昨今の地震で提起された地盤改良の課題とその後の対応

安田 進*

Problems of Ground Improvement Raised in Recent Earthquakes and Their Subsequent Response

by

SUSUMU YASUDA*

In the field of earthquake engineering, many problems have been raised in past large earthquakes, and subsequent research and technical development are being carried out. Three important problems of ground improvement raised in recent earthquakes are introduced in this paper. Since the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake caused a very strong shake, it was necessary to consider a new design philosophy concerning liquefaction countermeasure that can withstand extremely strong shake. Therefore, not only the occurrence of liquefaction but also a new evaluation method to estimate the deformation of the structure was introduced. The 2004 Niigataken Chuetsu Earthquake caused severe damage to residential complexes developed by artificially embanking at hills and terraces. Therefore, researches on appropriate ground improvement method to prevent slide of the embankment slope began. The 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake demonstrated the need for a new concept of measures to prevent liquefaction in areas encompassing houses, roads and lifelines because liquefaction occurred in many residential areas. Then a new project to improve the liquefiable soil of an entire area by lowering water table started.

Key words:

Ground improvement, Earthquake geotechnical engineering, Liquefaction, Countermeasure, Kobe Earthquake, Niigataken Chuetsu Earthquake, Great East Japan Earthquake

1 緒 言

地盤工学のうちの地震時の問題を扱う「地震地盤工学」の分野では、大きな地震の度に課題が与えられ、それを解決すべく、種々の研究・技術開発が行われてきた。地盤改良技術もそうである。1964年新潟地震の際、液状化により構造物に甚大な被害が発生し、液状化対策の必要性が広く認識されたため、締固めなど種々の地盤改良による対策工法が熱心に開発される契機となった。その後もいくつかの地震を契機に、地盤改良に関する新しい研究、技術開発が行われてきた。そこで、近年の三つの地震をとりあげ、そこで提起された地盤改良に関する課題と、その後の研究・技術開発に関して述べてみる。

2 地盤改良に関して昨今の地震で得られた知見や提起された課題

地震時の地盤関係の災害には、地盤の液状化、盛土の変状、斜面崩壊などがあるが、特に液状化に関しては地盤改良により対策を施し得るので、多くの地盤改良工法が研究・技術開発されてきた。その大きな契機となったのは1964年に発生した新潟地震である。液状化が発生したヤード内においてパイプロフローテーションで締め固めてあったタンクが沈下による被害を免れたことにより、締固めが液状化対策に有効であることが示され、以降液状化対策工法に関して熱心に研究・技術開発が行われるようになった。これ以降の地震でもいろいろな新しい知見

が得られ、また課題が提起されてきた。主なものを挙げると以下ようになる。ただし、ここに示した以外に、個々の地盤改良工法の効果が明らかにされた事例が多くあるが、ここには載せていないことをお断りしたい。

①1964年新潟地震：パイプロフローテーション工法により締め固めてあったタンクでは液状化被害が発生しなく、締固めが液状化対策になるとの知見が得られた。

②1968年十勝沖地震：八戸の工場において、種々の構造物を建設するにあたって新潟地震の経験をもとにパイプロフローテーション工法で締め固めて液状化対策を施していた構造物は、周囲が液状化しても被害を受けなく、対策効果が確かめられた。

③1983年日本海中部地震：液状化で被災したいくつかの構造物(秋田港岸壁、国道能代南バイパス、国道昭和・飯田川バイパス、八郎潟干拓堤防)に対し、原形復旧ではなく液状化対策を施して復旧することが行われるようになった。

④1993年釧路沖地震：釧路港において、無対策の岸壁が液状化で被災したのに対し、既設の岸壁にサンドコンパクション工法とグラベルドレーン工法併用で液状化対策が施されていた岸壁は被害を免れた。

⑤1995年阪神・淡路大震災：レベル2地震動に対する設計・対策が必要となり、地盤改良により液状化の発生が防げない場合には、液状化しても構造物の機能が損なわな

† 原稿受理 平成29年 5月15日 Received May 15, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 東京電機大学 理工学部 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂
School of Science and Engineering, Tokyo Denki University, Hiki-gun, Saitama 350-0394.

ければ良いとの考えが導入されるようになった。これに伴って性能設計によって液状化対策効果を評価することも行われるようになった。

⑥2004 年新潟県中越地震：丘陵の盛土造成宅地の被害が目立ってきたため、地盤改良などにより既設の盛土造成宅地の地震対策を施す必要性が認識され、宅地造成等規制法の改定や宅地耐震化推進事業の創設が行われた。また、埋戻し土の液状化による下水道管渠・マンホールの被害も目立ってきたので、埋戻し土にセメントを混ぜるなどの対策を施すことが規定された。

⑦2011 年東日本大震災：多くの住宅地で戸建て住宅や道路・ライフラインが液状化により被害を受けたため、復旧にあたって地区全体に液状化対策を施す市街地液状化対策事業が創設された。

さて、①から⑦のうち、以下には、三つの地震で提起された課題とその後の対応状況について述べる。一つ目は 1995 年阪神・淡路大震災で出されたレベル 2 地震動に対する地盤改良効果の評価方法の変化である。二つ目は 2004 年新潟県中越地震を契機に検討が進められている既設の盛土造成宅地の対策である。そして、三つ目は 2011 年東日本大震災でクローズアップされた住宅地全体における液状化対策である。

3 1995 年阪神・淡路大震災を契機とした地盤改良効果の評価方法の変化

液状化の発生の予測方法は 1995 年に阪神・淡路大震災が発生した頃にはかなり確立されてきていた。その当時の液状化に対する設計震度（地表最大加速度を重力加速度で除した値と同じ意味を持つ）は 0.2 前後（現在で言うレベル 1 地震動）に設定される構造物が多く、液状化が発生するか否かの限界 N 値は 10 前後であった。ところが、阪神・淡路大震災では神戸市などで大きな震動を受けたため、耐震設計にレベル 2 地震動を考慮する必要性が出てきた。このレベル 2 地震動のもとできれいな砂地盤において液状化が生じる限界の N 値を試算すると、20～25 程度となってしまった。したがって、例えば地盤を締め固めて N 値が 10 以上になるように対策をとっていても液状化の発生を防止出来ないことも起きてくる。ただし、 N 値が 10～25 の地盤が液状化するとしても、地盤はある程度密なため、そこにある構造物が大きく沈下したり浮き上がることはないと考えられる。このような事により、レベル 2 地震動を考慮する場合は、液状化の発生の有無だけでなく、構造物の変形、変位量で安定性を評価することが必要となってきた。

また、この地震を契機に多くの構造物の耐震設計に性能設計の考えを導入しようとの機運が高まってきた。構造物によって性能設計の考え方も少し違っているが、液状化に関しては、過去の被災事例を見ても構造物のコンクリート製や鉄製の構造的な構造上の被害は少なく、構造物全体が沈下や浮上、移動することが問題なため、性能を構造物の変形量で評価することが妥当と考えられた。

以上のように、液状化に関する研究・技術開発の歴史の過程からみて、阪神・淡路大震災頃から液状化による構造物・地盤の変形・変位量をもとにした性能設計を導入する必要性が出てきて、それに向かって研究や技術開発が盛んに行われてきている。性能設計方法を取り入れる場合、性能目標値の設定と性能評価方法の確立とが必要となる。液状化に関しては、これらは①変形・変位量の許容値の設定、②液状化した地盤および構造物の変形・変位量の推定方法の確立、と言い換えることが出来る。

液状化に対する構造物の許容変形・変位量に関してはいくつか研究が行われ、一部は設計基準類にとり入れられるようになってきた。ただし、設定にあたっては下記のような種々の事項を考慮する必要がある、多くの構造物ではまだ検討が進められてきているところである。

- a) 構造物の構造安定上からみた許容変形・変位量
- b) 構造物の重要度や復旧のし易さからみた許容変形・変位量
- c) 構造物を利用する機能上からみた許容変形・変位量
- d) 対象構造物が近接構造物や社会生活に与える影響からみた許容変形・変位量
- e) 地震後の緊急対応やその後の本復旧からみた許容変形・変位量

そこで、単なる筆者の私見であるが構造物ごとの許容変形・変位量の大きな値を示してみると Fig. 1 のようになり、構造物によって異なるが許容変形・変位量は数 10cm から 2m 程度であり、このような大きな変形量を推定する必要がある。

一方、液状化した地盤および構造物の変形・変位量の推定方法は従来至難の業とされてきたが、近年、いくつかの手法が開発されてきている。これらを大別すると Table 1 の三種類となる。これらのうち、動的解析方法は、通常の時刻歴地震応答解析に特に液状化による変形を考慮に入れた方法である。時刻歴地震応答解析で液状化の発生を解析することに関しては既に多くの技術開発が行われているが、液状化後の大きな変形・変位まではなかなか解析できるまでは至っていなかった。ところが最近、変形・変位の解析の必要性が出てくるとともに、大変形まで解析

Structure	Deformation or displacement	Upper limit of allowable value		
		0	1	2 (m)
River dike	Settlement			
Road or railway embankment	Settlement			
House or building	Settlement			
Sewage manhole	Uplift			
Quay wall	Horizontal movement			

Fig.1 Allowable values of liquefaction-induced deformation or displacement of structures.

Table 1 Methods to estimate liquefaction-induced deformation and displacement of structures.

Methods		Accuracy	Cost
Empirical methods		Moderate	Low
Analytical methods	Static	Fairly good	Comparatively low
	Dynamic	Good	High

Fig.2 Countermeasure methods applicable to existing river dikes.

Fig.3 Settled river dike along the left bank of Eai River during the 2011 Great East Japan Earthquake.

できるように改善されるものが出てきている。これに対し、静的解析方法は大変形を考慮できる物性を用いて解析するように開発されており、液状化後の変形・変位量を求め易いようになってきている。ただし、動的解析に比べて精度は良くないし、また、変形の時間変化を解析できない。

さて、河川堤防では阪神・淡路大震災の後から耐震点検および対策が行われるようになってきた。この場合、レベル 2 地震動に対しては地震時の堤防の沈下量をまず推定し、堤防高が照査用外水位より低い場合には越水する危険性があると判断される。そこで、対策としては堤防の沈下量を減らすような方法をとる必要がある。既設の堤防に対する具体的な方法としては Fig.2 に示すような方法が挙げられ、実際に対策工事も始められている。基礎地盤が液状化すると堤防は外側に流れ出すように拡がりそれに伴って堤防が沈下するので、その動きをくい止めるよう

に法尻付近を地盤改良したり矢板を打つと良い。一方、堤体が液状化する場合には法尻付近が外に膨れ出しそれに伴って天端が Fig.3 に示すように沈下する。これに対しては法尻付近の地盤を改良しても意味なく、ドレーン工で地下水位を下げたり押え盛土をするといった対策の方が有効となる。これらの対策工の設計にあたっては地盤改良の位置や幅・深さ、矢板の位置・根入れ長、ドレーン工の長さなどを適切に評価する必要がある。そこで、Table 1 に示した三種類の方法のうち、静的解析(照査)方法を用いて対策工の設計を行う方法の検討が行われ、2016 年 3 月に「河川堤防の液状化対策の手引き」²⁾が出されたところである。

4 新潟県中越地震を契機とした盛土造成宅地の地震対策(文献 3)より一部引用)

1968 年に発生した十勝沖地震の際、札幌市の南部の丘陵地の造成宅地で、谷埋め盛土部のすべりや沈下により 76 戸の住宅が被害を受けた。これが我が国において地震時に大規模な造成宅地で被害を受けた初めての事例と言えるであろう。続いて、1978 年の宮城県沖地震では仙台市の谷を埋めて造られた盛土の崩壊により多くの住宅が大きな被害を受け、造成盛土地の被害が注目された。その後、1987 年千葉県東方沖地震、1993 年釧路沖地震、1995 年阪神・淡路大震災、2004 年新潟県中越地震と被害が続くようになってきた。そして新潟県中越地震を契機に 2006 年には宅地造成等規制法が改正になり、既設の大規模盛土造成地に対して地震時の安定性を検討することが必要とされ、宅地耐震化推進事業が創設され、国交省からガイドラインも示された。ここでは震度法によるのり面の安定性の検討に 0.25 の水平震度を用いることになった。これに従って、全国の自治体で大規模盛土造成地の調査が始まった。ただし、危険箇所の対策を施すまでには至っていない。

これと同時期に地盤工学会関東支部では造成宅地の耐震調査・検討・対策に関する委員会を設置し、手引き書やケーススタディー集⁴⁾を作成した。そして既設の盛土のり面に対する崩壊の対策方法として、地下水位排除工、グラウンドアンカー工、地盤改良工、抑止杭工、鋼矢板工、押え盛土工を取り上げ、Fig.4 に示すように具体的なレイアウトも示していた。

さて、2011 年東日本大震災では、岩手県から茨城県にかけて多くの都市において丘陵地・台地の造成宅地の被害が多発した。特に仙台市の被害が多く、2013 年 7 月時点で 5,728 箇所の造成宅地が被害を受けたとされている。被害は住宅だけでなくライフラインや道路にも及んだ。宅地の被害の要因や形態は様々であったが、佐藤らはこれを Table 2 に示す 7 つの被害要因と 3 つの被害形態に分類している⁵⁾。このうち、谷埋め盛土では下流端ののり面のすべりだけでなくひな壇のすべりも発生した。これは過去の地震時にあまり指摘されてこなかった被害形態で

Fig.4 An example of countermeasure against sliding of filled sloping ground proposed before the 2011 Great East Japan Earthquake.

Table 2 Mechanism and pattern of the damage to residential complexes in Sendai City (Sato et al.⁵⁾).

Mechanism of damage	Pattern of damage
a) Slide of the soil filled on a valley	1) Sliding or deformation of filled slope
b) Slide of the soil filled on a slope	2) Settlement of filled ground
c) Differential settlement at the boundary between fill and cut	3) Slide or turn of retaining wall
d) Failure of slope	
e) Unstable retaining wall	
d) Loose filled soil	
e) Liquefiable filled soil	

あった。数は少ないがこの他にも、i)複数の谷の合流箇所に盛土した地盤に地震動が集中して大きくなり被災した、ii) 緩やかな傾斜地盤で過剰間隙水圧が発生し地盤の流動的なすべりが生じて被災した、といった被災形態もあったと考えられる⁶⁾。なお、甚大な被害宅地箇所では盛土の N 値が 0~4 程度で締固め度が 85% 以下の非常に緩い状態にあったことや、一部の地域では地下水位が地表面下 1~2m 程度と非常に高かった、といった特徴を佐藤らは挙げている⁵⁾。

滑動崩落が発生したような大きな被害箇所では「造成宅地滑動崩落緊急対策事業」が適用されて復興が行われてきた。これは盛土上に 10 戸以上の家屋が存在する区域で滑動崩落によって道路や避難地などに被害が及ぶおそ

Fig.6 Restoration work at Oritate 5-chome.

れがある場合に適用され、再度災害防止のために公共事業で行われた事業である。仙台市ではこの事業が 160 地区に適用された。具体的な対策工法としては、各地区の撤去状況や地盤条件などに応じて、抑止杭工(鋼管杭、矢板併用)、網状鉄筋挿入工、固結工、アンカー工、鉄筋挿入工、暗渠工が用いられた⁷⁾。全体の滑動崩落だけでなく、ひな壇の変形に対しても対策が施された点に特徴がある。Fig.5 に仙台市によって描かれた折立 5 丁目の対策工断面図の下流部の 2/3 を模式化したものを、また、Fig.6 に工事風景を示す。ここでは全体の滑動崩落は各ひな壇の基礎部に設置した固結工によって抑止し、固結工は基盤岩に定着させるようにされた。さらに、各ひな壇の変形は擁壁背面を固化材盛土工や網状鉄筋挿入工で抑止するようにされた。

このように、造成宅地滑動崩落緊急対策事業が適用された地区では滑動崩落・変形被害に対して対策が施されたが、Table 2 に示されるように、滑動崩落はしなくても沈下による被害も多く発生している。このうち液状化によって沈下・傾斜した家屋に関しては、地下水排除工で地下水位を下げた範囲の外に対して対策は施されていないことになる。また、切盛境界で生じた段差によって被災した家屋に対しても対策が施されていない。これらは今後の課題と考えられる。

さて、前述したように宅地耐震化推進事業によって、全国各地の大規模盛土造成地の調査が進められている。第 1

Fig.5 Restoration method at Oritate 5-chome (Modified from the report by Sendai City⁷⁾).

次スクリーニングで盛土箇所の把握が行われたのは、国土交通省によると平成 28 年 4 月 1 日時点で 950 市区町村に及んでいるが、その後詳細に検討する地区を抽出し、地盤調査を行い対策を施すまでにはしばらく年月がかかりそうである。

5 東日本大震災を契機とした市街地における地区全体の液状化対策(文献 8)より一部引用)

2011 年東日本大震災では青森県から神奈川県にかけて大変広い範囲で液状化が発生した。橋梁や中・高層ビルなどの大型の構造物においては、最近液状化対策が施されるようになってきているため、目立った被害が生じなかった。ところが、①まだ液状化を考慮した設計が行われていない戸建て住宅や平面道路、②設計に液状化が考慮されるようになる前に建設されたライフラインや河川堤防は、液状化により甚大な被害を受けた。特に関東地方では、東京湾岸や利根川沿いの埋立地に造成されてきた住宅地で液状化が発生したため、多くの戸建て住宅、平面道路、ライフラインが被害を受け、住民の生活に深刻な影響を与えた。

宅地地盤が液状化したことにより戸建て住宅は地盤内にめり込み沈下し、さらに傾いた。東京湾岸で被災した住宅地は埋立地に新しく造られており、住宅が規則正しく密集して建てられている地区が多かった。そこでは 2 棟や 4 棟の住宅が近接しているとお互いに内向きに傾いた。平面で見たときの傾斜方向の概念図を Fig.7 に示す。大きく傾いた住宅の中では住民の方々は眩暈や頭痛、はきけをもよおし、生活が困難になった。平面道路では、波うち・ずれや噴水・噴砂により通行が困難になり、路面の沈下による建物入口との段差によって出入りが困難になった。また、地震後しばらく経ってから陥没が生じて通行が困難になった地区もあった。さらに、道路が突き上げる被害も Fig.8 のように発生した。この突き上げる現象は過去の地震であまり目立たなかった特異な被害であった。今回の地震の規模は非常に大きくて長時間揺れが続いたため、液状化が発生した後も液体状になった地盤がゆっくりと大きく揺すられ続けて、このような被害が発生したのではないかと筆者は考えている⁹⁾。ライフラインでは上下水道、低圧ガス導管が甚大な被害を受けた。地中に埋設されているため、被災のメカニズムを特定できないが、これらにおける特徴は埋設管の継手ははずれる被害が多かったということである。過去の地震時の下水道の管渠とマンホールにおける被害パターンとしては、1993 年釧路沖地震で注目され 2004 年新潟県中越地震で広く認識されるようになったように、埋戻し土の液状化により浮き上がることが多かった。東日本大震災でも同様の被害が東北地方などで発生した。ところが、関東の住宅地では Fig.9 に示すように、管渠の継手ははずれ、マンホールがずれる被害が続出し、それらの中に液状化した泥水がはいったため浮上りはあまり生じなかった。このような被害が発生した地区では埋戻し土も含めて周囲の地盤全体が液状化

Fig.7 Effect of adjacent houses on the inclination of houses.

Fig.8 Thrust of an alley in Urayasu City.

Fig.9 Damage to sewage pipes and manholes due to the liquefaction of replaced soils and surrounding grounds.

し、上述したように液状化が発生した後も揺すられ続けたため、地盤の大きな変位により抜けやずれの被害が発生したものと考えられる⁹⁾。

液状化によって被災した家ではジャッキなどで家を持ち上げて基礎を補修し、水平に載せ直す「沈下修正工事」が各住宅で行われてきた。ところが、沈下修正工事だけでなく、将来の地震によって再液状化が発生し再び被害を受ける危険性がある。これに対して被害を受けないようにするには、Fig.10 に示すように、①被災した地区全体の家を取り壊し地盤改良など液状化対策を行って建て直す、②被災した個々の家のみ取り壊し液状化対策を施して建て直す、③被災した家の沈下修正を行った後に地区全体の液状化対策を施す、④被災した家の沈下修正を行った後に個々の家の対策を施す、の四つのケースの対策方法

Fig.10 Four patterns to reconstruct damaged houses and/or areas.

がある⁸⁾。①は従来から開発されてきた各種地盤改良工法を用いれば容易に行えるが、家を取り壊すのは現実的でない。②では狭隘な土地で工事をしないといけないので従来の大型の地盤改良装置は使えない。また、④のためには新しい工法を開発しないといけない。そのため、②や④でも可能な液状化対策工法が東日本大震災後に開発され実際に施工され¹⁰⁾たが、その数は少ない。

これに対し、③の考えによる「市街地液状化対策事業」が、地震の8か月後に国土交通省により創設された。これはある地区内の道路や下水道などの公共施設と民間の宅地とを一体化して、液状化対策を施そうとするものである。ただし、この事業に必要な費用は公共施設を公費で賄う一方、宅地内は住民が負担する方式であり、この事業を適用できる条件としては、①面積が3,000㎡以上でありかつ区域内の家屋が10戸以上のもの、②土地所有者・借地権者それぞれの2/3以上の同意が得られるもの、③公共施設と宅地との一体的な液状化対策が行われているものと認められるもの、とされた。なお、対策方法の検討にあたっては東日本大震災と同程度の揺れを設定するようにしている。

この事業では二つの大きな課題があった。一つめは技術的な課題で、既存の住宅地を家が建ったままでどんな方法で対策を施せるかであり、二つ目の課題は住民の合意形成をいかにとるかである。前者に関しては技術的に可能な工法が委員会で検討され、地区全体の地下水位を下げする方法と、各戸の宅地を格子状に囲って地盤改良する方法が候補に上がり、その調査・検討のためのガイダンスが国土交通省によって出された。そして、これをもとに、関東で被災した各自治体で検討委員会が開かれた。地下水位低下方法に関しては、すでに1995年阪神・淡路大震災で被災した尼崎市築地地区では復旧にあたり地下に排水管を設け、地下水位を下げる措置が行われていた。また、2007年新潟県中越沖地震で被災した柏崎市山本団地でも地下水位低下のために溝を掘り、そこに排水管を設置して2mほど地下水位を下げるが行われていた。ただし、東日本大震災で液状化した地区では下部に軟弱粘性土が厚く堆積している地区が多く、地下水位低下により有害

な地盤の沈下が生じるのではないかなど、検討を要する項目がいくつかあった。格子状改良は建物を新設する場合に最近多く使われるようになってきていたが、市街地液状化対策事業では既設の宅地の液状化対策として利用しようというものであり、格子の間隔・深さ・厚さ、隣接する狭隘な建物間での施工方法、工費、施工後の維持管理などの課題があった。

そこで、市街地液状化対策事業を進めるにあたって、実証試験も行って詳細な検討が行われた。地下水位低下工法に関しては、実証実験や被災状況の分析などがいくつかの都市で行われ、以下のような新しく有意義な知見が得られてきた。

(1) 地下水位の低下量の設定方法

液状化による戸建て住宅の被害と地下水位の関係については以前から調べられていたが、東日本大震災の被害に対しても国土交通省や各自治体などで地震後に調査が行われた¹¹⁾。その結果、今回被災した都市でもGL-3m程度まで地下水位を下げておくと、地下水位以下の層が液状化しても戸建て住宅のめり込み沈下は生じ難いことが明らかになってきた。そこで、現在地下水位低下で対策を検討している都市では、GL-3m程度まで地下水位を下げるように設定されている。

(2) 地下水位の低下方法

過去に地区全体の地下水位を下げた事例として、井戸で排水したタンクヤードや排水管を敷設した柏崎市山本団地などの事例があった。これらをもとにGL-3m程度まで下げるだけなら排水管方式が確実なため、千葉市¹²⁾などではFig.11、Fig.12(1)に示すように排水管を敷設し、地下水位をマンホールに集めてポンプで汲み出す方法で実験が行われた。ただし、下水道管などの災害復旧がこの事業の前に既に行われており、道路を再び掘り返したくないとの考えでFig.12(3)のように3m程度の深さの浅井戸で排水する方法で我孫子市では実験が行われた¹³⁾。さらに、住宅地内での施工時に家屋や塀などに変状を与えない方法として、Fig.12(2)に示す推進管方式も新たに開発さ

Fig.11 Plan of in-situ test site in Chiba City (Modified from the report by Chiba City¹²⁾).

Fig.12 Dewatering methods.

Fig.13 Change of water table during the test in Chiba City (Modified from the report by Chiba City¹²⁾).

Fig.14 Change of water table during the test in Abiko City (Modified from the report by Abiko City¹³⁾).

れ、千葉市で Fig.11 とは別の実証実験も行われて、実際に採用が決定され、施工されつつある。

(3) 排水管や浅井戸の設置間隔

東日本大震災の際に液状化で被災した住宅地の多くは 2 列の住宅が整然と並び、両側に 40~50m 間隔で道路がある配置となっている。この道路下に排水管を敷設するだけで宅地内の地下水位が下がらなければ、宅地内に排水管の枝管を入れないといけなくなり、その敷設の仕方や住民の費用負担の問題が生じてくる。そこで、Fig.11 に示すように道路下に排水管を平行に敷設した場合の地下水位分布が測定された。その結果、Fig.13 に示すように 40~50m ほど排水管が離れていても中央まで地下水位は下がることが明らかになってきた。したがって、当初危惧していた宅地内への枝管の敷設は不要になり、費用および工事の面で有用な知見が得られた。Fig.14 には我孫子で

行われた浅井戸方式での実験結果を示す。浅井戸の場合は設置間隔を排水管より狭くする必要があると考えられるが、この実験では半径 11m の範囲でも地下水位が下がっており、さらに設置間隔を広くとれる可能性があることも分かってきた。

(4) 地下水位低下に伴う地盤の沈下量の推定方法

地下水位低下の実証実験が行われた都市のうち、Fig.15 に示すように我孫子市、久喜市、浦安市では約 30m の深さまで軟弱粘土層が堆積しており、千葉市、潮来市、神栖市でも 10m 前後の深さまで粘性土が堆積していた。したがって、地下水位低下に伴う地盤沈下が懸念され、実験前に沈下量が推定された。ところが、実際に地下水位を GL-3m 程度まで下げても、推定値に比べて小さな沈下量にとどまった。実験は短期間であり、また用地も狭いので、これらを考慮して実験結果をもとに長期の沈下量が推定された結果、軟弱粘土層が厚い我孫子市で最終沈下量が 5cm 程度以下¹³⁾、久喜市では 30 年後の沈下量が最大で 7.8cm と見積もられた¹⁴⁾。また、千葉市でも最終沈下量が 3~5cm 程度と推定された。例えば、我孫子市において実験前に推定していた最終沈下量は約 30cm であるが、このように事前の推定と実験結果を用いた推定との大幅な違いが出た理由としては以下の 2 つが挙げられている。

①当初、地下水位を下げると間隙水圧は深さ方向に一定値だけ下がると考え圧密沈下量を推定していた。ところが、実験をしてみると Fig.15 に示すように、浅い所では間隙水圧は水位低下分だけ下がるものの、深くなるにつれて下がっていき逆三角形のような下がり方をした。

②軟弱な沖積粘性土、浚渫土（埋立土）といえども少し過圧密になっていた。

なお、軟弱粘土層の下端深度が我孫子市や久喜市と同程度の浦安市では、実験結果をもとに 10 年後に 22cm 沈下するとの予測がされている¹⁵⁾が、浦安市では浅井戸でなく 15m の深さまで深い井戸を設置して地下水位を汲み上げ、実質的に地下水位を GL-7m 程度まで下げた結果に基づいているので、他都市の実験とは比較できないと考えられる。

(5) 地下水位を低下し続けるための排水量

Fig.11 に示した千葉市の実証実験では、地下水位を低下し続けるための排水量と降雨量の関係が長期間調べられている。それによると、地下水位を低下させるために当初の排水量は多いが、その後は降水量の約 2/3 程度と少ない値となった。これは矢板根入れ付近にある粘性土層が下部からの地下水位の流入を防いでいるため、降水時に地下に浸透する水だけを排水すれば良かったためと考えられている。このように、下部に粘土層があると排水量は少なくて済むことが分かってきた。

(6) 地下水位の季節変動

千葉市の実験等で調べられた地下水位の時間変化と短期降水量の関係¹²⁾をまとめて Fig.16 に示す。この図は数日間多量の雨が降った時に上がった地下水位をプロッ

Fig. 15 Soil profiles in six sites.

トしている。矢板外側と千葉市磯辺 7 丁目のデータは一般の地盤、矢板内側のデータは地下水位を下げ続けている地盤のものである。これを見ると、地下水位を下げた地

盤では、周囲の地盤に比べて降水時に半分程度しか地下水位が上がらない結果になった。

Fig.16 Relationships between cumulative rainfall and the rise of the water table during short periods at Isobe 4-chome.

さて、検討が行われてきたうち、潮来市、神栖市、鹿嶋市、千葉市、久喜市では地下水位低下の工事が進められている。さらに、別の事業によって東海村でも地下水位低下工事が行われた。

6 まとめ

昨今の地震により提起された地盤改良の課題として三つほどとりあげ、課題に対する対応状況を述べた。液状化対策にすでに性能設計が導入されている構造物がいくつかあるが、今後も多く of 構造物で導入されていくことが望まれる。盛土造成宅地は昭和 30 年代から全国各地に多く造成されてきて危険箇所が多いのが現状である。個々の住宅では対応は無理で、宅地耐震化推進事業などにより住宅地全体の対策の実現を実現させる必要がある。液状化に関しても市街地液状化対策事業での経験を用いて、今後、事前対策として全国の都市やコンビナートなどで地区全体の地下水位を下げて液状化による被害を防ぐと良いと考えられる。

参考文献

- 1) S. Yasuda, "Relevant soil investigations and laboratory tests to estimate liquefaction-induced deformation of structures", International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice -, pp.259-263, (2009).
- 2) Public Works Research Institute, "Kasen teibou no ekijyouka taisaku no tebiki", Works Research Institute Documentation, No. 4332, (2016). (in Japanese)
- 3) S. Yasuda, "Higashinihon daishinsai de hisaishita takuchi no fukkyu-fukku no tokucho", The Foundation Engineering & Equipment, Vol.34, No.2, pp.22-27, (2016). (in Japanese)
- 4) Technical Committee for Zousei Takuchi no Taishin Chosa-kentou-taisaku in Kanto Branch of Japanese Geotechnical Society, "Zousei takuchi no taishin chosa-kentou-taisaku no case study", (2009). (in Japanese)
- 5) S. Sato, M. Kazama, S. Ohno, T. Mori, Y. Minami and S. Yamaguchi, "Damage classification of the reclaimed lands of residential area in the Sendai city after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake - Damage rates of wooden building and residential land on the filled valley, cutting hills and their boundary zones, Journal of the Japan Association for Earthquake Engineering", Vol. 15, No.2, (2015). (in Japanese)
- 6) S. Yasuda, S. Sato and K. Ishikawa, "Higashinihon daishinsai de hisaishita zouseitakuchi niokeru kirimori chizu wo mochii genchi chousa", Proceeding of the Annual Meeting by the Japan Association for Earthquake Engineering, pp.26-27, (2012). (in Japanese)
- 7) Sendaishi Fukkou Jigyokyoku, "Sendaishi takuchi hozen

shingikai gijyutu senmon iinkai",

[http://www.city.sendai.jp/fuzoku/1197681_2699.html.\(in Japanese\)](http://www.city.sendai.jp/fuzoku/1197681_2699.html.(in Japanese))

- 8) S. Yasuda and T. Hashimoto, "New project to prevent liquefaction-induced damage in a wide existing residential area by lowering the ground water table", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No.91, pp.246-259, (2016).
- 9) S. Yasuda, K. Ishikawa, S. Ikarashi, Y. Tanaka, T. Hatanaka, N. Iwase, T. Namiki and N. Saito, "Study on the mechanism of the liquefaction-induced damage of water pipes during the 2011 Great East Japan Earthquake in Urayasu City", Journal of the Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.16, No.3, pp.183-200, (2016). (in Japanese)
- 10) Technical Committee for Zousei Takuchi no Taishin Taisaku in Kanto Branch of Japanese Geotechnical Society, "Report by technical committee for zousei takuchi no taishin taisaku - ekijyouka kara kodate jyutaku wo mamoru tameno tebiki-", 2013. (in Japanese)
- 11) S. Yasuda and K. Ishikawa, "Effect of lowering the ground water table as the countermeasure against liquefaction-induced damage to house", Journal of the Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 15, No.7, pp.205-219, (2015). (in Japanese)
- 12) Chiba City, "Chibashi ekijyouka taisaku suishin iinkai shiryô", (2014). (in Japanese)
- 13) Akiko City, "Abikoshi ekijyouka taisaku kentou iinkai shiryô", (2014). (in Japanese)
- 14) Kuki City, "Kukishi ekijyouka taisaku kentou iinkai shiryô", (2014). (in Japanese)
- 15) Urayasu City, "Shisuiheki wo tomonau chikasui teika kouho ni kakawaru gamba jisshou jikken ni yoru data shutoku oyobi kaiseki kentou chousa no kekka gaiyo", (2013). (in Japanese)