認された。



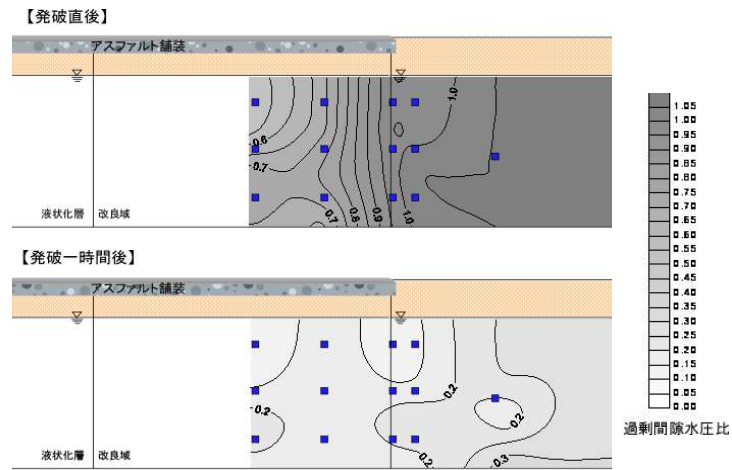
例図-3.5 CPG 改良域の調査位置図





(a) 改良体内部

(b) 改良体端部



(c) 過剰間隙水圧の分布断面図

例図-3.6 過剰間隙水圧

## (2) 液状化後における滑走路機能（地盤の支持力）の確認

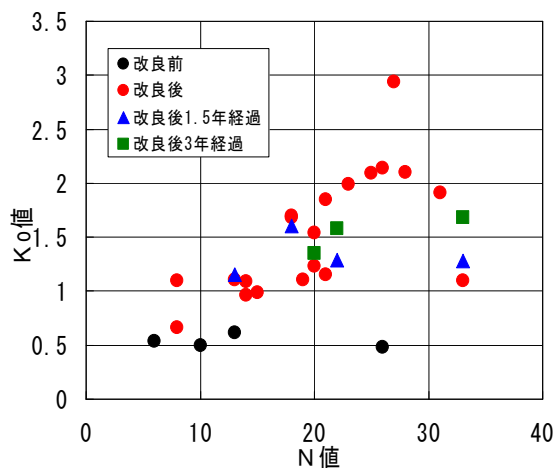
例図-3.7 に東京国際空港における改良前・後の $N$ 値と孔内水平載荷試験（セルフボーリングタイプ）により得られた $K_0$ 値（ $=\sigma'_h/\sigma'_v$ ）の関係<sup>2)</sup>を示す。 $K_0$ 値は、改良前0.5程度であったが、改良により1.0以上に増加し、1.5年、さらに3年経過後も $K_0$ 値は1.0以上を維持している。

例表-3.1、例図-3.8 に現場液状化実験における改良前後及び液状化後で実施した孔内水平載荷試験結果を示す。改良前後における $K_0$ 値の傾向は、例図-3.7 に示す既往調査と同様であり、液状化履歴を受けた場合には、過剰間隙水圧伝搬の影響を受けるものの、改良中央部では液状化した後も改良効果が継続し、また、端部では若干 $K_0$ 値が下がるものの、ある程度改良効果が持続していることが確認された。

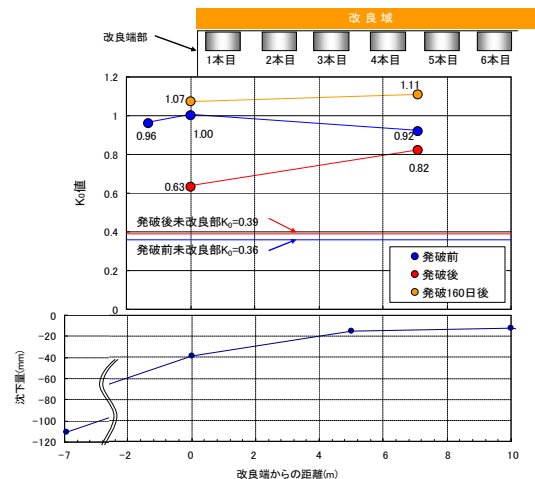
以上より、既往調査において、地震やそれに伴う液状化等の履歴を受けなければ、3年以上改良効果が継続していること、また、現場液状実験結果において、液状化履歴を受けた場合には、改良体内部では液状化前とほぼ同程度、端部ではある程度の改良効果が保持されることが確認された。

例表-3.1  $K_0$ 値のとりまとめ

| 地点番号 | 条件      | 測定深度<br>GL- (m) | 土質  | 初期圧<br>$\sigma'_h$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 有効土被り圧<br>$\sigma'_v$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 静止土圧係<br>数<br>$K_0$ |
|------|---------|-----------------|-----|--|---|---------------------|
| S'   | 発破前     | 未改良部            | 細砂  | 35   | 98.4  | 0.36                |
| S-0  |         | 改良外部            | 細砂  | 94.5                                       | 98.7  | 0.96                |
| S-1  |         | 改良縁部            | 細砂  | 98.19                                      | 98.4  | 1.00                |
| S-2  |         | 改良内部            | 細砂  | 90   | 98.4  | 0.92                |
| S'-1 |         | 未改良部            | 8.5 | 細砂   | 38  | 98.4                |
| S-3  | 発破後     | 改良縁部            | 細砂  | 65   | 103.1   | 0.63                |
| S-4  |         | 改良内部            | 細砂  | 85   | 103.1   | 0.82                |
| S-5  | 発破160日後 | 改良縁部            | 細砂  | 104  | 97.0  | 1.07                |
| S-6  |         | 改良内部            | 細砂  | 117  | 105.4   | 1.11                |



例図-3.7 改良前・後の $N$ 値と $K_0$ 値の関係

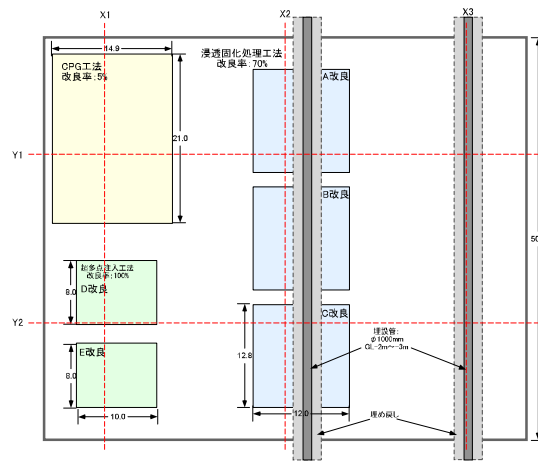


例図-3.8  $K_0$ 値及び地表面沈下量分布図

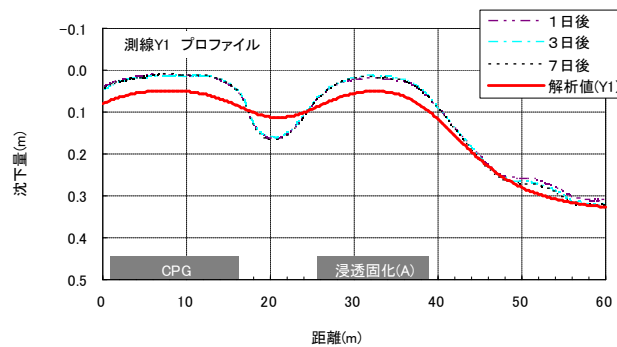
### (3) 液状化後における滑走路機能（規定勾配）の確認

改良体端部におけるアスファルト舗装の変状について、Y1 断面における小型路面性状測定装置による平坦性調査及び ALID による数値解析を実施した。例図-3.9 に上記測定結果及び解析結果を示す。

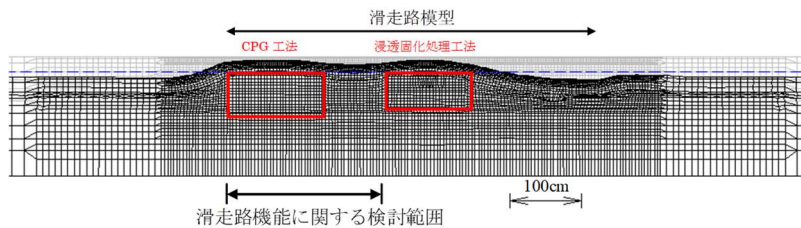
例図-3.10, 例表-3.2 に CPG 改良体端部, CPG 改良体中心部及び未改良部の代表点における液状化後の舗装面の沈下量及び勾配について取りまとめたものを示す。舗装勾配のデータは、通常の施工管理において、5m ピッチの勾配により管理していることから、これと同様に整理した。例図-3.10 より、測定結果における勾配は、改良体端部では規定勾配の 1.5%に近い値を示し、改良体中心部及び未改良部における勾配は、規定勾配内の値を示しており、非常に良い一致を見せていることがわかる。



(a) アスファルト舗装平面図

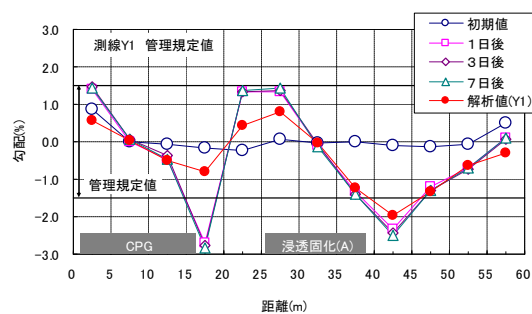
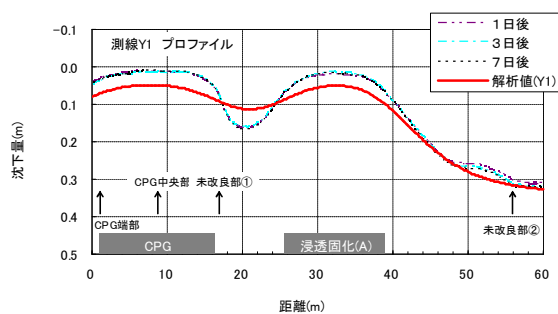


(b) Y1 側線のプロフィール



(c) Y1 断面の解析結果（沈下後）

例図-3.9 Y1 側線における調査・解析結果



(a) 舗装面の変状

(b) 舗装面の勾配

例図-3.10 Y1 側線における実験・解析結果の比較

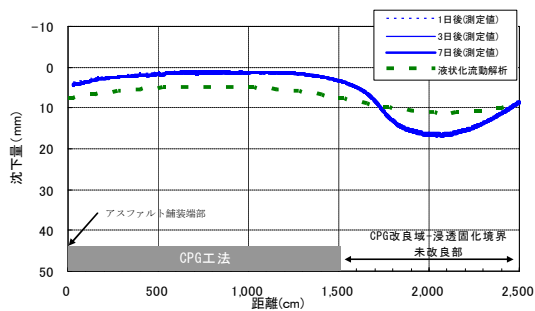
例表-3.2 アスファルト舗装面の勾配(%)

| 着目点    | 距離<br>(m) | 実験値   |       |       |       | 解析    |
|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |           | 初期値   | 1日後   | 3日後   | 7日後   |       |
| 改良体端部  | 1.0       | 0.86  | 1.38  | 1.44  | 1.41  | 0.52  |
| 改良体中心部 | 8.0       | -0.01 | -0.01 | 0.06  | 0.07  | 0.02  |
| 未改良部①  | 17.5      | -0.18 | -2.70 | -2.75 | -2.80 | -0.71 |
| 未改良部②  | 55.0      | -0.08 | -0.71 | -0.73 | -0.70 | -0.30 |

例図-3.11, 例図-3.12 に例図-3.10 で示した CPG 改良域の詳細を示す。先に、通常の施工管理では、5m ピッチの勾配により管理していることを述べたが、例図-3.12 では 50cm ピッチと極めて細かい間隔で舗装の勾配を管理し、アスファルト舗装の規定勾配 1.5% との比較を行った。

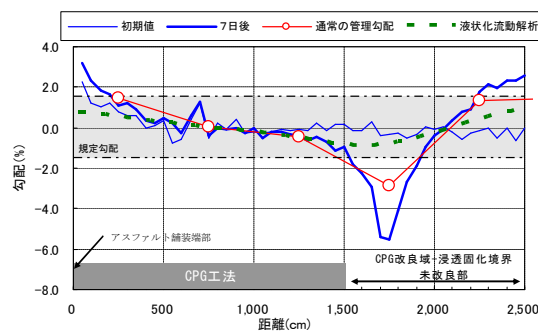
例図-3.11 に示すアスファルト舗装面の沈下による形状を見ると、液状化後に改良体端部において、若干ではあるが沈下が顕著に表れている様子がわかり、また、CPG-浸透固化境界の未改良部に大きな沈下が生じていることがわかる。一方、解析結果については、実測値と比べ若干沈下量を過大評価することとなったが、CPG 改良端部までは表層のアスファルト舗装の変状があまり生じていないことから、CPG 改良の効果を明瞭に確認することができる。また、アスファルト舗装が地盤の変形に追従して変状を起こしている様子も確認することができた。

例図-3.12 に示す液状化後のアスファルト舗装の勾配に着目すると、改良体中心部ではほぼ 0% を保ち、アスファルト舗装端部から約 2m の範囲における細かいピッチにより管理した勾配では、既定勾配を上回る変状が生じているが、通常の施工管理では問題がないことがわかる。一方、CPG-浸透固化境界の未改良部に着目すると、施工管理値で -2.8%、50cm ピッチにおける勾配では、改良体からの離れ約 2.5m で最大勾配である -5.5% を示し、既定勾配が確保できない結果となった。



例図-3.11

CPG 改良域における沈下量の比較



例図-3.12

設計限界値と実験・解析結果の比較

以上より、アスファルト滑走路直下に CPG 工法による改良を実施することにより、周辺地盤に液状化が生じても改良効果が持続することから、アスファルト舗装表面に有害な勾配が生じる等の変状は少ないと考えられる。

#### (4) まとめ

振動による影響を既往の模型実験、現場液状化実験及びその再現解析等により液状化対策における余改良域の縮小について検討した結果を以下に記す。

- ・ CPG による改良効果は、既往調査によると、地震・液状化等の履歴を受けなければ、3 年程度の期間は効果が継続する。
- ・ CPG 改良部周辺で液状化が生じた場合、改良体端部から中心部にかけて過剰間隙水圧の影響を受けるが、 $K_0$  値が改良体中心部では液状化前とほぼ同程度、端部においてはやや低下するものの、改良効果が保持されていることより、過剰間隙水圧による軟化等の影響はないと考えられる。
- ・ アスファルト舗装端部ではやや大きい勾配が生じたものの規定勾配をクリアしており、舗装直下全域に改良することで、この変状をある程度防ぐことができる。

以上より、滑走路直下が改良されていれば、周辺の液状化による過剰間隙水圧による改良体の支持力損失等の影響はなく、かつ液状化後における滑走路の機能維持を果たせることから、余改良域は不要であると考えられる。

なお、本液状化実験全体に関する報告書は、港湾空港技術研究所資料<sup>3)</sup>を参照されたい。

## 参考文献

- 1) 善功企，諸星一信，宮田正史，佐々木績，所雅弘，菅野高弘，藤井照久，山田和弘，木村康隆：空港基本施設の液状化対策施工範囲について（その1）－土槽実験による基礎的検討－，土木学会第62回年次学術講演会，Ⅲ-364，pp.727-728，2007.
- 2) 佐藤茂樹，善功企，山崎浩之，八木橋貢，小西武，菅野雄一：コンパクショングラウチングの液状化対策効果（第3報），土木学会第57回年次学術講演会，Ⅲ-080，pp.159-160，2002.
- 3) 菅野高弘，中澤博志：液状化対策に関する実物大の空港施設を用いた実験的研究，港湾空港技術研究所資料，No.1195，2009.