

## 東京電機大学 安田進教授の講演会と意見交換会報告

1. 日 時：平成 23 年 9 月 11 日（日） 14 時 ～ 17 時
2. 場 所：読売新聞大阪本社「ギャラリーよみうり」
3. 講 師：東京電機大学理工学部 建設環境工学科 安田 進教授
4. 演 題：「液状化被害の実態と対策」
5. 主 催：NPO 法人都市災害に備える技術者の会 WG-D
6. 内 容：

### (1) 開会あいさつ

暑い中、講演会にご出席いただき、有難うございます。本日は 9 月 11 日で期せずして、東日本大震災から 6 か月目に当たります。東日本大震災では、東京ディズニーランドはじめ浦安市で多くの液状化被害が発生したことが新聞やテレビで報道されました。これまで、地盤で液状化現象が起こるということを知っていましたが、これを機会に再度、液状化について学習したいと思い、この講演会を企画しました。

講師の方として、この分野の権威者の 1 人である東京電機大学の安田先生にお願いしました。皆様がこの講演を通じて少しでもスキルアップしていただけたらと考えています。それでは、安田先生、よろしくお願いいたします。



〈開会あいさつ(伊藤氏)〉



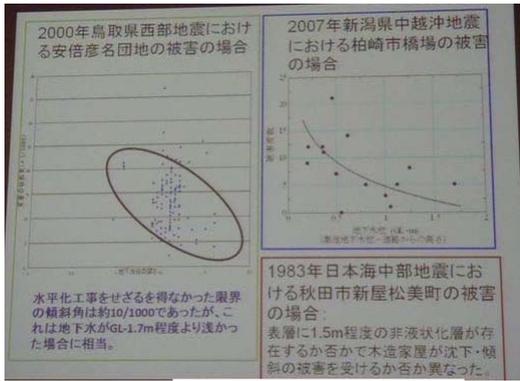
〈講演中の安田先生〉

### (2) 講 演

#### 1) 液状化によって生じる被害の種類と特徴

液状化によって生じる被害の種類と特徴についてお話します。

- ・ 日本で液状化被害が特に注目を集めたのは、1964 年 6 月に発生した新潟地震でした。アメリカでは、同年 3 月に発生したアラスカ地震では液状化によって大きな被害が発生していました。それまで、日本では液状化現象は余り知られていなかった。
- ・ 新潟地震では、RC 造のアパートにいた人が、地盤の液状化によってアパートがゆっくり傾いて倒れ、気がついたら地面にいたということがあったそうです。
- ・ 鳥取県西部地震では、安倍彦名団地で地盤に液状化が生じて多くの家が沈下し傾き、そこに住んでおられる方々に健康被害がありました(次頁左図)。
- ・ 新潟地震、阪神大震災などでは、液状化した土構造物が側方流動によって、河川護岸や海岸堤防が被災した例が数多くありました(次頁右図)。



〈家屋の沈下・傾斜〉



〈河川護岸・海岸堤防の被害〉

- 液状化すると土より軽い構造物、例えばガソリンスタンドのタンク、マンホール、下水道管、ガス管、プールなどが浮き上がる被害が発生します(下図)。

過去の地震時におけるマンホールの浮上り被害の概要

年	地震名	マンホールの浮上り状況
1964	新潟	2地区だけで浮上り
1983	日本海中部	通信のマンホールが八郎潟で浮き上がったのみ
1993	釧路沖	釧路町で多数浮上り
1993	北海道南西沖	長万部町で多数浮上り
1994	北海道東方沖	標津町などで多数浮上り
1995	兵庫県南部	ほとんどなし
2000	鳥取県西部	ほとんどなし
2003	十勝沖	豊頃町などで多数浮上り
2005	福岡県西方沖	ほとんどなし
2007	能登半島	門前町で多数浮上り



2004年新潟県中越沖地震

公共下水道の被害

新潟県および県内6市12町3村の22自治体で被災

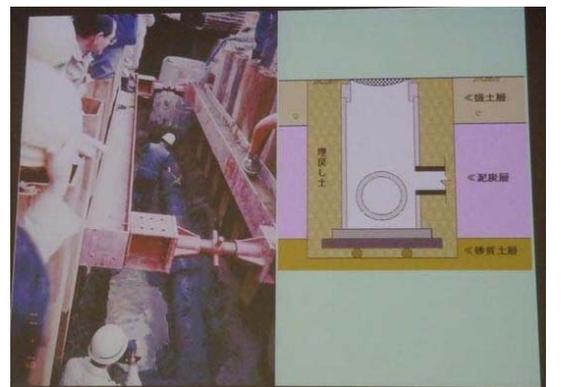
被災総額: 205億円

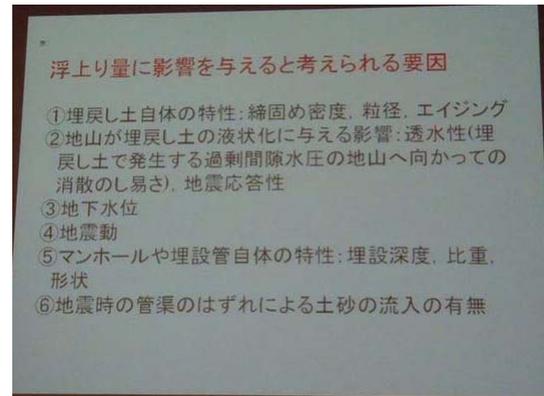
被災延長: 152.1km

路面から突出したマンホール: 1453個

国土交通省では「下水道地震対策技術検討委員会」で検討

自治体	管総延長 (km)	被災管総延長 (km)	突出マンホール数	被害額 (万円)
新潟県	61.3	9.5	51	130
長岡市	13.9	62.9	456	3685
柏崎市	421.5	3.9	12	250
小千谷市	182.8	31.1	400	849
南魚沼市	135.1	2.3	9	70
妙高市	119.7	0.2	64	212
釧路町	83.7	4.7	93	157
三島町	58.7	1.8	5	16
五反町	5.6	5.1	88	187
柏原町	37.7	6.1	36	111
出雲町	39.6	3.1	7	22
小国町	61.3	9.6	158	101
十日町	198.1	2.9	10	110
川口町	4.3	9.3	24	93
川西町	29.3	2.4	0	1
堀之内町	75.1	0	37	93
守門町	48.6	4.3	9	178
小出町	88.3	5	5	19
特産村	100.2	0	0	3
津南町	59	1.5	0	3
中之郷町	33.3	0	0	19
西山町	25.8	0.3	8	2
その他			3	38
合計	3291.4	152.1	1453	5908



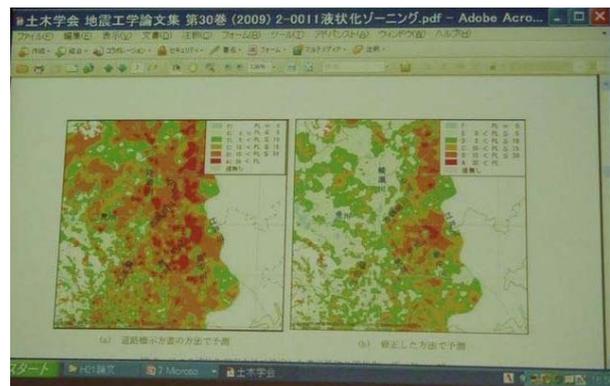


- ・ 地盤の液状化は地震波のうちP波では起きないが、S波によってせん断変形を受け、地盤内の粒子がバラバラになって水の中に粒子が漂う状態になるのが「液状化現象」です。また、粒子間のかみ合わせが外れると上載荷重を支えるのは間隙水です。そのため、地盤内に通常の静水圧より高い水圧つまり過剰間隙水圧が発生します。この水が土と一緒に地盤の弱い部分を通って地表面に向かって出てきます。これが噴水・噴砂現象です。
- ・ 一度液状化した地盤が再液状化する事例が多く見られます。この理由として、液状化した地盤の深い所では粒子間が密になって液状化しないのですが、一方、浅い所では粒子が比較的疎に再度堆積して、地震の度に液状化が繰り返し起きるようです。
- ・ 液状化が起こる地盤は、地下水位が浅く、緩い砂質土が厚く堆積している地盤です。場所としては、河川、海岸の埋立地で多く発生しています。
- ・ 液状化は震度5弱以上の地震動で引きこされる事例が多いようです。
- ・ 南海地震では鳥取県の弓ヶ浜でも液状化していました。
- ・ 現在では、戸建の建造物を除き、多くの構造物では液状化を考慮した設計指針が作成されて液状化対策が行われています。合わせて、液状化マップの見直しも行われています(下図右)。
- ・ 阪神大震災以後、性能設計の考え方が広まっています(下図左)。

液状化による構造物の変形量をもとにした性能設計の必要性

		標準貫入試験のN値		
		10程度以下 (緩い地盤)	10-25程度 (中密な地盤)	25程度以上 (密な地盤)
レベル1地震動 (0.15G-0.2G程度)	液状化の発生	発生する	発生しない	発生しない
	構造部への被害	甚大	無被害	無被害
レベル2地震動 (0.35G-0.6G程度)	液状化の発生	発生する	発生する	発生しない
	構造物への被害	甚大	発生するが軽微	発生しない

〈性能設計の考え方〉



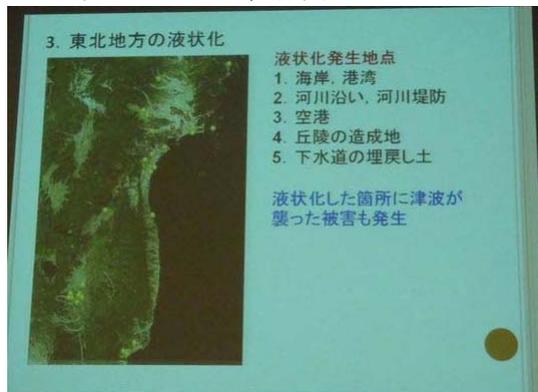
〈液状化マップの見直しの一例〉

## 2) 東日本大震災で発生した液状化被害

東日本大震災における液状化被害は、東北地方では空港、河川堤防、港湾、海岸などで起こったようですが、津波によって液状化の痕跡が消され分かりにくい状態です(次頁左図)。

関東地方では、浦安、新木場、船橋、千葉、東京臨海部等の東京湾岸の埋立地で多く発生しました。関東地方整備局と地盤工学会関東支部が災害協定を結んでいたために、関東地方整備局から今回の地震における関東地方の被害調査を地盤工学会が研究委託を受けました。その災害調査結果が関東地方整備局と地盤工学会のホームページ上に掲載されています。

- 今回の地震での東京湾での地震波には次のような特徴があります(下図右)。
  - ① 加速度振幅は、そんなに大きくない。
  - ② 地震の継続時間が長かったので、地盤が繰返しせん断力を受ける回数が多かった。
  - ③ 29分後に大きな余震が来たので、それによって液状化したケースもありました。
 このようなことから、震度は大きくはなかったが非常に広い範囲で液状化が発生しました。



〈東北地方での液状化による被害〉



〈東京湾で発生した地震波の特徴〉

- 液状化した箇所は、1960年以降の埋立て地に集中しています。東京都江東区では戦前から埋め立てが行われ、浦安地区では1960年頃から埋立てが始まりました。浦安などでは海からの浚渫土で埋め立てました。
- 埋立て地中の道路のうち、噴砂があった箇所を赤で、無かった箇所を青で示したものを、下図に示します。東京ディズニーランドの駐車場は液状化しましたが、場内はサンドコンパクションパイルが施工されていたので液状化を免れていました。
- 大成建設の現場で取られた映像がありますが、この現場では、余震の時のほうが本震より変動(液状化)が激しかったようです。



(東京都江東区)



(浦安)

〈埋立地内の液状化箇所〉

- 市川から船橋地区で液状化の赤い線が少ないのは、埋立て地の大部分が工場地帯で調査ができなかったため、住宅地は戦後埋め立てたところを中心に液状化していた。
- 船橋市日の出地区ではひどい液状化が発生しました。「日の出」の地名のところは他所でも液状化していた。
- 本震の加速度は $\alpha=157\text{gal}$ でしたが、29分後の余震の加速度はその半分ぐらいだった(浦安)。銚子辺りでは余震の方が大きい。地域によって差異がありました。
- 振幅が小さくても繰り返しの回数が多いと、地盤が液状化する。
- 本震では液状化せず、余震の時に液状化したという場所もあるようだ。また、余震の時に家が

沈下したという証言もあります。このことは、本震と余震の波をあわせて考えなければならないということです。つまり、29分の間には間隙水圧が消散し切っていなかったと考えられます。

- ・ クライストチャーチ地震では、噴砂の厚さが昨年9月の本震時で40cm、今年2月の余震時50cm程度生じた家がありました(下図左)。
- ・ 東京湾岸の埋立て材料は細砂からシルト質細砂で比較的小さいので、大量の土が地表面に噴出したと考えられます(下図右)。



(クライストチャーチ地震)

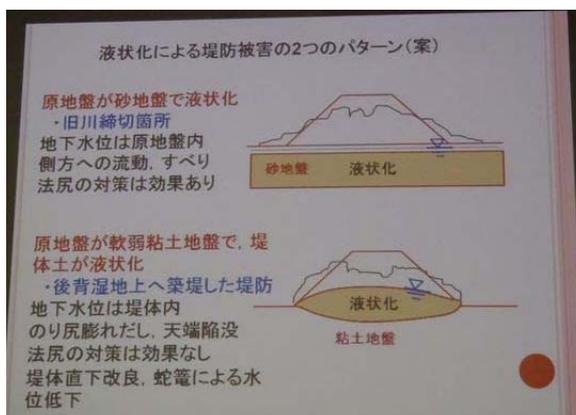


(東京湾岸の埋立て土の粒径)

- ・ 液状化した箇所では、下水管やガス管が下から突き上げられ、大きな揺れによって抜けたようで、管内に多量の砂が流入していました。また、管の浮き上がりは少なかった。
- ・ 関東地方整備局管内では、河川堤防の920箇所被害を受けた(下図)。
- ・ 堤防被害では、原地盤が砂地盤か粘土地盤かによって被害のタイプに違いが見られた(下図)。



(関東地整管内の河川堤防の液状化被害)



(原地盤の土質が異なることによる被害の相違)



- ・ サンドコンパクションパイルなどの地盤改良がされているところは液状化しなかった。
- ・ 関東地方では、護岸や杭基礎にほとんど被害が有りませんでした。このことは、阪神淡路大震災に比べ、地震の加速度が小さかったためと思われる。
- ・ 旧河道、池、沼を埋めた箇所で液状化が見られた(下図)。



(旧河道を埋めた箇所での液状)



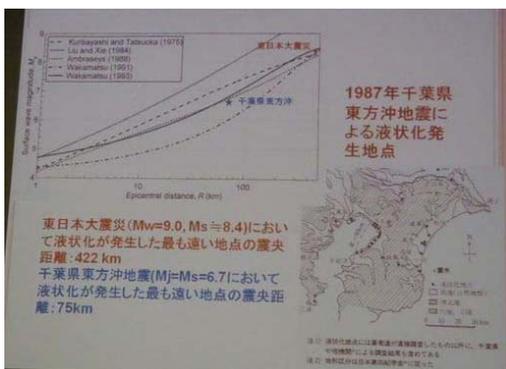
(池・沼地を埋めた箇所での液状化)

- ・ 自然堆積地盤は液状化していなかった。また、関東大震災時に液状化していた箇所でも液状化が見られなかった。これは地盤にエージング効果(aging)が働いたのではないかとと思われる。
- ・ 丘陵地を切盛して造成した住宅地でも、地盤の液状化等によって道路・宅地に大きな被害が発生した(仙台市泉区南光台、下図)。



(仙台市泉区南光台での被害パターン)

- ・ 東日本大震災では、震央から 440 km離れた房総半島でも液状化した(下図)。



(震央から液状化発生地点までの距離)



(過去の地震による液状化発生範囲)

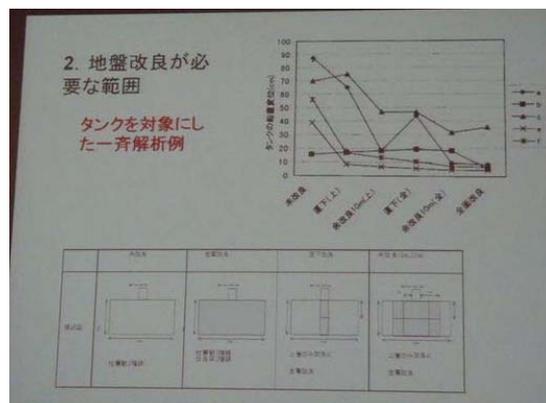
- 液状化対策工法には、①地盤密度の増大、②地盤の固結、③粒度の改良(置換工法)、④飽和度の低下(地下水位低下)、⑤間隙水圧抑制・消散、⑥せん断変形抑制工法があります(下図)。

**1. 液状化対策工法の種類**

改良原理	工法
密度の増大	サンドコンパクションパイル工法(動的締固め、静的締固め)、振動棒工法(通常型、吸水量)、電錘落下工法、ハイプロローテーション工法、圧入締固め工法(コンパクショングラウチング工法等)、パイロタンパー工法、転圧工法、暴砕工法、群杭工法、生石灰工法、プレローディング工法
固結	深層混合処理工法、薬液注入工法、事前混合処理工法、高圧噴射攪拌工法
粒度の改良	置換工法
飽和度低下(地下水位低下)	ディープウェル工法、排水溝工法
間隙水圧抑制・消散	グラベルドレイン工法、人工材料系ドレイン工法、周切巻立てドレイン、排水機付き鋼付
せん断変形抑制	地中連続壁

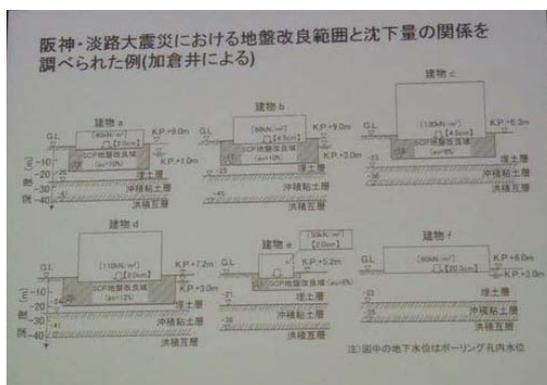
(液状化対策工法の種類)

- タンクを対象にした基礎地盤の改良幅・深さを調べて一斉解析しました(下図)。



(必要な地盤改良の範囲)

- また、阪神淡路大震災では、建物の沈下について、地盤改良範囲の違いと沈下量を調査されています(下図)。



(阪神淡路大震災における地盤改良範囲と沈下量の関係)

**対策の原理**

- ①埋戻し土を液状化し難くする(締固め、セメント添加、礫、過圧密、他)
- ②埋戻し土が液状化してもマンホールや管渠の重量を調整したりアンカーを設けたりして浮上り難くする。
- ③埋戻し土が液状化しても仕切板などでマンホールや管渠の下に土が回り込み難くする。

既設構造物の対策における必要条件

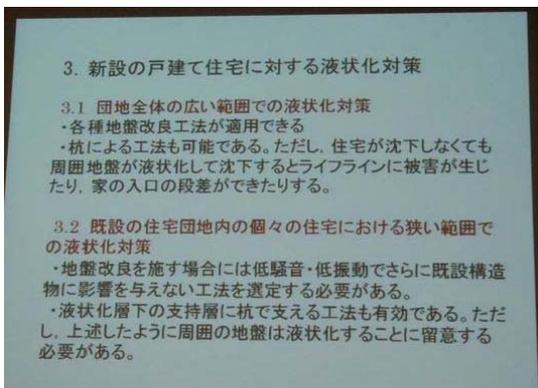
- a)安価
- b)施工が容易
- c)住宅地のように近接して構造物がある場合でも施工可
- d)マンホールだけでなく管渠も対策が必要

(マンホール・管渠の液状化対策)

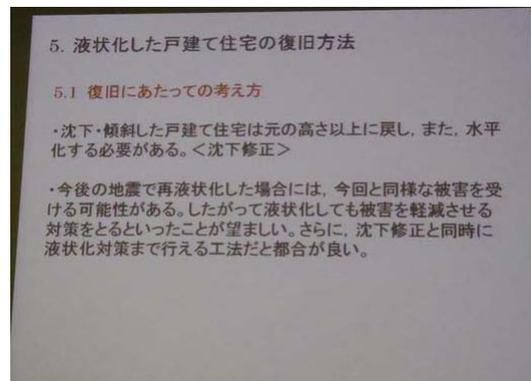


(マンホール・管渠の液状化対策の例、地下水位低下)

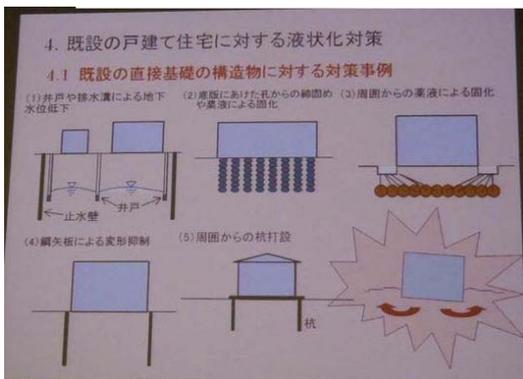
- 戸建て住宅を新設するにあたっては、基礎地盤を調査し、各種の地盤改良工法・杭基礎を行っておくことが重要であると考えています。
- 被災して沈下・傾斜した既設戸建て住宅の復旧では、ジャッキアップなどの工法を行って元の状態に戻します。液状化対策工には、①地下水位低下工法、②地盤の締めめや固化(底版に開けた孔から)、③薬液注入(周囲の地盤から)、④鋼矢板による変形抑制、⑤杭打設(周囲から)などがありますが、多額の費用がかかるので安価な工法を検討する必要があります。
- 地盤状況によりますが、戸建住宅の液状化対策では深度 3m程度を地盤改良すれば液状化に対して十分ではないかと思っています(安田先生の感覚)。
- これまで液状化工法として有効と考えられていたコマ型基礎が今回の地震で若干沈下した例が見つかり、現在、原因を調査中です。



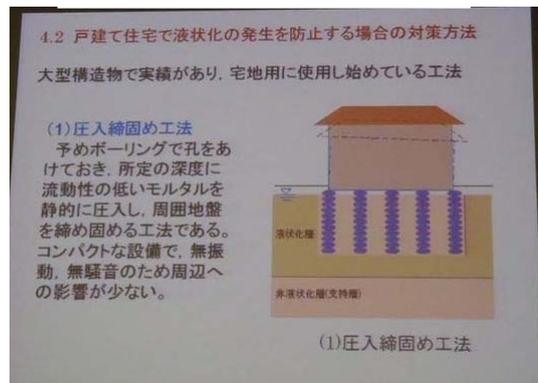
(新設戸建て住宅に対する液状化対策)



(被災した戸建て住宅の復旧方法)



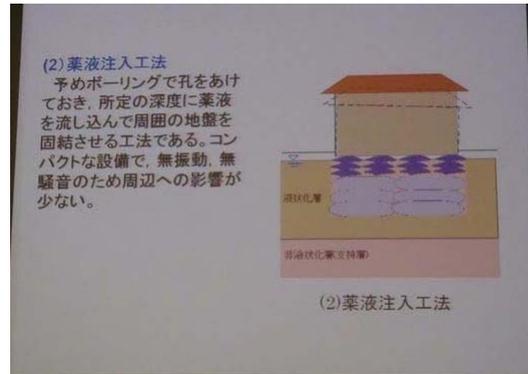
(既設戸建て住宅に対する液状化対策)



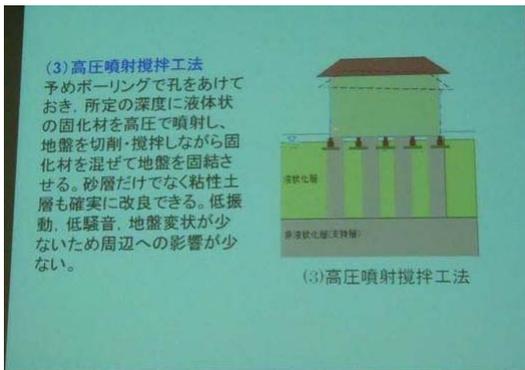
(被災した戸建て住宅の復旧方法)



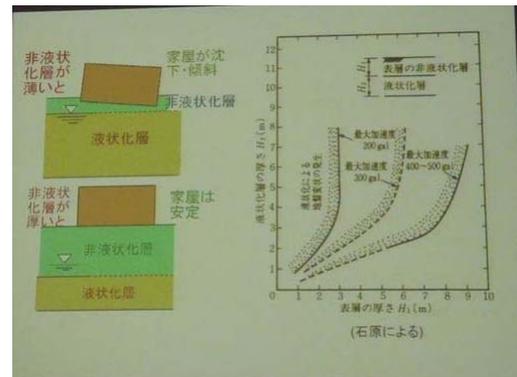
(住宅底版からの圧入締固め工法の例)



(薬液注入工法)



(高圧噴射攪拌工法)



(地表面の変状と改良深さの関係)

### (3) 意見交換会

意見交換会では、参加者が安田先生に質問し、質問に安田先生が答えるという形式で行われ、参加者からは忌憚のない質問・意見が次々に飛び出し、活発に意見が出された。

Q1. 今回の地震では 440 km も離れた所で液状化が起きたということですが、地震の規模等との基本的な関係について教えてください。

A1. 過去の地震から液状化が発生した地点について、マグニチュードと震央からの距離との関係式のようなものがあります(右図)。

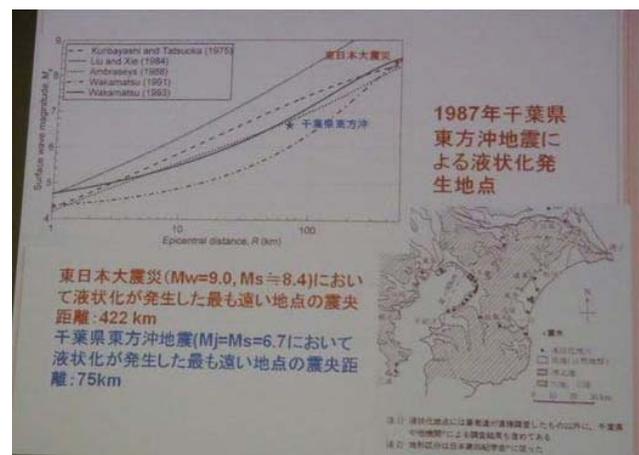
Q2. どの程度のデータがあって、この関係式ができているのでしょうか。

A2. データは余りないのですが、チリ地震のデータは入っています。ある面、勢いで書かれている部分があると思います。

Q3. 埋立て地の粒度特性、地震動の繰り返し等に起因して液状化が発生しているということですか。

A3. 液状化の起きやすい粒度範囲の埋立て地盤(浚渫土・山砂)で発生しています。

Q4. 大阪市では、ある時期から揚水制限を実施したために地下水位が上昇し、一方で液状化発生の危険度が全地域に広がった面もあると思うが、そのことについてどのように考えられるのか。



A4. 大阪では地盤沈下を防止するために揚水規制を行ってきたと理解しているが、東京では洪積層の地下水を取っていたので、大阪の場合と状況が異なり沖積層の水位に影響を与えないと思う。

Q5. 千葉県では均等係数が4程度で緩い砂が多くシールド工事などでは地盤が沈下したように思うが、均等係数が小さいと液状化が起きやすいとかはあるのでしょうか。

タンク基礎の地盤評価としてK値を用いていたが、K値で評価はできるのでしょうか。

また、N値が10であれば液状化しないとしてきたが、地盤の締固めを含めた見解をお聞きしたい。

A5. 千葉の船橋の陸地側であれば、成田層(洪積層)の砂なので今回は液状化していない。浦安の浚渫土では細粒分が多く含まれている。道路橋仕方書では、液状化が発生するN値の境界はレベル1地震動でN=10くらいで、レベル2

地震動でN=20~25くらいです。N=10~25の場合には、締まっている状態なので液状化しても沈下量が比較的少ない。

このことから、現在では液状化をある程度許容する設計思想が取り入れられています。すなわち、レベル1では液状化をさせない。レベル2では液状化しても有害な沈下量が発生させないという性能設計の考え方が導入されています(右表)。

K値では液状化の判定は出来ないと思います。

液状化による構造物の変形量をもとにした性能設計の必要性

		標準貫入試験のN値		
		10程度以下(緩い地盤)	10~25程度(中密な地盤)	25程度以上(密な地盤)
レベル1地震動 (0.15G~0.2G程度)	液状化の発生	発生する	発生しない	発生しない
	構造物への被害	甚大	無被害	無被害
レベル2地震動 (0.35G~0.6G程度)	液状化の発生	発生する	発生する	発生しない
	構造物への被害	甚大	発生するが軽微	発生しない

K値では液状化の判定は出来ないと思います。

Q6. 神戸市では埋立地に下水管を埋めるとき、地盤改良をしたり、碎石で埋め戻したりしました。

そういう箇所では被害があまり発生しませんでした。被害のあった箇所では、管内に砂が詰まり固まっていたので復旧が大変でした。今回の地震はどうだったか。既設管の対策はどうしたら、よいのかを教えてください。

A6. 1993年の釧路沖地震後に碎石で埋め戻した所は、次の地震では被害がほとんどありませんでした。マンホールでは比較的簡単に対策(ハットリング等)が取れるのですが、既設の埋設管に対しては悩ましいのが現状です。埋設管の周辺を地盤改良すれば対策できるが、問題は工事費が高価なことです。今回の地震でも、管の中に砂が詰まった例がたくさんありました。下水管だけではなくガス管にも詰まっていました。管が途中で抜けたためにこのようなことになったと考えています。

Q7. マンホールが浮き上がった所では、底版も一緒に浮き上がっていましたか。

A7. 釧路沖地震の後で調査した時は浮き上がっていました。液状化した砂が下に回り込んでマンホール全体を浮き上がらせたと思っています。

Q8. 古い埋立地では、液状化が起きなかったのはなぜでしょうか。また、神戸では地盤の液状化で側方流動がたくさん起きましたが、どうすればよいのでしょうか。

A8. 古い埋立地では、地盤が締め固まるのか、何なのかよく分からないのですが、エイジング効果すなわち時間が経つと土粒子の結合が強くなり、液状化しにくくなったものと考えています。例外的として、埋立てられてから300年経過した尼崎の築地が液状化したという事例がありますが、100年くらい経つと液状化しにくくなるという結果が出ています。

側方流動が起こるのは、震度の影響だと思います。護岸が壊れなければ側方流動は起きません。

Q9. NPO 法人として市民の方と接触する機会が多いのですが、既存の家では調査・判定・対策にどのくらいの費用がかかるのでしょうか。また、どのくらいグレードの対策をすれば、どれくらいの震度に耐えられるのか、目安のようなものがあれば、教えてほしい。

A9. 石原先生の図(右図)から、地震動が大きくなるほど非液状化層の厚さを厚くしないといけないことが分かります。

200gal なら 3m 程度、300gal なら 6m 程度、500gal では 9m 程度ということになります。対策工ですが、圧入締固め工法で 800 万円くらい。薬液注入工法の方がやや安いのではないかと思います。いろいろな事例が出てこない、工事費の算定は難しい。

宅地の耐震化については、地盤工学会でケーススタディー集を出しており、その中

でそれぞれのモデルについて概算の費用を計算しています。また、戸建て住宅の液状化対策に関しては新設・既設の対策方法、復旧時の対策方法を、8 月に少しまとめて地盤工学会関東支部のホームページにも掲載しています。今後、もう少し対策工事費等について踏み込む予定にしています。個人の住宅では 500 万円もかけないと思うので、200 万円くらいできる新しい工法を考えなくてはならないと思っています。

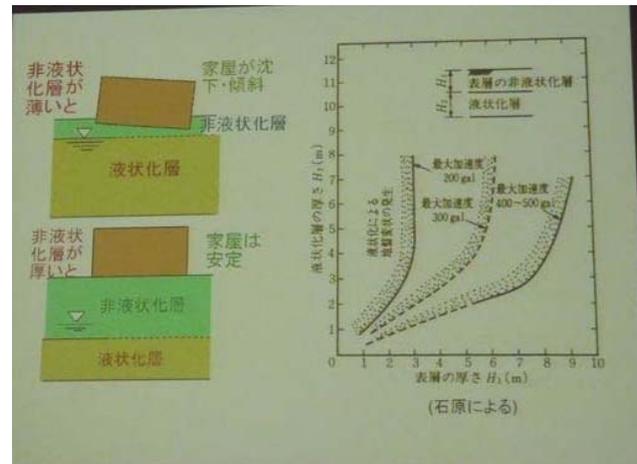
Q10. 液状化するような土地を売ったとすれば、売った側が責任を持って対策をすべきではないかと思うが、その辺りの考え方はどのようになっているのか教えてください。

A10. 浦安では 1965 年から埋立てが始まっています。この年は新潟地震の翌年に当たります。私自身は昭和 45 年から液状化の研究をしていますが、それ以前には地盤の液状化について一般に知られていませんでした。したがって、責任を明確に問えないのではないかと思います。現状では造成して建物を建てた場合、液状化被害に関しては法的な規定はありませんが、検討をはじめているようです。

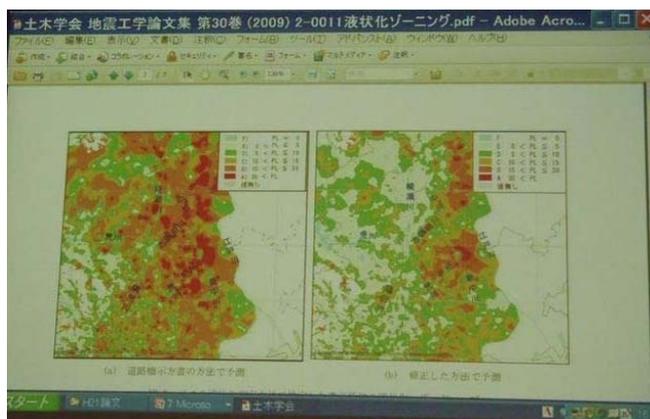
Q11. 咲島などの新しい埋立て地ではサンドドレーンなど、地盤沈下促進のための対策がなされており、液状化の発生に対してもある程度抑えられると思っていますが、沿岸部の江戸時代の埋立て地は何もなされていませんが、埋め立ててからの年数は経過しております。調査結果からは N 値も低い場合液状化に非常になりやすくなっておりますが、このような所では、地震が起きて見ないと液状化が発生するかどうか分からないのでしょうか。N 値だけで精緻に判定できるのでしょうか。

A11. エイジング効果は N 値に反映されにくく、N 値だけで評価するのは困難です。地盤からチューブサンプリングなどで試料を採取して振動三軸試験などをするのが一番良いと思います。

Q12. 我孫子市が事前に出していた液状化危険度マップでは液状化が起きないとされていたところで起きたらしいですが、そういう例は他にもあるのでしょうか。また、3 連動型地震が起きたとき関西圏の都市部ではどの程度の被害が起きるだろうか。



A12. 我孫子市のハザードマップでは確かにあったようです。ハザードマップを作る場合は注意しなければなりません。液状化判定式には10種類くらいあり、道路橋示方書の判定式で判定すると危険と判定されたものが別の式で判定すると安全と判断されます(右図)。全国基準をローカルに当てはめる場合には注意しなければいけません。細粒分含有率をボーリング柱状図の記載から推測していますが、その値に極めて誤差が多いようです。



〈液状化マップの見直しの一例〉

液状化危険度の表示方法にも問題があります。地形区分で分けしていれば良いが、メッシュ表示だと推定自身の正確性もなくなります。このあたりが各自治体によってバラバラのようです。3連動地震が発生した場合、京都でどうなるのかは分かりません。礫地盤の所ではあまり起きないと思いますが、3川が合流している辺りは砂地盤なので液状化する可能性があると思います。



(熱心に講義を聴く参加者)

(司会) 予定の時間が参りました。熱心なご討議ありがとうございました。これで、講演会および意見交換会を終了します。皆様には長時間に渡り、お疲れさまでした。