

埋立地等における薬液注入工法による地盤改良工事に関する検討

第 3 回委員会資料

■目次


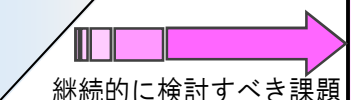
「埋立地等における薬液注入工法による地盤改良工事に関する検討」平成 28 年度の検討結果と今年度検討の視点	1
1. 地盤改良効果の定量的評価手法について	2
1.1 第 2 回検討委員会までの検討内容	2
1.2 今年度の検討課題及び検討方法	3
1.3 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験の室内実験について	4
(1) Nd 値と薬液改良土の一軸圧縮強さ(qu)の関係	5
(2) 間隙水圧計測値と改良効果の関係	7
(3) 実験データに基づく地盤改良効果の評価方法(案)のイメージ	8
1.4 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験により地盤改良効果を評価する際の留意点	9

国土交通省 港湾局

平成 29 年 12 月 19 日

「埋立地等における薬液注入工法による地盤改良工事に関する検討」平成28年度の検討結果と今年度検討の視点

- 平成28年度（第1回、第2回）において、「地盤改良前の改良対象地盤の強度等の評価方法」、「施工中の施工管理方法」、「地盤改良後の施工確認方法」について検討を行い、以下の通り課題の対応方針をとりまとめた。
- 地盤改良効果の調査方法として、間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験（ピエゾドライブコーン(PDC等)）の実施を新たに提示したが、計測データに基づく改良効果の評価方法は定性的な判定にとどめており、**改良効果の定量的な評価**が課題として残されている。

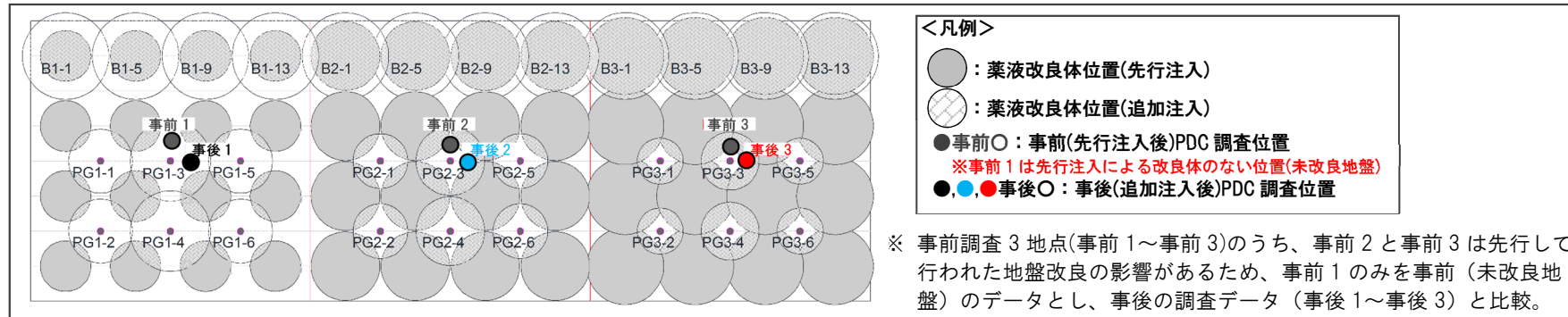
平成28年度検討（第1回、第2回）	対応	課題の対応方針 通達及び事務連絡の施行（平成29年8月1日）
課題1）地盤改良前の改良対象地盤の強度等の評価方法		
<ul style="list-style-type: none"> 埋立地のような不均一地盤を詳細に評価するための調査を行う必要がある。 		<ul style="list-style-type: none"> 地盤の不均一性の大小は、設計段階において、改良対象地盤の既往資料やボーリング結果を基に、自然堆積地盤なのか埋立地盤なのかを判別した上で、埋立地盤の場合においては埋立履歴(埋立材料、埋立施工方法等)等から判断する。 不均一性が大きいと考えられる場合には、サウンディング(動的コーン貫入試験(PDC等))を実施する。 サウンディング(動的コーン貫入試験(PDC等))の調査地点間隔は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示されている間隔を目安にする。
課題2）施工中の施工管理方法		
<ul style="list-style-type: none"> 薬液注入工法の施工計画に必要な調査・試験項目及びその手法を標準化する必要がある。 		<ul style="list-style-type: none"> 施工計画段階では、土懸濁液のpH試験、カルシウム含有量試験、シリカ含有量試験、土中ゲルタイム試験、限界注入速度試験等を行う。 受注者は、施工計画にプラント配置図、配管ルート図、薬液の運搬経路図、各種材料の管理頻度、管理値、保管方法、ゲルタイム設定根拠、注入材のpH管理値等を明示する。
<ul style="list-style-type: none"> 施工計画において明記すべき事項を標準化する必要がある。 		<ul style="list-style-type: none"> 本工事では、薬液注入工を実施する最初の段階で、出来形を確認するための確認施工を実施する。新技術や使用実績のない薬液を採用する場合は、適用性を確認するための試験施工を実施する。
<ul style="list-style-type: none"> 対象地盤が特殊な場合や新技術を適用する際の「施工の確実性」の担保。 		<ul style="list-style-type: none"> 曲り削孔の精度は、地上において、挿入式ジャイロ等の位置測定装置のキャリブレーションにより確認する。
<ul style="list-style-type: none"> 施工仕様を適切に管理するための施工管理とその確認方法、精度管理。 		<ul style="list-style-type: none"> 薬液注入工においては、積算流量計等の機器類のキャリブレーションによりチャート紙の記録が適切であること、不正な配管がないこと、ゲルタイムが適切に管理されていることを確認する。
<ul style="list-style-type: none"> トラブル及び異常への対処。 		<ul style="list-style-type: none"> 発注者は、施工が計画どおり適切に行われているか抜き打ちを含む立会により適宜確認する。 薬液注入に伴うpHの変化による周辺環境への影響は、暫定指針に基づき地下水の監視を行う。
課題3）地盤改良後の施工確認方法		
<ul style="list-style-type: none"> 品質確認における客観性・透明性の確保。 		<ul style="list-style-type: none"> 客観性を確保するため、地盤改良後の品質確認調査（事後調査）は、工事とは別発注とし第三者により実施。
<ul style="list-style-type: none"> サンプリングや供試体作成時に生じる強度低下に繋がる試料の乱れへの対策。 		<ul style="list-style-type: none"> 地盤改良後の施工確認方法は、当面は、従来どおり一軸圧縮試験による評価を原則とし、必要に応じシリカ含有量試験等による評価を行う。
<ul style="list-style-type: none"> 工事目的物の出来形を直接確認することができないことへの対策。 		<ul style="list-style-type: none"> 出来形の確認方法として、間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験により、間隙水圧比(u/σ_v)の増加または細粒分含有率(F_c)を確認する。
		<p>➤ 地盤改良効果の調査方法として”間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験”の実施を新たに提示したが、計測データに基づく改良効果の評価方法は定性的な判定にとどめており、地盤改良効果（強度等）の定量的な評価は課題として残されている。</p>

今年度の検討 地盤改良効果の定量的評価手法 ～薬液注入工法の地盤改良効果の確認時における新たな調査手法および確認方法の検討～	
<div data-bbox="231 1459 379 1501" style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 2px;">課題</div> <ul style="list-style-type: none"> 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験(PDC等)得られる計測値(Nd値、間隙水圧)による地盤改良効果(強度等)の定量的な評価。 PDC等により地盤改良効果を定量的に評価する際の留意点。評価時の動的 PDC等の調査位置、間隔の考え方。 PDC等の適用限界を超える場合の評価方法。 	<div data-bbox="1424 1459 1676 1501" style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 2px;">検討の視点</div> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験(PDC等)で得られる計測値と薬液注入工法による地盤改良効果(改良地盤の強度等)の間にはどのような関係があるのか？また、対象地盤(原地盤)の土質等により計測値はどのような影響を受けるのか？ <ul style="list-style-type: none"> ・ PDC等の計測値(Nd値・間隙水圧比(u/σ_{vd}))と地盤改良後の土の一軸圧縮強さ(q_u)の関係 ・ 実験データに基づく地盤改良効果の定量的評価方法 ➤ 定量的な評価を行うために実施した室内実験の結果と埋立地のような不均一地盤での試験結果の関係は？ ➤ Nd値や間隙水圧発生特性により地盤改良効果を定量的に評価する場合の留意点は？ ➤ PDC等の調査位置、間隔の考え方は？ ➤ PDC等の適用限界を超える場合の評価方法は？

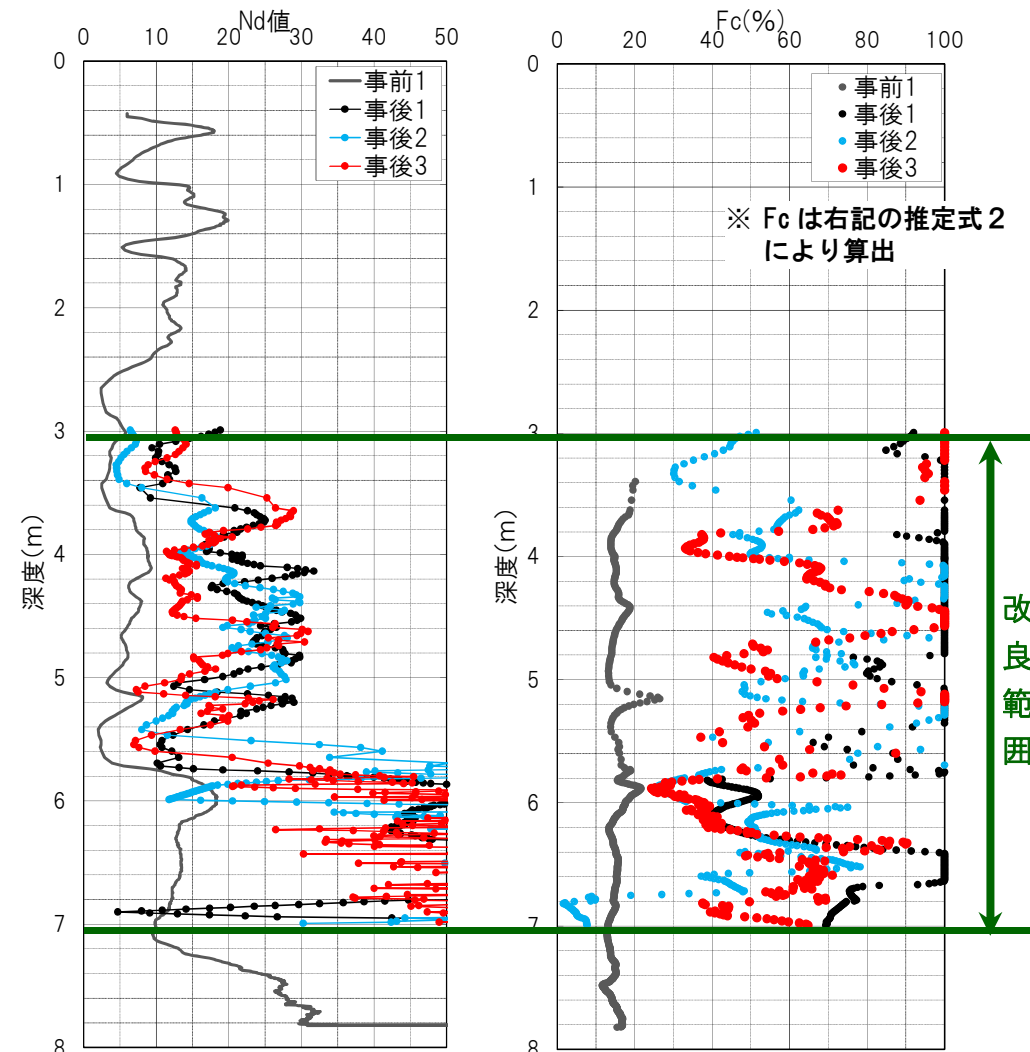
1. 地盤改良効果の定量的評価手法について

1.1 第2回検討委員会までの検討内容

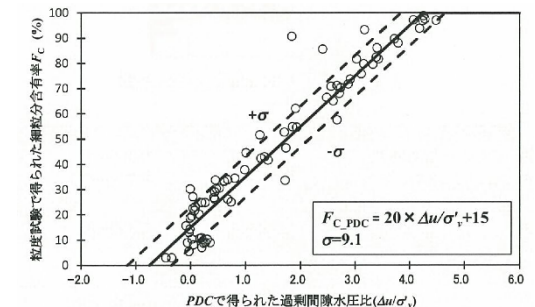
- 薬液注入工法の実験サイト(南袖サイト)において実施した改良前後のピエゾドライブコン(以下、PDC)の調査結果を比較すると、改良後の計測値に明確な変化(Nd値の増加、みかけのFcの増加)がみられた。
 ⇒ 改良前後のPDCデータを比較することにより、深度方向に連続的に改良されていることを確認できると考えられた・・・改良効果(出来形)の定性的な確認
- ただし、計測値と改良地盤の強度に関するデータが十分に得られていないため、地盤改良効果の定量的評価は今後の課題とした。



調査位置の平面図 (第2回検討委員会資料による)

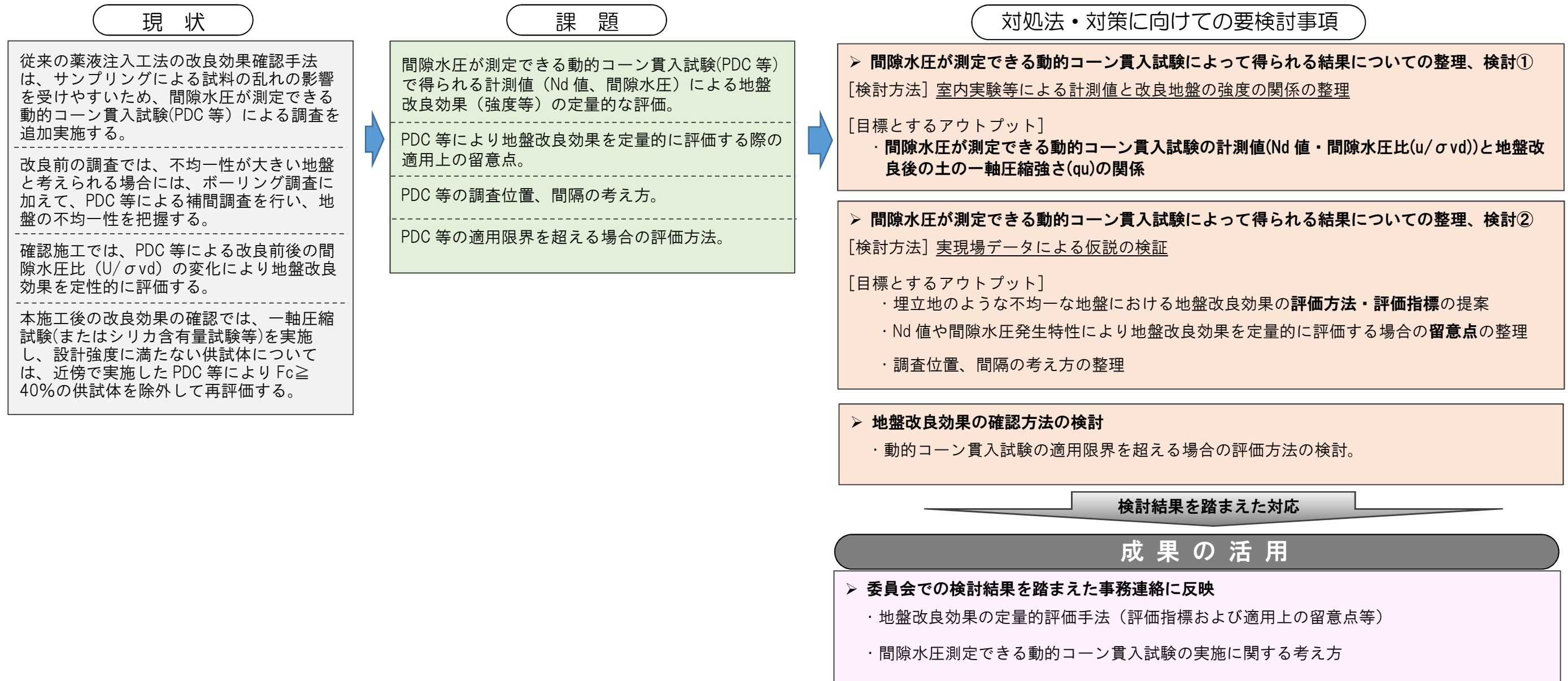


薬液改良工法の実験サイトにおける改良前後のPDC結果の比較 (第2回検討委員会資料による)



1.2 今年度の検討課題及び検討方法

- ・ 事例データは限られており、間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験(PDC等)により得られる計測値と改良地盤の強度の定量的な関係は不明である。
- ・ 埋立地のような不均一な地盤で得られる計測値は、実地盤の土質のばらつきの影響を受けるため、強度や物性値が明確で均一な人工地盤を再現した室内実験等により、計測値と改良地盤の強度の基本的な関係を明らかにする必要がある。
- ・ 上記を踏まえ、PDCの計測値による改良地盤の強度の定量的な評価手法を検討するとともに、評価指標を設定する必要がある。



1.3 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験の室内実験について

【実施主体】 (国研)港湾空港技術研究所、関東学院大学、(一社)沿岸技術研究センターによる共同研究

【目的】 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験(PDC等)により薬液改良工法による地盤改良効果を評価するためには、Nd値と改良土の一軸圧縮強さ(q_u)の関係を把握する必要がある。しかし、埋立地のような不均一な地盤で得られる計測値は、実地盤の土質のばらつきの影響を受けるため、Nd値と改良土の一軸圧縮強さ(q_u)の純粋な関係を抽出することができない。そこで、強度や物性値が明確で均一な人工模型地盤を用いた室内実験により両者の基本的な関係を把握する。

【手法】

・強度や物性値が明確で均一な人工模型地盤を用いてPDC試験および一軸圧縮試験を行い、Nd値と一軸圧縮強さの関係を把握

※珪砂(細粒分含有率 $F_c=0\%$)を使用し、シリカ濃度を変えた薬液により地盤改良した人工模型地盤を作成。→現在細粒分を含む土を用いた実験を実施中

※PDC試験実施後に模型地盤を解体してブロックサンプルを切り出して相対密度を計測。

※一軸圧縮試験は、人工模型地盤と同一条件で作成したモールド試料を使用して実施。

→相対密度を介してNd値と一軸圧縮強さ(q_u)を関連付け

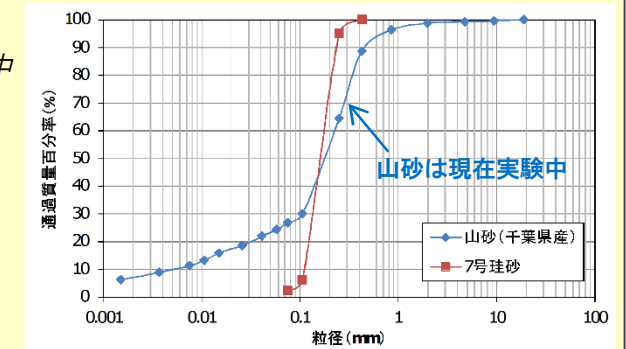
・間隙水圧の測定と評価は、模型地盤実験では境界反射の影響を受け正確なデータが取得できないため、現場データ(南袖サイト)により検討

【結果の整理】

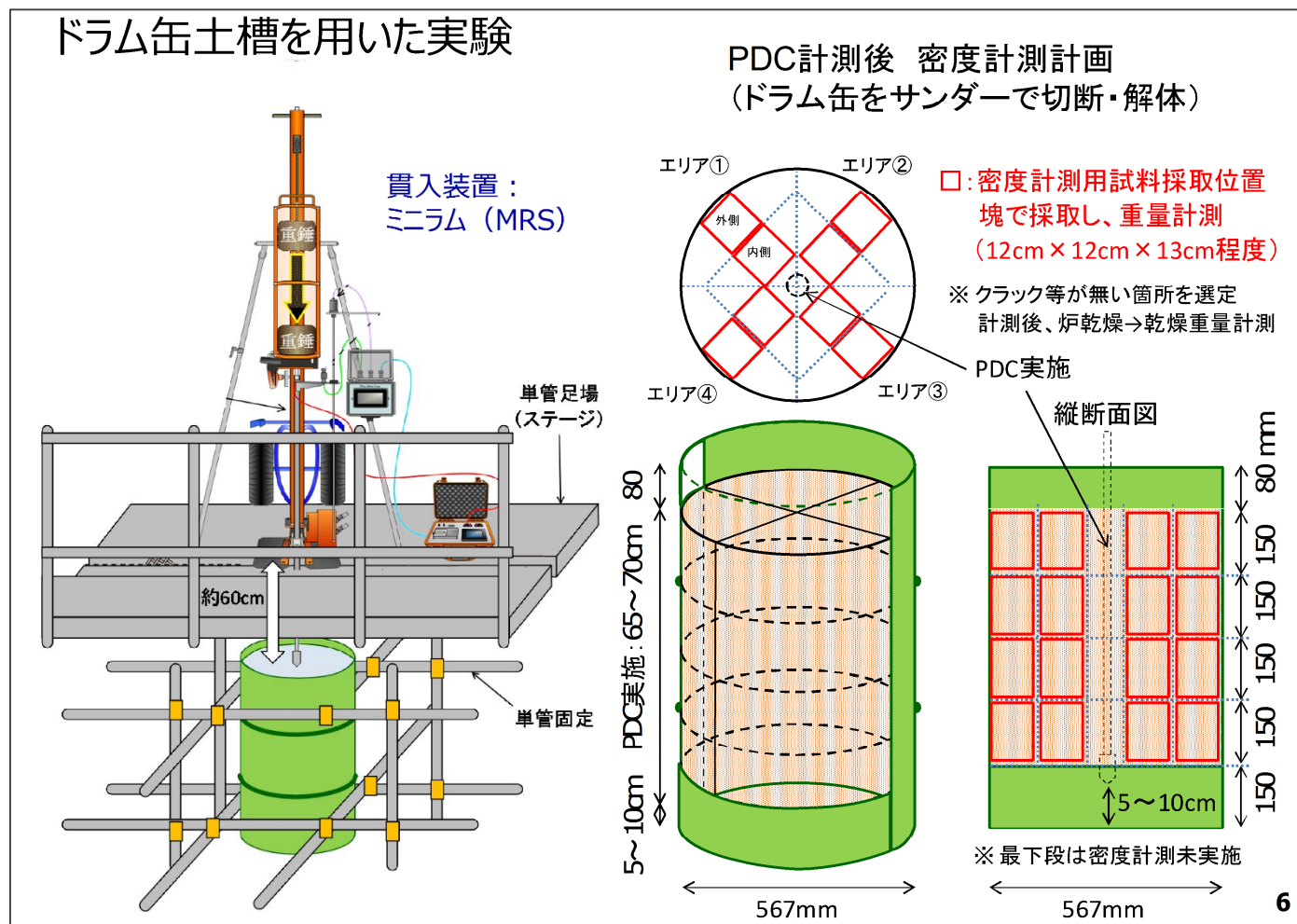
実験結果等を踏まえ、以下の考察を進めている。

(1) Nd値と薬液改良土の一軸圧縮強さ(q_u)の関係

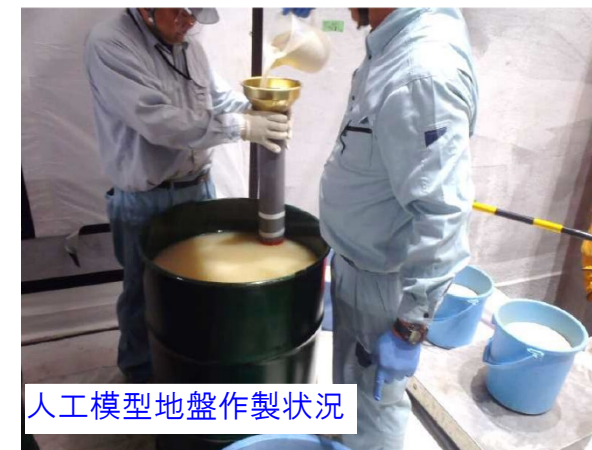
(2) 間隙水圧計測値と地盤改良効果の関係



室内実験で使用した土の粒度分布



人工模型地盤に対するPDC実験状況 (ドラム缶土槽)



モールド供試体の一軸圧縮試験状況



室内実験の実施方法の概要

(1) Nd 値と薬液改良土の一軸圧縮強さ (qu) の関係

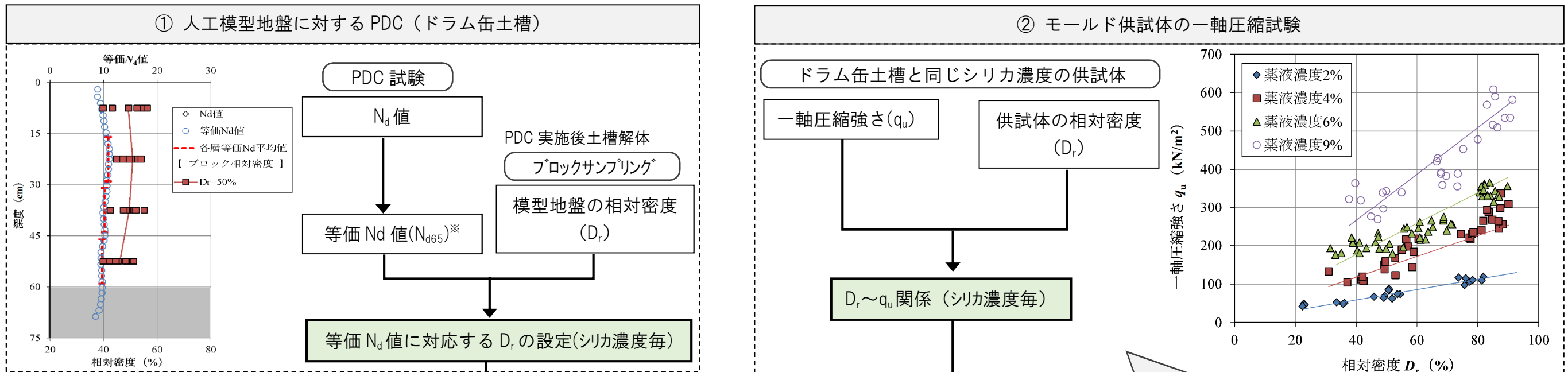
これまでに分かったこと

- ・ 原地盤の相対密度が高いほど改良土の強度(一軸圧縮強さ qu)は大きい。
- ・ シリカ濃度が高いほど一軸圧縮強さ(qu)は大きい。
- ・ Nd 値 (等価 Nd 値) と一軸圧縮強さ(qu)の間には線形の相関が見られる。
- ・ 改良前後の等価 Nd 値増分 (Δ等価 Nd 値) と一軸圧縮強さの関係はよりばらつきが少ない線形相関を示す。

今後の課題

- ・ 細粒分を含む地盤での Nd 値と一軸圧縮強さ(qu)の関係を把握する必要がある。
- ・ 実際の施工で対象となる一軸圧縮強さ qu=100kN/m² 前後に相当する等価 Nd 値は 5~10 程度であり、事後調査の Nd 値だけでは未改良土の Nd 値なのか、改良効果により強度が増加したのか判断が難しい。
→ Δ等価 Nd 値による評価が適切
※ ただし、事前-事後調査は近くで実施したほうがよい。
- ・ 地盤のばらつきをどの程度見込んで改良効果を評価するか。

実験データの整理手順 (PDC の Nd 値と改良土の一軸圧縮強さ qu の関連付け)



※ 港湾基準に準じて有効上載圧 65kN/m² で正規化

$$(N)_{65} = \frac{N - 0.019(\sigma'_v - 65)}{0.0041(\sigma'_v - 65) + 1.0}$$

(N)₆₅: 等価 N 値
N: 土層の N 値
σ'_v: 土層の有効上載圧力 (kN/m²)

【実験を行う上での課題】

容積が大きいドラム缶土槽では、均一な模型地盤の作成が難しく、Nd 値と一軸圧縮強さ(qu)の関係を正確に評価できない

【課題を踏まえた実験手順】

- ① PDC 試験後にドラム缶土槽から採取したブロックサンプリング試料を用いて、Nd 値を測定した深度の相対密度を計測。
- ② ドラム缶土槽とは別にモールド供試体を用いた試験を実施し、一軸圧縮強さ-相対密度関係を正確に把握。
- ③ モールド供試体で把握した一軸圧縮強さ-相対密度関係から、Nd 値測定深度の相対密度に対応する一軸圧縮強さ(qu)を求め、Nd 値-一軸圧縮強さ(qu)関係を整理する。

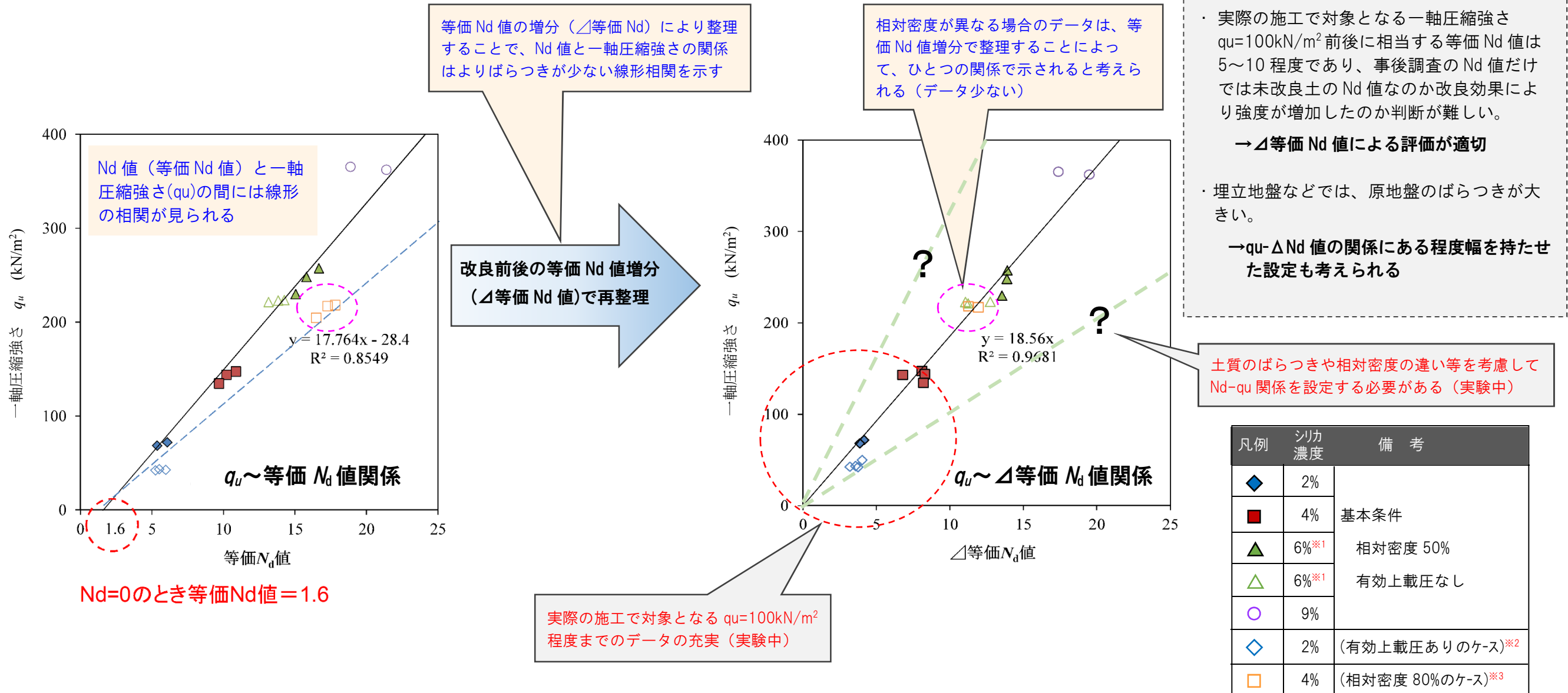
次ページに拡大した図を示す

Nd 値(等価 Nd 値)と改良土の一軸圧縮強さ(q_u)の関係

- Nd 値(等価 Nd 値およびその改良前後増分)は、地盤改良後の土の一軸圧縮強さ(q_u)と相関がみられ、地盤改良効果の定量的評価における指標となりうる。

ただし、

- 薬液注入工法を用いた地盤改良の設計強度は、50~100kN/m²で設計されることが多いため、実地盤での適用性を検討するためには、100kN/m²程度の強度データの充実が必要である。
- 土質のばらつき(F_c の違い)や相対密度の違いにより、 $q_u \sim \Delta Nd$ 値関係の直線の傾きが変化する可能性がある。
- 埋立地のような不均一な地盤で室内実験と同じ関係が成立するか、実地盤の事例に基づく検証が必要である



Nd 値と改良土の一軸圧縮強さ (q_u) の関係に関するこれまでの実験結果の概要

- ※1 薬液の違いによる影響を確認するために、同一シリカ濃度の2種類の薬液を用いた実験を実施。
- ※2 実地盤のように土被り(有効上載圧)がある場合の影響を確認するために実施。
- ※3 実験は相対密度 50%のケースを基本にしているため、相対密度が高い地盤での関係を確認するために実施。(相対密度が小さい場合については実験中)

(2) 間隙水圧計測値と改良効果の関係

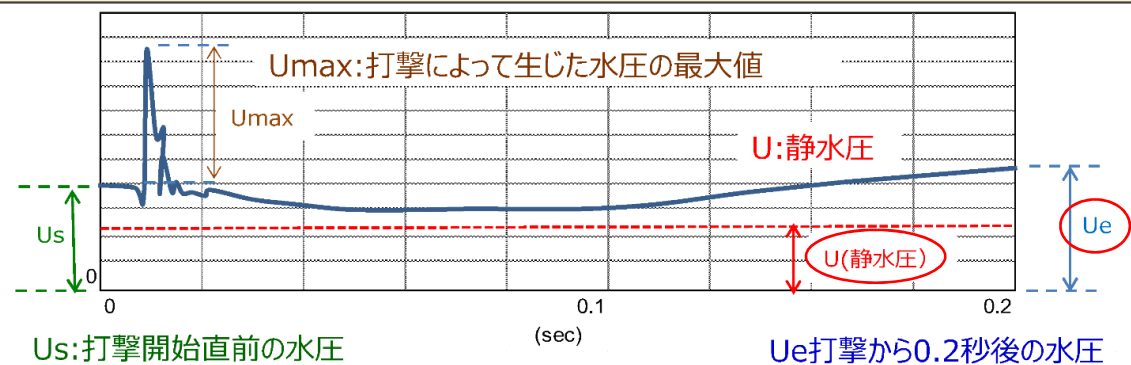
これまでに分かったこと

- 改良後の地盤では、PDCで計測した間隙水圧データから算定される「みかけのFc」が増加する。
(通常PDCは地盤調査を目的とするため、間隙水圧から地盤の細粒分含有率Fcを算出することを標準的な解析としている)
- PDCで計測される1打撃毎の0.2秒後の残留水圧についてみると、未改良地盤では累積値ゼロであるのに対して、薬液注入により改良された地盤では概ねプラスの値となる。

→累積過剰間隙水圧比^{*} $(U_e - U) / \sigma_{vd}$ が概ねプラスであることが薬液注入により改良された地盤の透水性低下を判断するパラメータとなる可能性がある。

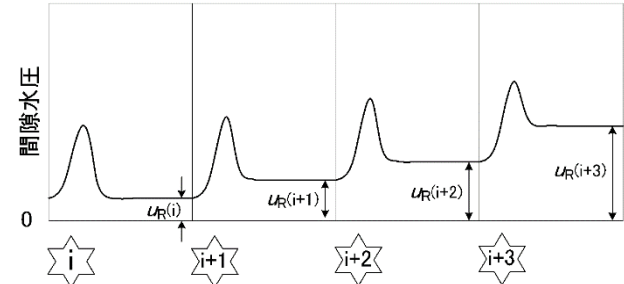
このとき、 U_e : 打撃から0.2秒後の水圧、 U : 静水圧、 σ_{vd} : 有効上載圧

(現行の事務連絡では0.2秒後の残留水圧 U_e を有効上載圧で除した値[間隙水圧比]を指標としている)



PDCの1打撃後0.2秒間の間隙水圧の計測データ例

※ PDC試験で累積する間隙水圧の概念図

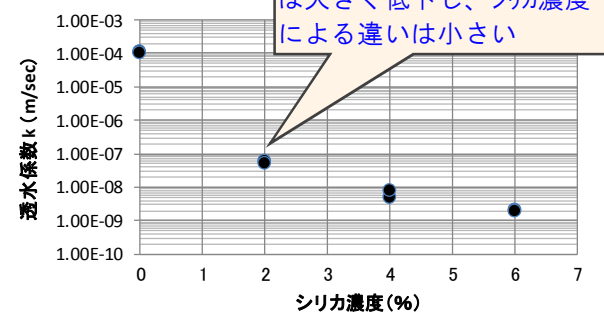


打撃貫入時に発生する過剰間隙水圧の消散は、地盤の透水性に依存するため、透水性が低い地盤(粘性土や薬液改良土)では1打撃ごとに間隙水圧が累積する

ここでは、薬液注入による地盤の透水性の低下を確認する目的から、過剰間隙水圧の累積状況を示す $(U_e - U) / \sigma_{vd}$ を指標とする。

薬液前後の間隙水圧計測値の変化は、薬液が地盤に浸透したことによる透水性の低下と関係している。

配合試験供試体を用いた室内透水試験の結果から、地盤改良後の土の透水係数は低濃度のシリカ薬液で改良した場合でも大きく低下することが分かる。



配合試験供試体を用いた室内透水試験による改良土の透水係数データの例

低濃度の改良でも透水係数は大きく低下し、シリカ濃度による違いは小さい

今後の課題

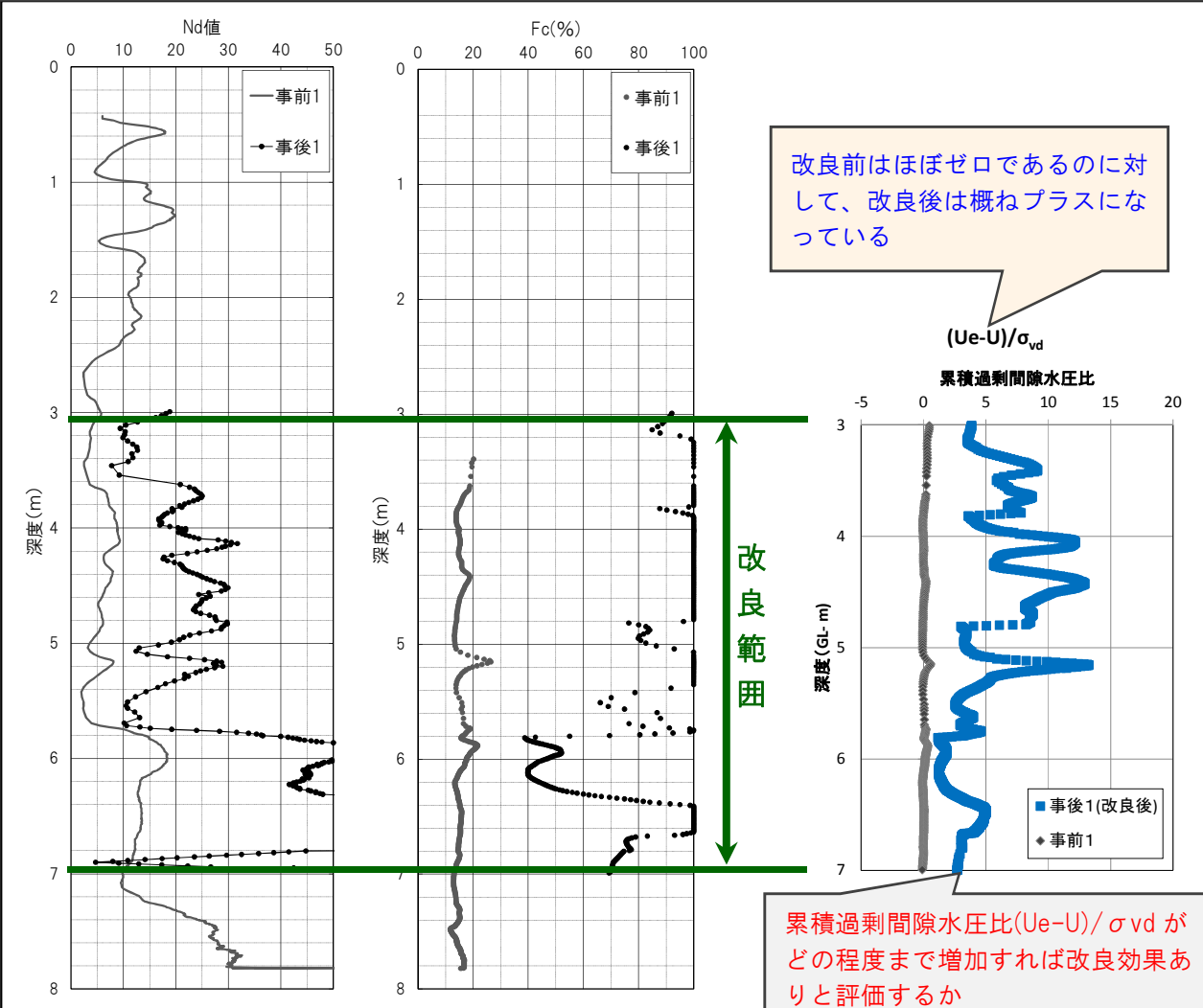
- 累積過剰間隙水圧比 $(U_e - U) / \sigma_{vd}$ がどの程度の値であれば、薬液注入による地盤改良がされている(薬液が地盤に浸透している)と判断できるか検討が必要。
- 未改良地盤に細粒分が多く含まれる場合でも残留水圧の累積値が概ねプラスの値を示すことが推定される。
→改良対象地盤の細粒分を把握した上で、事前-事後の間隙水圧発生特性を比較

間隙水圧計測値による改良効果の評価

- 累積過剰間隙水圧比 $(U_e - U) / \sigma_{vd}$ がプラスであることが薬液改良による地盤の透水性低下を判断する指標となりうる。

ただし、

- 未改良地盤に細粒分が多く含まれる場合でも残留水圧の累積値が概ねプラスの値を示す可能性があるため、事前-事後の比較による評価が必要と考えられる。



改良前はほぼゼロであるのに対して、改良後は概ねプラスになっている

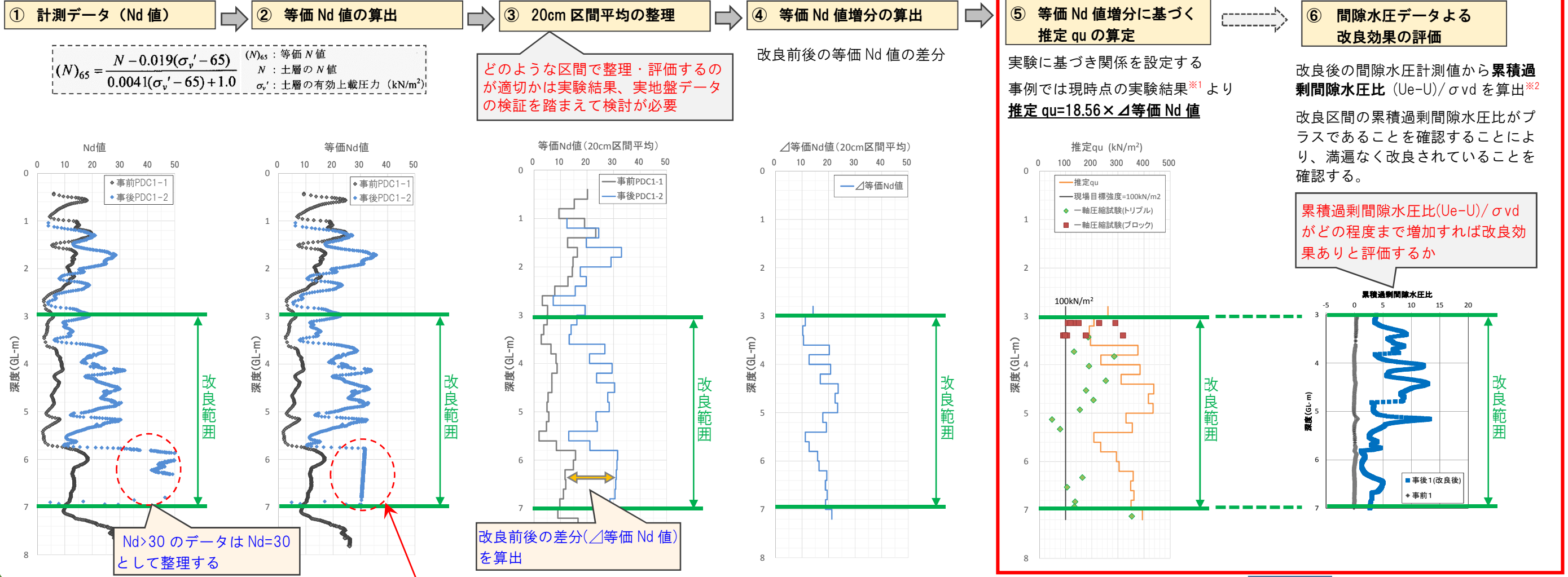
累積過剰間隙水圧比 $(U_e - U) / \sigma_{vd}$ がどの程度まで増加すれば改良効果ありと評価するか

検討に用いたPDC計測データの例(南袖サイト)

(3) 実験データに基づく地盤改良効果の評価方法 (案) のイメージ

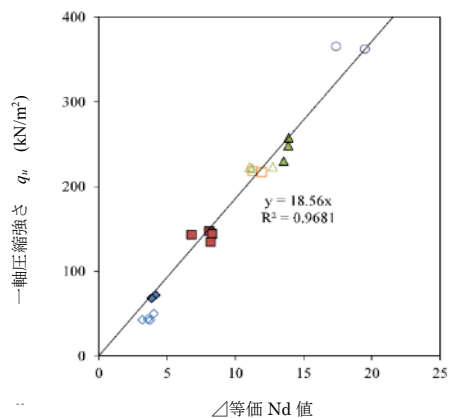
Nd 値による地盤改良強度の評価 (例)

計測した Nd 値から土被り補正した等価 Nd 値 (または改良前後の等価 Nd 値増分) を算出し、「等価 Nd 値-qu 関係 (または Δ 等価 Nd 値-qu 関係)」に基づき改良地盤の推定 qu を求めて設計基準強度(qu_{ck})以上であることを確認する。



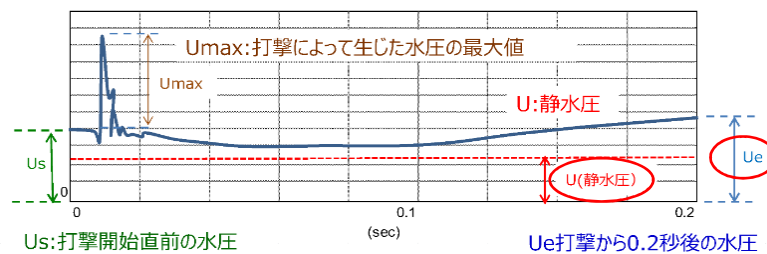
動的コーン貫入試験は、打撃エネルギーが小さい影響により**硬質地盤では過大評価となる可能性**があるため、Nd 値の上限は Nd=30 とし、これ以上の計測値は Nd=30 とした

※¹ 実験データに基づく $q_u \sim \Delta$ 等価 N_{65} 値関係



※² 間隙水圧計値に基づく**累積過剰間隙水圧比 (Ue-U)/σ_{vd}**の算出

(Ue: 打撃から 0.2 秒後の水圧、U: 静水圧、σ_{vd}: 有効上載圧)



PDC の 1 打撃後 0.2 秒間の間隙水圧の計測データ例

Nd 値と間隙水圧データによる評価 (案)

薬液注入工法により改良された地盤は、未改良地盤と比べて**等価 Nd 値が増加し、透水性が低下することにより累積過剰間隙水圧比が概ねプラスの値**となると考えられる。

- しかし、**等価 Nd 値の増分が小さく、設計基準強度を下回る場合でも、累積過剰間隙水圧比が増加する**場合が想定される。
- このため、**等価 N 値の増分から強度が設計強度以上であることを確認すること原則とする**が、設計基準強度を下回る場合でも、その深度における**累積過剰間隙水圧比がプラス**であれば、改良されているものとする。
- なお、事前調査データから、当該深度が粘性土(非液状化層)であり、**改良対象外の土層と判断できる場合は、評価から除外**する。

1.4 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験により地盤改良効果を評価する際の留意点

間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験を用いて薬液改良工法による地盤改良効果を定量的に評価する場合には、試験装置や得られるデータの特性を踏まえ、留意点を以下のとおりまとめておく必要がある。

試験装置

- ◇ 間隙水圧が測定できる動的コーン貫入試験機を使用する。
- ◇ 試験機には大型(SRS)と中型(MRS)^{※1}があり、ハンマー重量や落下高さが違うため打撃エネルギーおよびNd換算式(エネルギー補正式)が異なる(標準的なNd換算式は、地盤工学会基準書 JGS 1437-2014^{※2}参照)。
- ◇ 地盤改良後の強度が大きくなることを想定し、大型試験機(SRS)の使用を標準とする^{※3}

※2 「動的コーン貫入試験方法 (JGS 1437-2014)」地盤工学会 平成 28 年 2 月

※3 埋立地等のように不均一な地盤においては、礫やがれき等の障害物により中型試験機 (MRS) では貫入不能となり調査中に試験装置の変更を余儀なくされるケースや、地盤改良後の強度が大きく中型試験機の適用ができないケースが考えられるため、予め大型試験機 (SRS) の使用を標準とする。

なお、大型 (SRS)、中型 (MRS) の動的コーン貫入試験機はともに広く普及しており、間隙水圧測定装置は先端コーン等一部の部品を除いて共通の機材を使用することができる。

計測値の集計、整理方法

- ◇ 埋立地のように不均一な地盤では、評価対象となるデータのばらつきが大きいため、ある程度の区間の平均値を使い、地盤全体として評価する。
- ◇ 例えば、①動的コーン貫入試験のNd値の定義(コーンを20cm打ち込むのに必要な打撃回数)にあわせて20cmを1区間としてデータを整理して評価する方法や、②標準貫入試験と同じく1m区間毎のデータとして整理する方法が考えられる。

※1 試験装置の例 (MRS : 中型、SRS : 大型)

貫入装置の仕様			MRS	SRS
ハンマー	ハンマー直径	D_h (mm)	160	195
	ハンマー長	L_h (mm)	190	270
	ハンマー質量	m (kg)	30.0	63.5
	落下高	H (mm)	350	500
コーン	コーン直径	D_c (mm)	36.6	45.0
	コーン断面積	A_c (mm ²)	1052.1	1590.4
打撃エネルギー		mgH (kJ)	0.103	0.311
打撃回数測定 of 貫入量		P (m)	0.2	0.2
単位面積・単位貫入量あたりのエネルギー		E (kJ/m ² /m)	489.5	979.2

