

5-7 弾性論の式を利用してめり込み沈下量を推定する方法

(出典：地盤工学会 関東支部：造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書

— 液状化から戸建て住宅を守るための手引書 —，平成25年3月)

水平成層地盤上に荷重が載荷した場合の弾性沈下量は理論的に求まる。これを利用し静的解析による残留変形解析と同様に液状化した地盤の弾性係数を低下させると、めり込み沈下量を求めることができる。

ちなみに、建築基礎構造設計指針に示されている図-1のような多層の場合の計算式を利用し、図-2に示す二層系を想定して、表-1のように液状化による弾性係数低下割合を1/100、1/500、1/1,000と仮定し下記の条件で計算してみると図-3のようになる。

また、液状化による弾性定数（せん断剛性）の低下割合は土の性質（粒径や液状化強度）や液状化の程度などによって異なる。繰返しねじりせん断試験によって繰返し載荷（液状化試験）後に単調載荷した際のせん断剛性を求めると図-4のようになるが、このような試験結果から液状化に伴うせん断剛性の低下割合を求めた例¹⁾を図-5に示す。ここでは液状化した土の応力～ひずみ関係を図-4に示したようにバイリニアで仮定し、この第1勾配の G_1 を液状化前のせん断剛性（ N 値から求めた G_N や $\gamma=10^{-3}$ での $G_{0,i}$ ）で除した値と細粒分含有率 F_c 、液状化の程度(F_L で表示)との関係を整理してある。

このせん断剛性低下率は、細粒分含有率と液状化の程度で大きく異なり、数十分の1から千分の1程度まで減少している。その後、図-5にさらに広範囲な条件の試験データを付け加えて、液状化後のせん断剛性 G_1 を液状化強度比 R_L 、 F_L 、有効拘束圧 σ_c' と関係付けた²⁾のが図-6であり、FEMを用いた静的解析(残留変形解析)プログラムALIDではこの図を用いて建物などの沈下量を推定している³⁾。

ちなみに、この図を用いて東日本大震災における浦安の液状化状況を想定して $F_L=0.8$ 、 $R_L=0.27$ と仮定し、せん断剛性の低下割合を試算してみると約1/100となる。

したがって、このような計算でもある程度めり込み沈下量が求まると言えよう。

ただし、液状化後の間隙水の消散に伴う体積圧縮は別に計算する必要がある。

また、根入れ深さ、部分的な地盤改良などを考慮して計算する場合にはこの方法では無理であり、有限要素法による解析を行う必要がある。

<多層系地盤の場合>

図-1に示すような多層系地盤については、次のようにして近似的に即時沈下量を求めることができる。

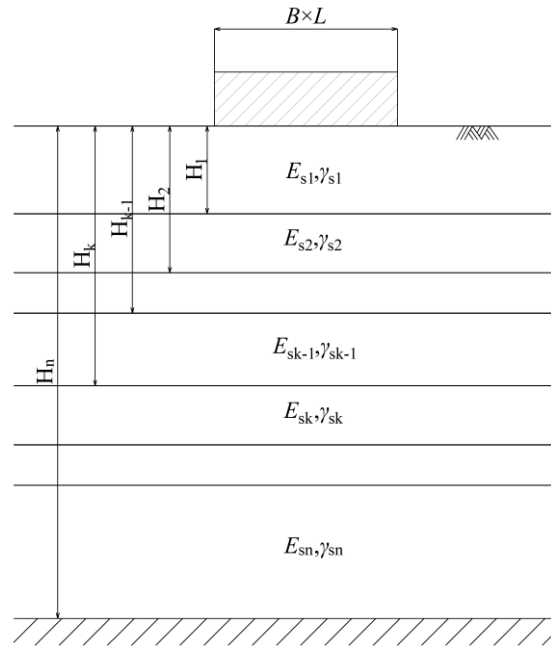


図-1 多層地盤の場合

$$S_E = \left\{ \frac{I_S(H_1, \gamma_{s1})}{E_{s1}} + \sum_{k=2}^n \frac{I_S(H_k, \gamma_{sk}) - I_S(H_{k-1}, \gamma_{sk-1})}{E_{sk}} \right\} qB$$

ここに、

$I_S(H_k, \gamma_{sk})$: 層厚 H_k 、ポアソン比 γ_{sk} の地盤における沈下係

H_k : 地表面から k 層下端までの距離(m)

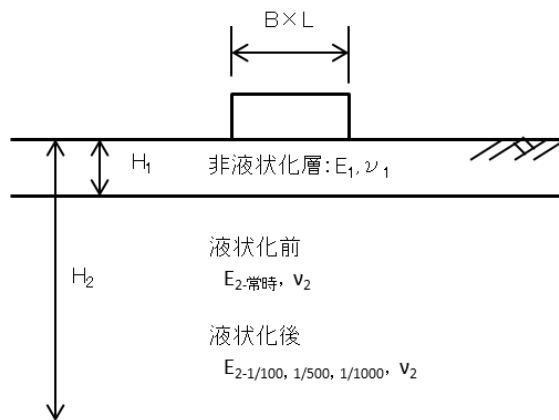


図-2 建築基礎構造設計指針における沈下量の計算方法と液化化による沈下量推定への利用方法

表-1 計算条件の仮定¹⁾

矩形面の長さ	L	10	(m)	
矩形面の幅	B	10	(m)	
地盤の厚さ	H ₁	1	(m)	表層地盤深度
	H ₂	7	(m)	液状化地盤深度
地盤のヤング係数	E ₁	28000	(kN/m ²)	非液状化地盤 (N値=10回)
	E _{2-常時}	14000	(kN/m ²)	液状化対象地盤-地震前 (N値=5回)
	E _{2-1/100}	140	(kN/m ²)	液状化対象地盤-地震後 (E ₂ =1/100)
	E _{2-1/500}	28	(kN/m ²)	液状化対象地盤-地震後 (E ₂ =1/500)
	E _{2-1/1000}	14	(kN/m ²)	液状化対象地盤-地震後 (E ₂ =1/1000)
地盤のポアソン比	ν ₁	0.35		表層地盤
	ν ₂	0.35		液状化対象地盤
作用する荷重	q	10	(kN/m ²)	建屋荷重

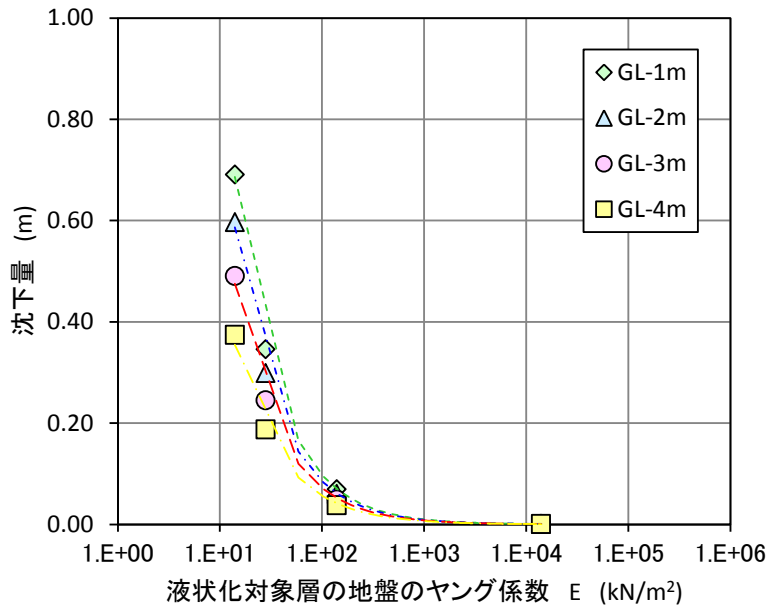
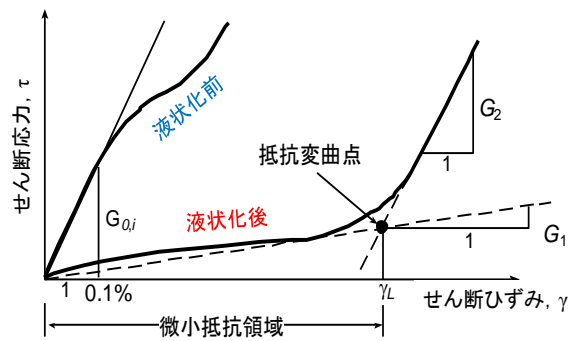


図-3 弾性論で計算した家屋のめり込み沈下量¹⁾



液状化によるせん断剛性の低下割合= $G_1/G_{0,i}$

図-4 液状化に伴う応力～ひずみ、せん断剛性の低下の概念図²⁾

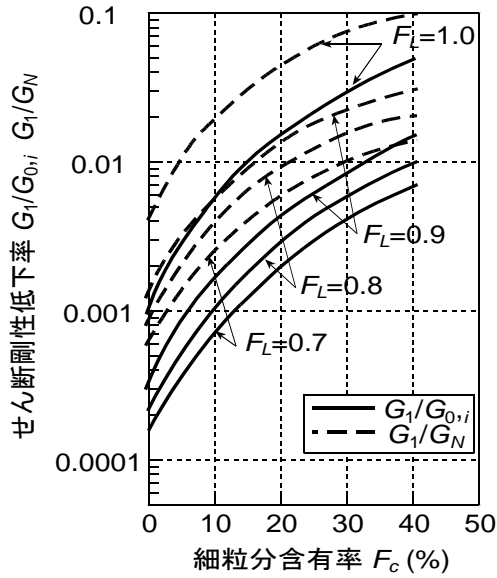


図-5 せん断剛性低下割合と F_L 、 F_C の関係³⁾

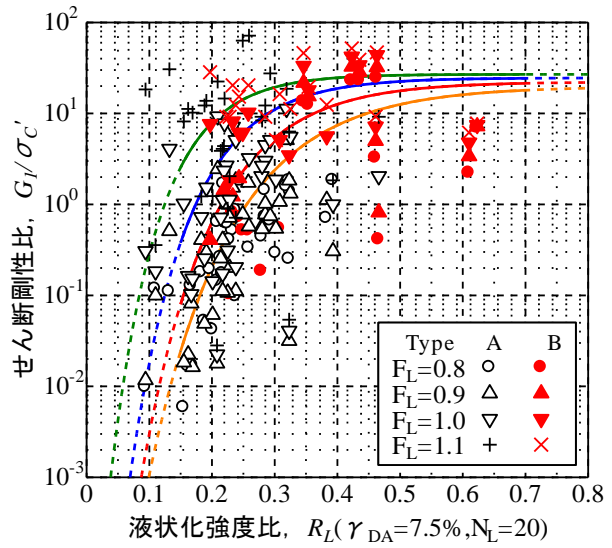


図-6 G_1 と R_L 、 F_L 、 σ'_c の関係²⁾

<参考文献>

- 1) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法、土木学会論文集、No.638/Ⅲ-49、pp.71-89、1999.
- 2) 安田進・稲垣太浩・長尾和之・山田真一・石川敬祐：液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性、第40回地盤工学研究発表会、pp.525-526、2005.
- 3) Yasuda, S. and Ariyama, Y. 2008. Study on the mechanism of the liquefaction-induced differential settlement of timber houses occurred during the 2000 Totoriken-seibu earthquake. *Proc. of 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, Paper No.S26-021.

5-8 尼崎市築地地区における自然流下方式による地下水位低下工法実施例 (1995年兵庫県南部地震における液状化対策土地区画整理事業、水面で囲まれた約14haの土地)

(出典：諏訪靖二・福田光治・濱田晃之・本郷隆夫・執行 晃：液状化対策のための地下水位低下工法による実施例,日本材料学会,第10回地盤改良シンポジウム, pp.213-220, 2012.

諏訪靖二：液状化対策のための地下水位低下法による実施例,総合土木研究所,基礎工,Vol.40,No.10, pp.81-84, 2012.)

(1) はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、芦屋浜シーサイドタウン（瀬戸内海の海砂による埋立地）、西宮市の沿岸低地、尼崎市の沿岸低地と築地地区で戸建て住宅が大きな被害を受け、液状化被害が発生した。その中で尼崎市築地地区は、全1,100棟のうち、全壊10棟、半壊292棟の大きな被害が生じた。住民からの、地震に強い町、再液状化することのない町にしたいという要望に対して、道路の耐震化を目的に実施した地下水位低下工法で要望に応え、土地区画整理事業を完了させることができた。

(2) 築地地区における液状化被害

尼崎市築地地区は、兵庫県南部地震の震源断層からかなり遠方にあるが、武庫川を越えて尼崎市にはいると全壊率は小さくなっているのに対し、1個所だけ全壊率が高くなっていた。図-1は、写真-1、写真-2に示すような被災家屋の分布を示す。なお、当時は全壊、半壊、一部損傷の3種類しか被災分類が行われていなかった。建物の傾斜や不同沈下の測定を行った結果、30cmを越える沈下や10/1,000を越える傾斜建物が数多く見られた。

築地地区でこのように大きな液状化が発生した理由として地下水位が高かったことが想定される。図-2はボーリングの孔内水位であるが、点線で囲まれた築地地区の地下水位はほとんどがG.L.-0~-1.0mの深さにあるのに対し、水路を挟んで43号周辺から北寄りの地区では地下水位がG.L.-2.0m以深と深く、これらの地区では液状化被害はほとんど見られなかった。

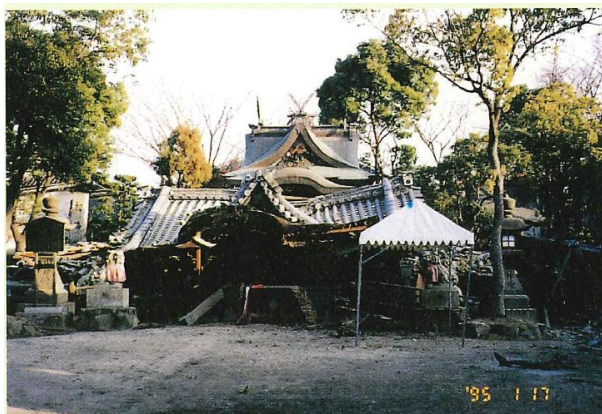


写真-1 初嶋大神宮の全壊状況



写真-2 建物の沈下状況

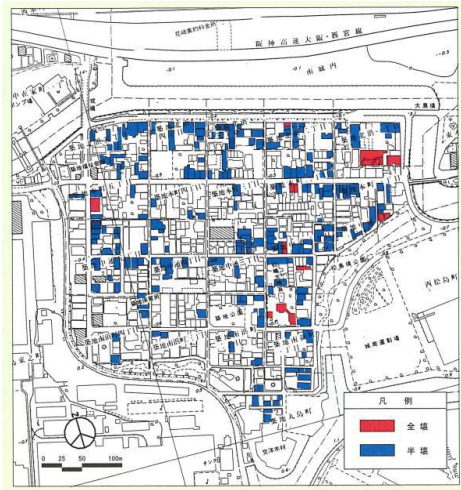


図-1 家屋の被害

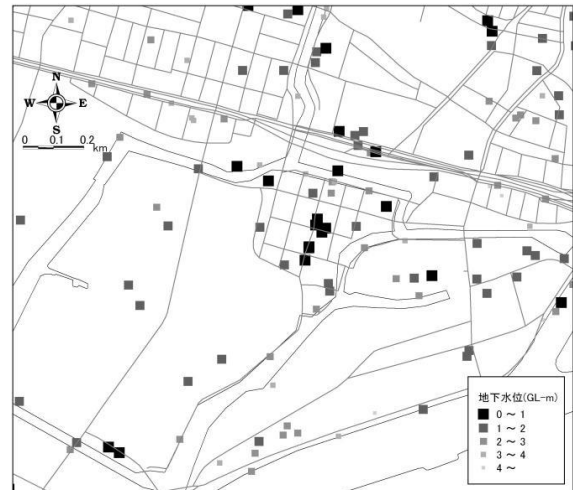


図-2 築地地区周辺の地下水位（深度表示）

(3) 地盤の概要

当地区は図-3 に示すように盛土層の下位に N 値 $N=5\sim 10$ 前後の緩い沖積砂質土層(As)が層厚 7m 前後で成層し、次の沖積粘性土層(Ac)へと続いている。この Ac 層は既存調査結果より、層厚 10m 程度はあると考えられる。尚、No.10 地点においては As 層の層厚が他地点より厚いことが想定され、ボーリング調査においても下位の Ac 層が確認されていなかった。したがって、東堀運河の矢板は Ac 層に達しておらず、遮水がなされていなかったことも考えられる。

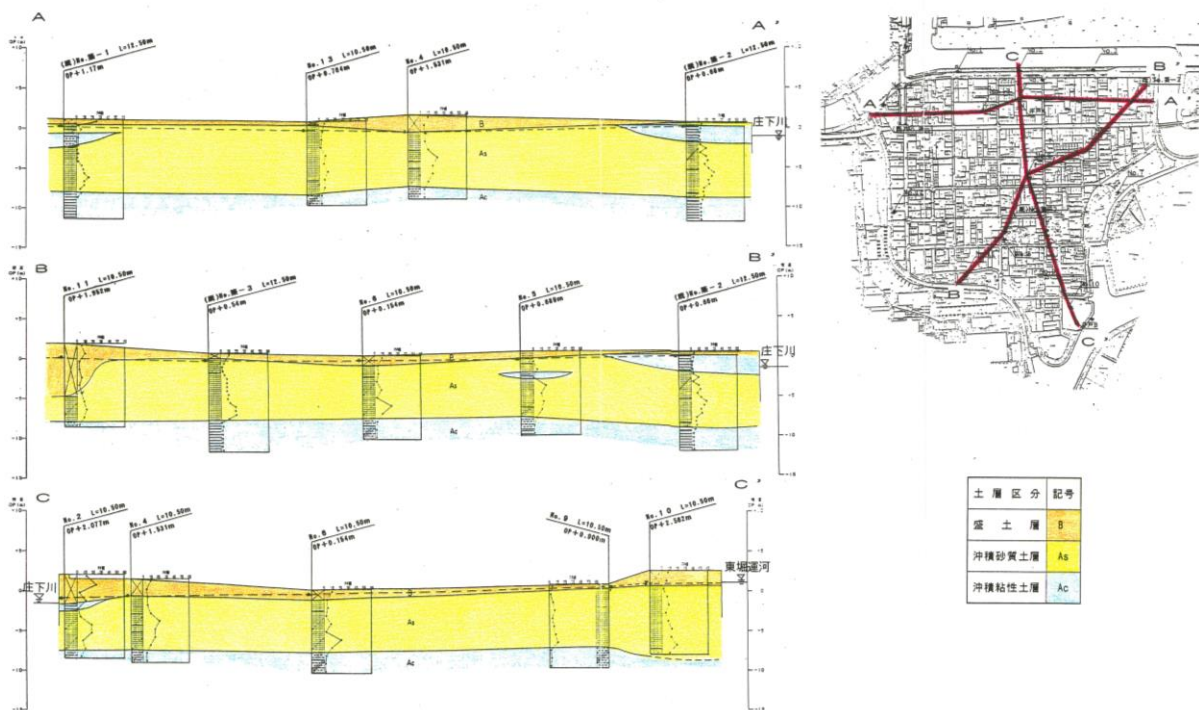


図-3 築地地区の東西地盤断面

(4) 沖積砂層の地下水の状況

地下水位低下工法の適用性を検討するために、**図-4**に示すように、揚水井戸が2本、観測井が14本設置された。2本の揚水井戸A、Bを使用し、各々単独に揚水した場合、2本同時に揚水した場合など3ケースの揚水試験を実施し、地下水定数（地下水位の変動、透水係数、貯留係数）や揚水による水位低下量予測、ならびに周辺河川運河からの漏水についても検討された。その結果、地区内の常時の地下水位は、南の東堀運河側が高く、北の庄下川側が低く、東堀運河からの漏水が想定されることが確認された。庄下川の河川水位の影響はほとんど受けていないことも確認された。東堀運河からの漏水の影響で、地区南側の地下水は塩水化されていることも判明した。

揚水試験時の地下水位の変動を**図-5**、**図-6**に示す。東堀運河の水位は潮位に連動してO.P.+0.4～1.2mの範囲で変動しているが、尼崎閘門の働きで満潮時がカットされた動きをしている。庄下川の水位はO.P.-1.2～-1.0mの範囲に制御されているが、降雨があれば急激に上昇し、排水ポンプが稼働すると元の水位に戻るといった動きをしている。東堀運河や庄下川の変動に地下水が直ちに大きく反応していないことから、東堀運河からの漏水も大きなものではないと判断できる。

試験の結果判明した地下水定数は次のとおりであった。

透水係数 $=1.45 \times 10^{-2} \sim 3.37 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、平均 $2.27 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$

貯留係数 $=0.22 \sim 0.37$ （東堀運河に近い揚水試験値が大きい）

塩分濃度 $=0.03 \sim 2.09\%$ 、平均値 $=0.76\%$ （庄下川 $=0.03\%$ 、東堀運河 $=2.31\%$ ）

揚水試験後の塩分濃度は若干低下した。

また、沖積粘土の圧密特性を調査するために、沖積粘土の連続サンプリングと詳細な土質試験を実施した。圧密沈下量についての検討結果では嵩上げ盛土（1.5m）と地下水位低下（最大1.5m）により、20cmを越える圧密沈下の発生が予測された。ただし、過去の地盤沈下で沖積粘土層の上層は圧密が進行し過圧密状態にあることなどから、盛土や地下水位低下による圧密の進行はゆっくりと現れるので直接基礎の多い当地区では大きな問題にならないと判断された。



図-4 揚水井戸と水位観測井位置図

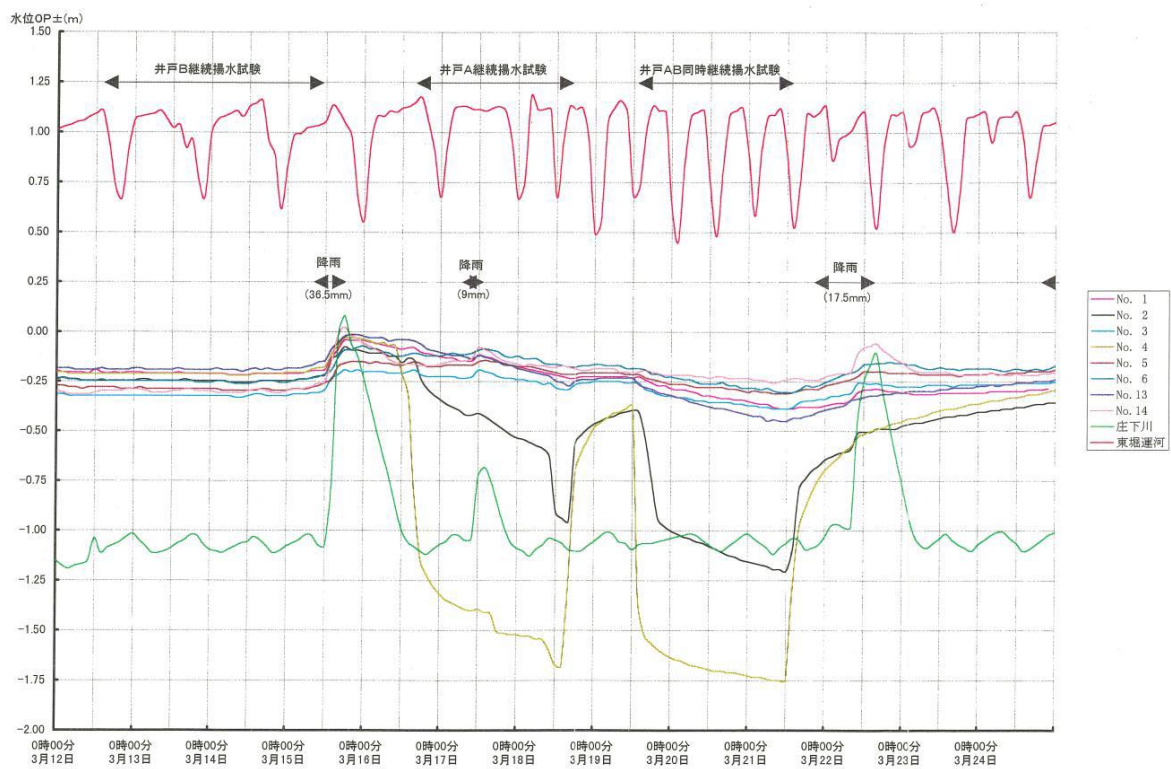


図-5 地区の北半分の揚水試験時の地下水位の変動（観測井No.1~6、13、14）

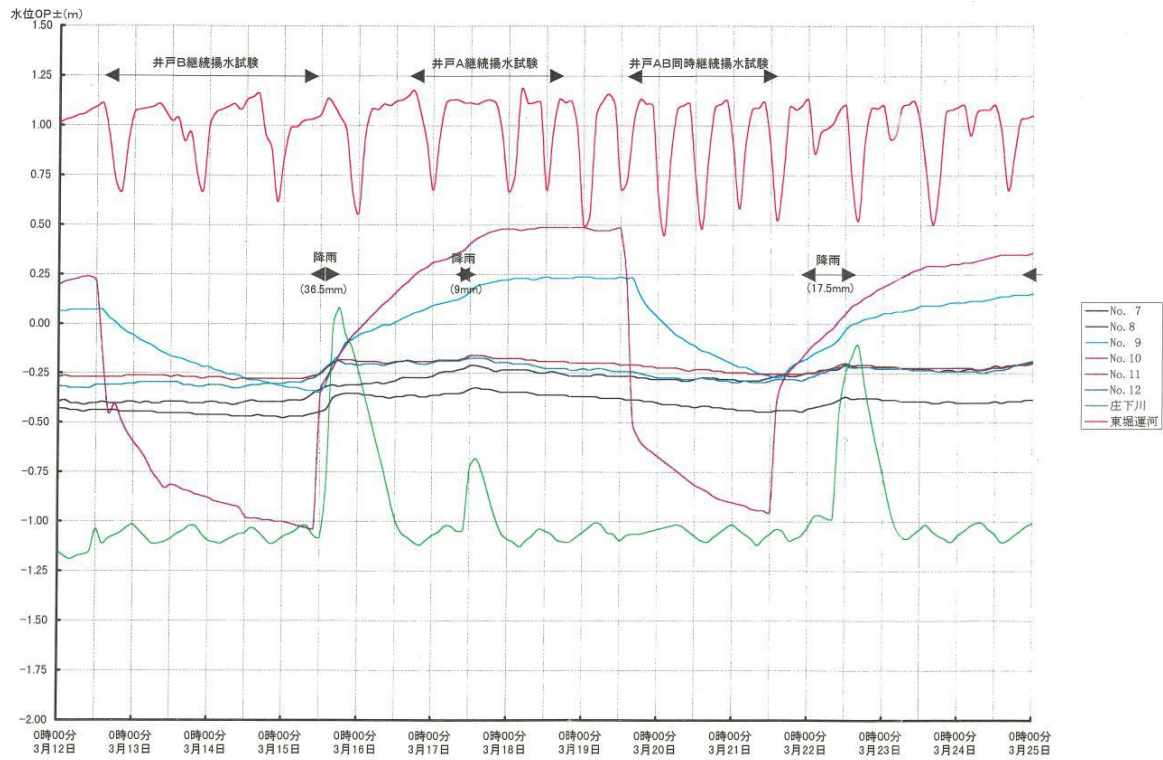




図-6 地区の南半分の揚水試験時の地下水位の変動（観測井No.7~12）

(5) 地下水位低下工法の概要

地下水位低下工法にはいくつかの方法が考えられたが、街路の耐震化が主目的であること、液状化対象地盤が有する透水性に適した工法であること、旧地盤面からでは透水管設置のための掘削深度が浅くてすむことなどから街路下に沿って透水管を埋設し、地下水を何カ所に集めて排水することが経済的であり、施工も容易であることで実施された。

尼崎市は瀬戸内海気候であるために年間降水量が1,300mm弱である。この降雨のうち地中に浸透するのは、尼崎市の下水道への流入実績から求めると20%程度と見込まれた。この場合、地区での年間の揚水量は $13.7\text{ha} \times 0.2 \times 1.3\text{m} = 35,620\text{m}^3/\text{年}$ となり、これは1日にすれば $97.6\text{m}^3/\text{日}$ 、1時間にすれば $4.1\text{m}^3/\text{h}$ となり、特別に大きな値ではないことから、小型のポンプ施設で足りるものと判断された。

これ以外には運河や河川からの漏水と陸続きの東西の地区外からの流入であるが、これも大きなものではないと揚水試験結果から判断し、透水管の敷設で十分な水位低下が得られると判断した。設計上は時間雨量10mm/hに対応することで、透水管の管径200mm、場外へ排水する末端近くで北部が300mm、南部が350mmとした。設計時の透水管の設置位置は外周には設置しなかった。内部の街路も地下水位低下に必要な経路だけに限定し、のような配置としていたが、実際の施工に当たっては、安全性を高める観点から、ほとんどの街路に設置することとされた。

場外へ排水するピットは庄下川に排水する北西部と東堀運河に排水する南東部の2箇所とした。地下水位が高く、東堀運河からの漏水が懸念される南東部の負担面積は $24,100\text{m}^2$ （地区面積の17.6%）、残りの面積 $112,900\text{m}^2$ （地区面積の82.4%）を北西部の排水ピットへ集水することにした。透水管の設置断面と工事断面をに示す。掘削幅は950mm、掘削深度は地表面標高と埋設標高で決まり、概略の掘削深度は2,000～3,500mmである。透水管は高密度ポリエチレン管を使用し、その廻りにはフィルターとして単粒度砕石4号（20～30mm）を厚さ635mmほど入れ、その砕石全体を不織布で巻き込み、フィルターへの砂の流入を防いでいる。

築地地区での耐震化は、盛土による地盤の嵩上げが行われたために、地下水位低下量が少なく済み、透水管敷設工事費も安価であった。さらに、工事開始後透水管が一部埋設されてきたので1998年頃、この透水管を使った揚水試験も実施している。ポンプを稼働させると、透水管埋設範囲内では容易に水位を低下できることが確認された。

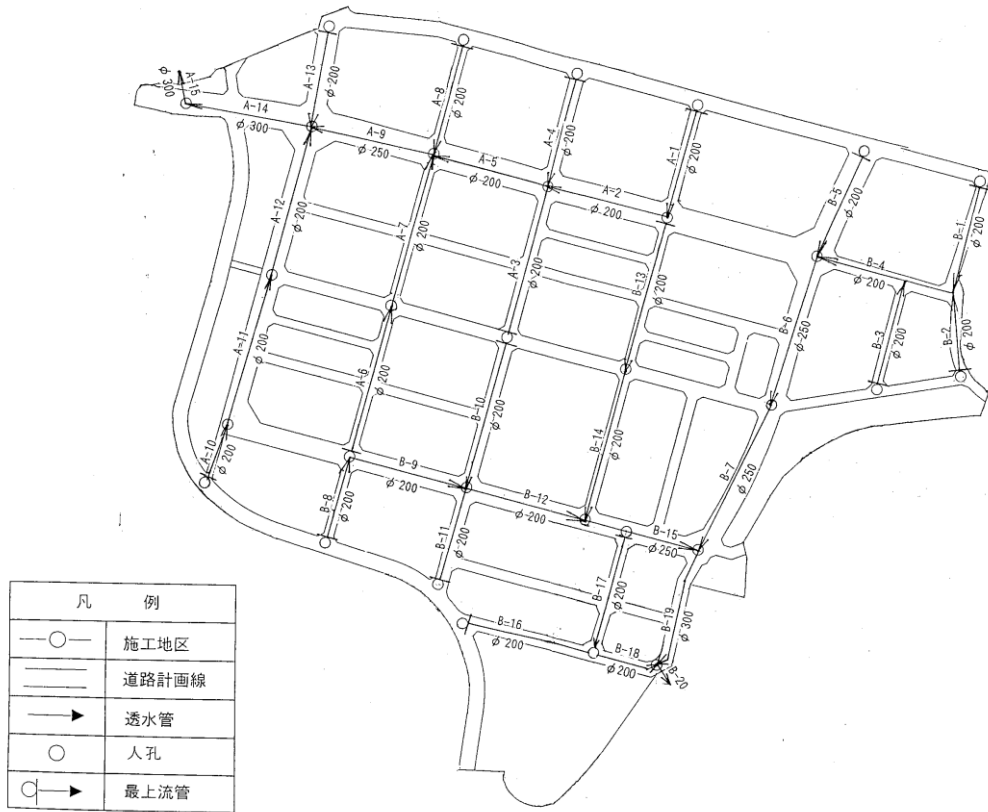


図-7 透水管の配置 (当初設計)

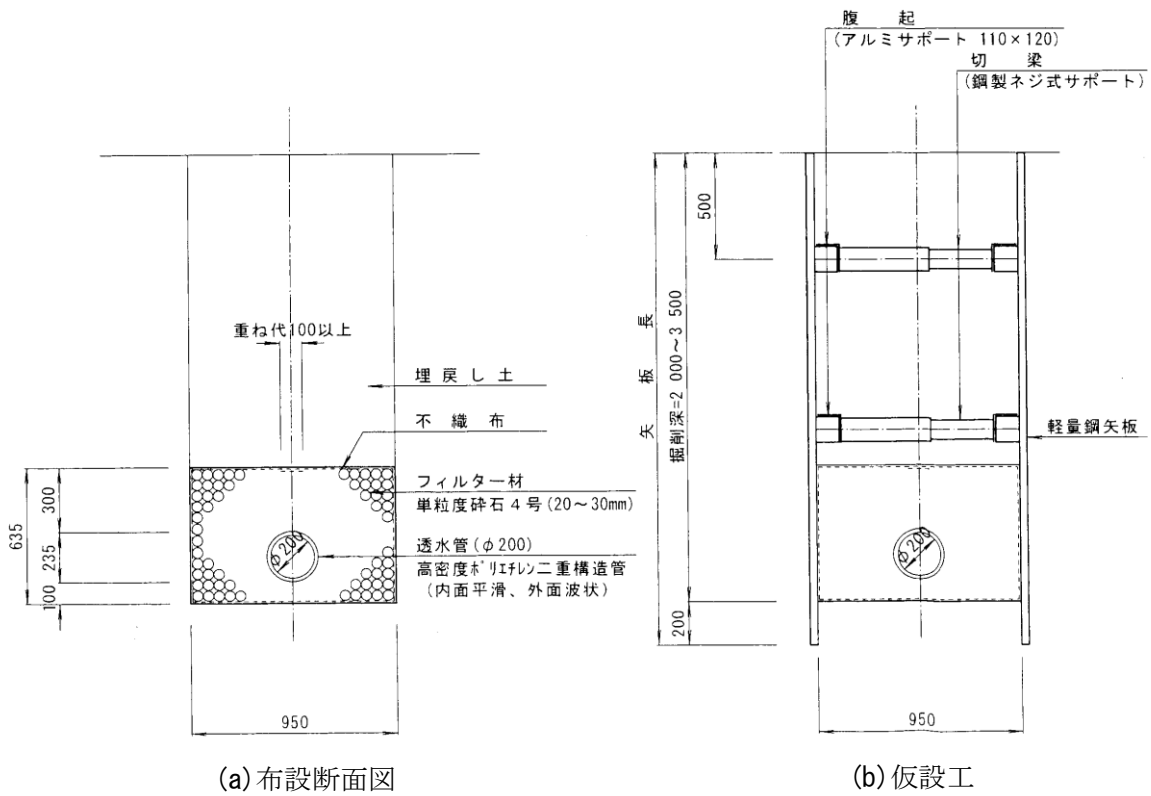


図-8 透水管設置断面ならびに工事概要図

5-9 山本団地地区における自然流下方式による地下水位低下工法実施例 (2007年新潟県中越沖地震における液状化対策)

(出典 地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書、pp3-7-1～3-7-12、2009.)

(1) 地震の概況

2007年7月16日10時13分頃、新潟県上中越沖(新潟の南西、約60km)の深さ約17kmで、マグニチュード6.8の地震が発生した。柏崎市、刈羽村、長岡市で震度6強、出雲崎町、上越市、小千谷市で震度6弱を記録した。同日15時37分頃、マグニチュード5.8の最大余震が発生し、最大震度は6弱であった。

以下に、図-1本震における震度分布と図-2余震の発生状況を示す。

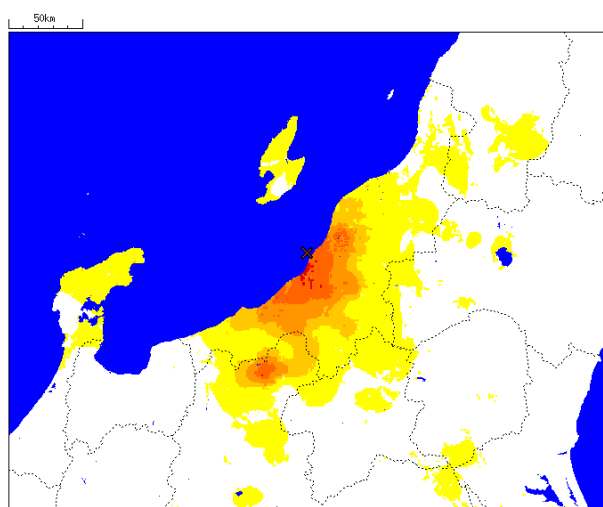


図-1 本震における震度分布(気象庁HP資料)

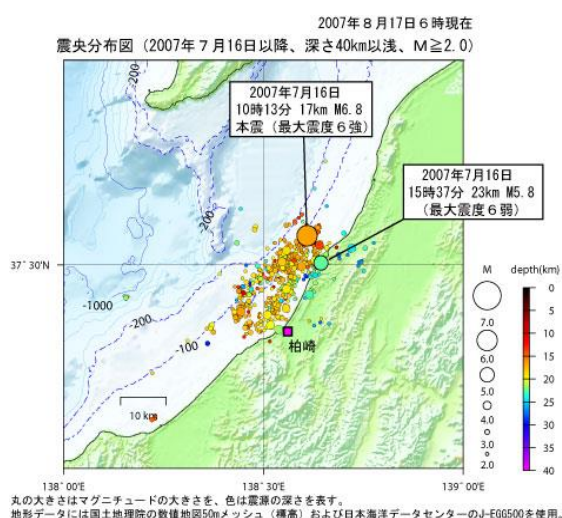


図-2 余震の発生状況

(2) 新潟県中越沖地震の被災状況

新潟県中越沖地震により、柏崎市内の死者は14名に上り、建物被害は、柏崎市の住居31,839棟のうち28,426棟と、約9割の住宅が何らかの被害を被った。ライフラインにおいては、ガス管内へ地下水と土砂が入り込んだため、ガスの復旧に最も時間を要し、一日最大2,500人の支援があったにもかかわらず、全面供給したのが、1ヶ月を大幅に過ぎた8月26日だった。交通機関では、信越本線が青海川駅西側の大規模な土砂崩れにより、59日間に渡り全面運休となった。

また、原子力発電所立地地域を襲った大規模な地震であったことが特徴で、世界最初の事例となった。避難勧告と非難指示は合わせて16箇所、152世帯、421人を対象に発令した。避難所は、震災の翌日には82箇所になり、11,410人が余震への不安、ライフラインの断絶等で避難した。応急仮設住宅は、被災地域の小中学校のグラウンドを除く、公共施設を対象に39箇所に建設した。復興公営住宅は、高齢者の入居を考慮し、市街地の利便性の高い、柏崎駅前に140戸、中心部に30戸、西山町の旧西山町役場前に30戸の合計200戸を平成21年8月までに建設し、順次入居を開始した。

(3) 山本団地の概況

山本団地は、図-3に示すようにJR柏崎駅より北東約4.5kmに位置し、地区西側に鯖石川が流れている。昭和46年に水田を埋め立てて造成された図-4に示すように標高7m程度の造成団地で、裏側に標高約70mの小高い砂丘を抱え、この砂丘上の縁辺部の一部を階段状に造成されていた。柏崎市では、都市計画法に基づく開発行為の許可申請の適用は、昭和50年からなので、それ以前に造成された宅地であった。地盤は、砂地盤で地下水位が高かった。

(4) 山本団地の被災状況

1) 被災概況

地震動により、図-5に示すように標高70m程度の小高い砂山が地すべりを起し、団地の上部に迫り、被災を受けた。団地北側の地区は、地滑り対策のため、新潟県が「災害関連緊急急傾斜地崩壊対策事業」を導入し、復旧を行った。この区域が、特に液状化現象により、大きく被災を受けた区域となった。



図-3 柏崎市街地の地質分布図



図-4 山本団地の周辺概況



図-5 山本団地の被災概況

2) 団地内の被災状況

写真-1では、裏山の砂山が住宅地へ地すべりをおこしたものである。写真-2は、すぐそばの柏崎市道が液状化により被災したもので、写真の左側が二級河川鯖石川である。このあたりで、約3m沈下し、奥に見えるごみ焼却場の約60mの煙突が、地上から20mで地震動により座屈した。



写真-1 砂山の宅地へ地すべり



写真-2 液状化による柏崎市道の地すべり

3) 団地内の液状化状況

写真-3は、液状化により宅地が変動し、基礎が浮き上がり、建物が破損したものである。写真-4は、地震動及び液状化により舗装版が大きく変動し、舗装版が破損した。



写真-3 液状化による宅地被害



写真-4 液状化による舗装版の破損

(5) 山本団地の被災要因と復旧方法

山本団地は、被災建築物応急危険度判定の結果、団地戸数129戸中49戸が危険度判定要注意以上となった。被災を受けた要因としては、地下水位が高い砂地盤の宅地であり、その地盤の砂の粒子が均一であることから、元から液状化が発生しやすい状況であったところに、地震動によって液状化現象が起こったといえる。復旧の方法として「大規模盛土造成地滑動崩落防止事業」を導入するにあたり、宅地耐震化のスキームである「造成宅地防災区域」の新潟県指定が平成19年12月21日公示された。

対策工法は、砂地盤の液状化対策として、深さ2~3mに暗渠管を布設し、地下水位を低下させ、地震発生時に生ずる間隙水圧の低減を図ることとされた。

(6) 自然流下方式による液状化対策

1) 工事概要

大規模盛土造成地滑動崩落防止事業の工事概要は、以下の通りである。図-6は、暗渠管の断面図で、地下2~3.5mの深さに、直径20cmから30cmの暗渠排水管を布設し、管の廻りには吸出し防止シートを巻き、その上には、フィルター材としてクラッシャーランを埋め戻す。

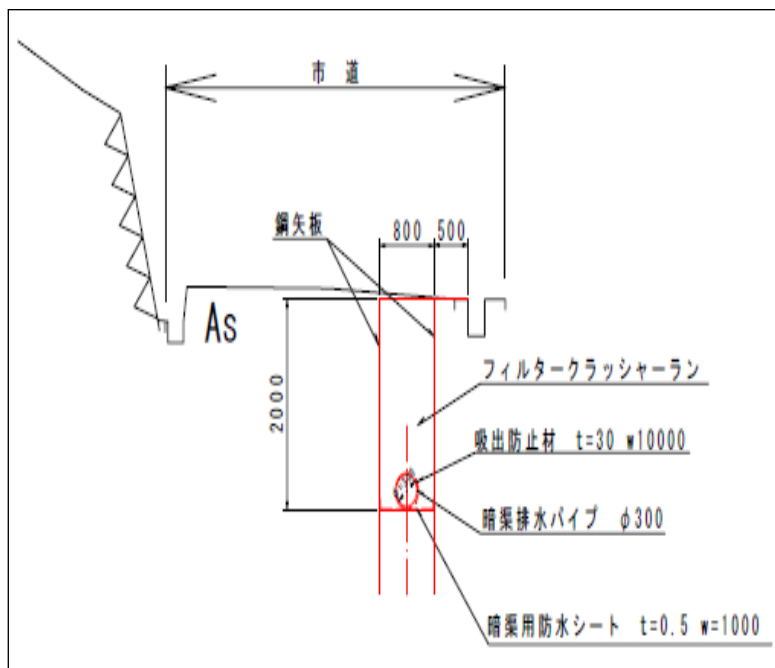


図-6 暗渠管断面図

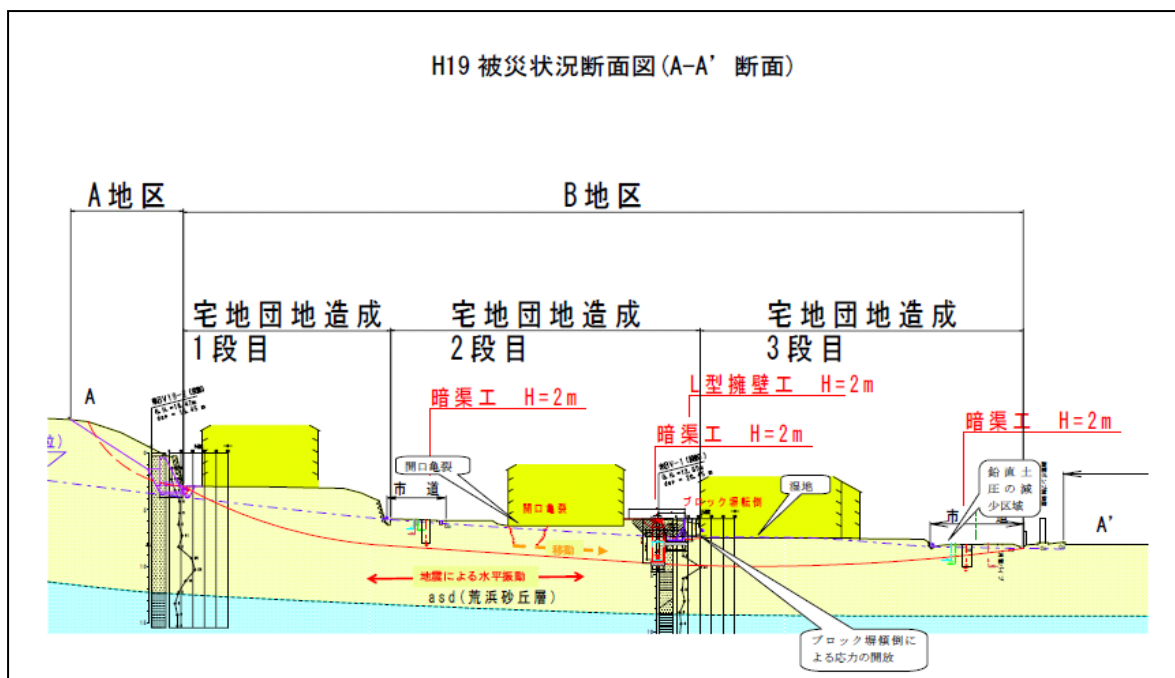


図-8 山本団地の横断面及び暗渠排水管位置

2) 工事状況

写真-5は、団地の2段目と3段面の中間の暗渠管布設位置で、段差は1.5mくらいあった。写真-6は、暗渠排水管の布設状況で、土被り2~3mに暗渠管が布設された。地下水位が高いので、ウエルポイントが布設され、地下水の低下を図りながら工事が進められた。



写真-5 暗渠管布設位置



写真-6 暗渠排水管の布設状況

3) 工事見学会

写真-7、写真-8の写真は、平成20年7月末に実施した地元住民への工事見学会の状況である。柏崎市が事業主体となっており、地域住民に現地の水の出具合や、工事の難しさ等を確認してもらうため、実施された。このような見学会等を通じて工事に対する住民理解が促進され、大量の地下水を一刻も早く排除する工事を進める要望や、工事関係者への現場の苦勞に対しねぎらいの言葉があった。



写真-7 工事見学会の状況



写真-8 工事見学会の状況

(7) 住民との合意形成

滑動崩落防止工事等の事業主体は、造成後の団地における地域住民では困難であり、一日も早い復旧に向け、地方公共団体の支援が必要であった。そして、当時の事業メニューにおいて、私有財産である土地の復旧についての公的支援として、大規模盛土造成地滑動崩落防止事業が検討された。

今後予測される地震に備えた未然防止工事には、住民負担が伴うため、合意を得るのは困難であったが、復旧に向けた住民の思いとしては、団地造成後30数年を経過し、「この地での再建」、「今まで築いてきたコミュニティを守りたい」、「個人個人でなく、地域全体で地盤を復旧したい」という強い思いがあり、地域が復旧に向けたまとまりを有していた。

行政としては、地域全体で地盤変動していることから、その原因の追跡のため、地域全体の地質調査を実施し、また、住宅も被災しているため、地元住民の負担軽減を国や県に要望しつつ、大規模盛土造成地滑動崩落防止事業の被災宅地への適用を推進した。

その結果、復興基金の受け皿や、その後の管理を担う、「山本団地宅地管理組合」を地元主導で設立し、市も参加することで、住民との合意形成を図った。この管理組合の役員と協議を重ね、地元負担分の分担金の考え方を整理し、地元負担額を4,000万円としつつ、市が賦課徴収権者となり、また、市で工事発注を行うこと等により、同事業をまとめることができた。

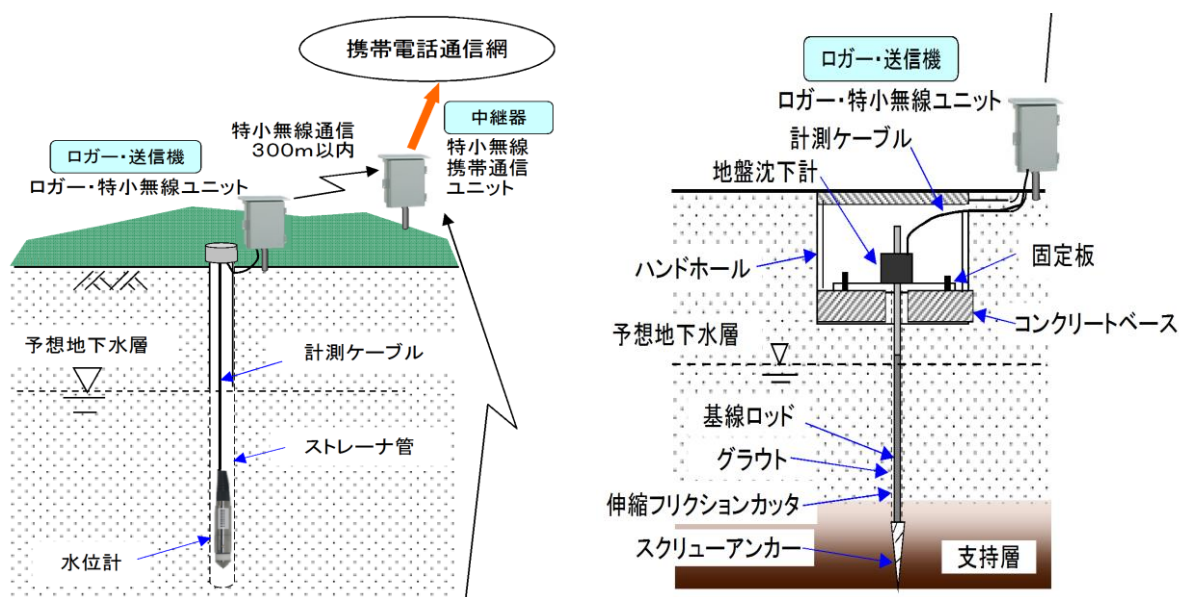
5-10 効果検証確認を目的とする「自動計測システム」について

(1) 自動計測システムの考え方

液状化対策後の観測は継続して行うことが望ましく、季節変動を考慮して地区全体の工事終了から最低1年間を行うこととしている。このため、将来的には地下水位や地盤の情報を以下に示すような自動モニタリングシステムを構築することにより、データの信頼性向上、防災精度向上を目指す検討を行う。

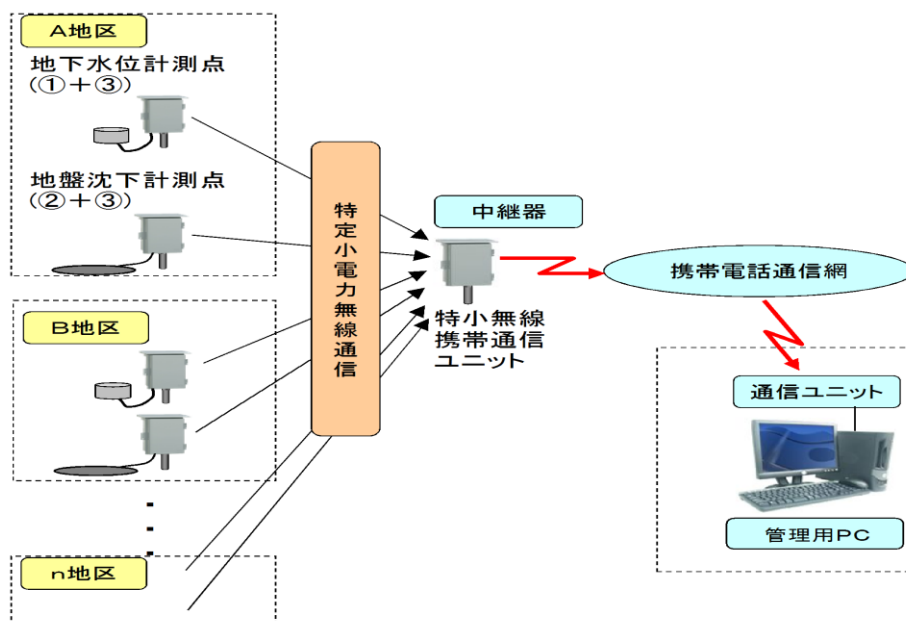
①特定小電力無線+携帯電話通信方式による自動モニタリングシステム (図-1)

②個別携帯電話通信方式による自動モニタリングシステム (図-2)



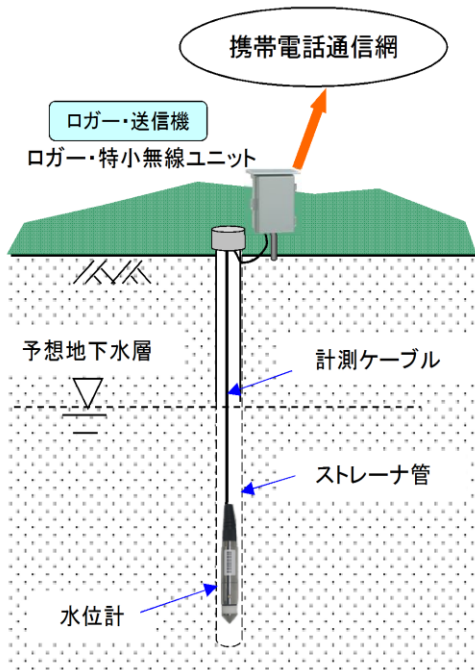
(a) 地下水位計測

(b) 地盤沈下計測

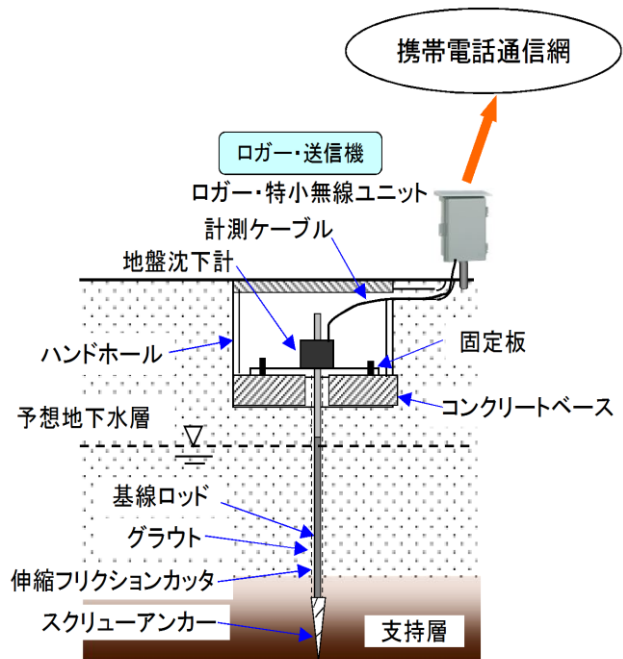


(c) 自動計測システム

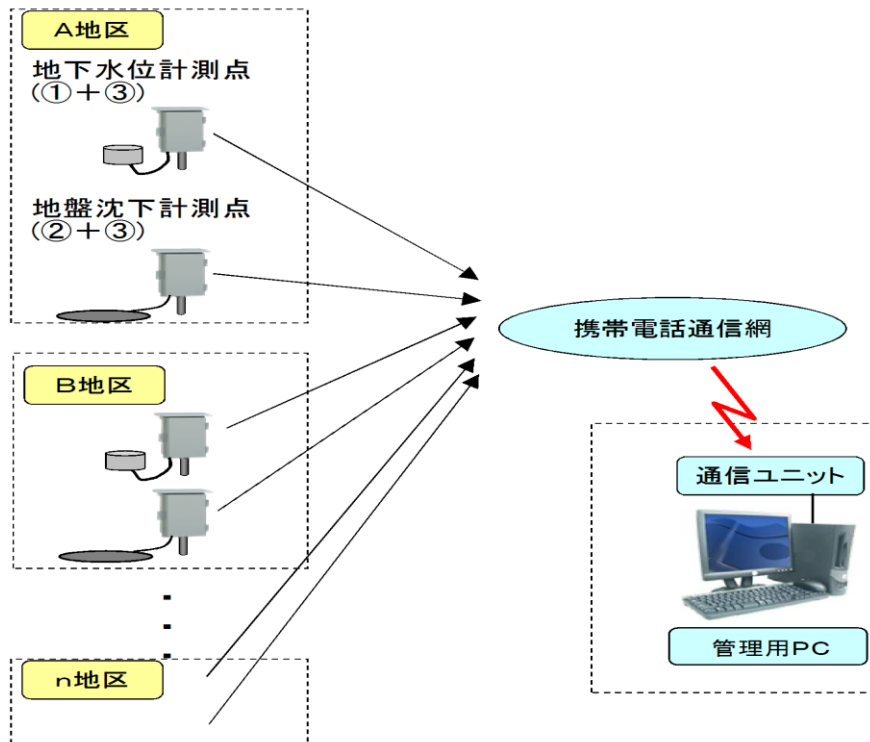
図-1 特定小電力無線+携帯電話通信方式による自動モニタリングシステム



(a) 地下水水位計測



(b) 地盤沈下計測



(c) 自動計測システム

図-2 個別携帯電話通信方式による自動モニタリングシステム

(2) 手動から自動化にするメリット・デメリット

手動から自動化にするメリット・デメリットを表-1に示す。

表-1 自動化にするメリット・デメリット

メリット	デメリット
<ul style="list-style-type: none">データの即時性が確保されるデータに異常が出たときにすぐに対応できるデータの共有化が容易に図れる(WEB 閲覧)	<ul style="list-style-type: none">機器設置など初期投資コストがかかる

(3) コスト面での比較

コスト面での比較は、沈下計や水位計の箇所数から一日1回送信 or 回収(土日除く)、年間継続を考慮して設置費及びランニングコストを表-2のように比較する。

表-2 手動・自動のコスト面での比較

手動	自動
<ul style="list-style-type: none">データ回収・整理車両その他原価一般管理費	<ul style="list-style-type: none">計測機器費施工費定期点検費通信初期費通信維持費バッテリー材料費その他原価一般管理費 -
計	計

(4) 通信に関する資料

即時性が求められているため、沈下計箇所は必須、沈下発生の誘因確認のため対応する水位観測孔も自動化する必要がある。

(5) 自動化の妥当な設置数

自動化の妥当な設置数は、全箇所必要なのか、どの程度の間隔なのかについて各地区の地盤や環境条件が異なるために、液状化検討委員会で検討する必要がある。沈下計箇所+近傍の水位計を自動化するのが妥当と考える。ただし、観測孔の水位が現在において低い個所でも、季節変動等で高くなる可能性もあるために観測は必要と考える。

(6) 将来の管理方法

通信費、解析費等については、誰が管理していくのか、変状が起きた場合の因果関係検討、対応方法の検討等が必要となるため、コンサル等に委託することが望ましいと考える。