

東北地方太平洋沖地震第2次調査団（茨城県）

2nd Reconnaissance Survey Report on Earthquake Damage in Ibaraki Prefecture

鍬田 泰子 (くわた やすこ)
神戸大学 准教授

池尻 大介 (いけじり だいすけ)
神戸大学 大学院生

三浦 みなみ (みうら みなみ)
神戸大学 大学院生

上仲 亮 (かみなか りょう)
神戸大学 大学生

金 乗 洙 (きむ びんす)
神戸大学 研究員

澁谷 啓 (しぶや さとる)
神戸大学 教授

1. 調査概要

本報告は、平成23年4月30日から5月3日にかけて茨城県を中心として東北地方太平洋沖地震の被害調査結果とまとめたものである。茨城県の利根川流域では広域な液状化被害により、宅地だけでなく地中構造物の被害が甚大であった。また、茨城県北部では1gを超える強震動が観測されている地域や、沿岸部の津波被害地域もある。現地調査は鍬田泰子、池尻大介、三浦みなみ、上仲亮（以上、神戸大学）の4名である。現地調査では地盤災害とそれによる施設被害の視察と表面波探査を行った。本報告では調査後に液状化地盤の室内試験を行い、考察を加えている。

2. 利根川流域の液状化による地中構造物被害

利根川流域の茨城県鹿嶋市、潮来市、神栖市ならびに千葉県香取市では沿岸部一帯で液状化の被害がみられた。鹿嶋市の高台にあるK-NET鹿嶋の地震記録によると、東西成分の最大加速度651gal、100秒以上の長い継続時間をもつ地震動であったことを示している¹⁾。

2.1 鰯川浄水場の液状化による地中構造物の被害

茨城県企業局鹿行水道事務所の鰯川浄水場の施設概要を図-1に示す。この浄水場は鰯川で取水した水を鹿行広域水道用水と鹿島工業用水に送水するための施設である。浄水場の一部完成は昭和57年7月である。現在、水道用水供給として計画一日最大給水量30,000m³、工業用水供給として計画一日最大給水量150,000m³をいずれも神栖市へ供給している。場内では北西の取水ポンプ棟に入った水は、工水系（図上部）の施設と上水系（図下部）の施設に分かれて処理される。中央の雨水調整池の上空には高圧送電線があるため、その下には水道施設はない。図中の波線で示した箇所には共同溝が埋設されている。

上水側の施設では杭基礎が打たれており、沈下・隆起していないとすれば、図-2に示す上水道側の共同溝は50cm近く施設構造物に比べて隆起しており、施設への分岐部で共同溝継手が10cm近く開口していた。ポンプ棟、

浄水池、管理棟などの構造物周辺では液状化により周辺地面が沈下しているため、浮上した共同溝周辺では周辺地盤と1m近く段差が生じていた。共同溝長手方向には共同溝の継手下に枕が設置されていたため、浮上しているものの共同溝の長手方向に顕著な不等沈下が生じていなかったと考えられる。また雨水貯留沈殿池周りの地面は沈下して、沈殿池側に流動していた。しかし、管理棟前の高圧電線の鉄塔基礎周辺には液状化の噴砂痕が見られず、鉄塔傾斜などの被害もなかった。

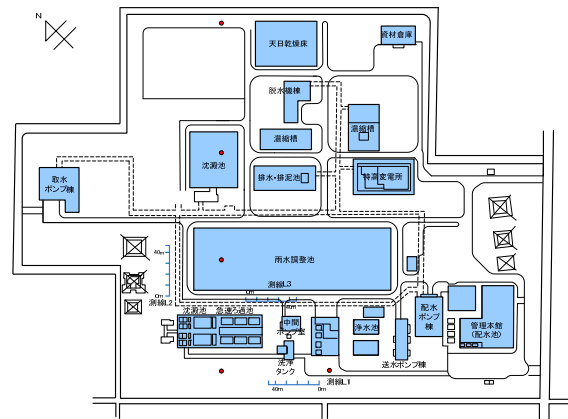


図-1 鰯川浄水場の概要図と表面波探査場所



図-2 共同溝継手の開口（左手）とポンプ棟周辺の液状化による地面の沈下

取水ポンプ棟でも周辺地盤が沈下しており、ポンプ棟との取り合い部分の管路で交差する管路類が周辺地盤とともに沈下したためにダクタイト管φ600の伸縮可撓継手でも伸び、さらにその隣のダクタイト管路の受挿口で抜けている(図-3)。伸縮可撓継手は2層式のもので、伸縮余裕を超えた変位が発生していた。構造物の取り合い部では、地盤と構造物の段差が生じやすいため伸縮可撓継手が予め設置されているが、今回の液状化による周辺地盤の沈下によって伸縮余裕を超えて脱管している箇所が5ヵ所発生したと報告されている。また、長い継続時間をもつ本震であったが、その後の強い余震が頻発したこともあり、液状化による沈下は地震直後ではなく、一昼夜かけて徐々に沈下したといわれている。



図-3 ポンプ棟取り合い部の継手抜け(φ600DIP)

本浄水場は利根川に合流する鱈川流域にあり、河川堆積物の上に建設されている。浄水場周辺には水田で囲まれた地域で、場内にも雨水貯留池があることから地下水位は高いと考えられる。浄水場建設にあたり地盤改良は実施されていないが、場外の一般道路や施設内の他の場所では液状化噴砂痕が確認されていないこともあり、浄水施設建設時に埋め戻した構造物周辺の地盤に起因した液状化であったと考えられる。

図中に示す場内3箇所では表層地盤の構造を明らかにするために表面波探査を実施した。表面波探査にはMacSEIS(楢応用地質)を使用した。24個のジオフォンを2m間隔で直線状に設置し、カケヤによる人工起振の伝播波を100Hzのサンプリングで観測した。

観測結果のうち、例として測線L3のS波速度構造を図-4に示す。表層から4~5mほどに110~150m/sの地盤が堆積しており、それ以深では160m/s以上の速度であることがわかった。他の測線においても速度構造はほぼ同様の値を示していた。表面波探査の結果と液状化範囲からみて液状化したのは表層4~5mの埋め戻し土と考えられ、構造物周辺や配管周りなど締固めが難しい箇所であったと考えられる。液状化地盤の特性については、5.で後述する。

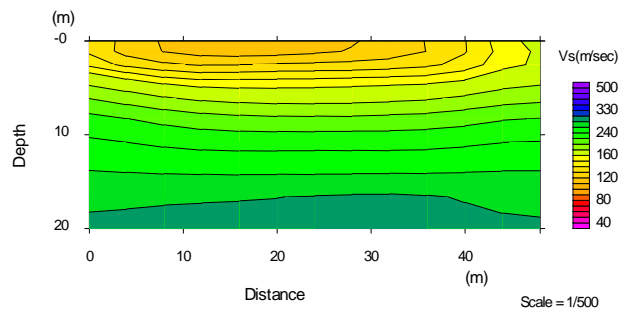


図-4 鱈川浄水場 測線L3のせん断波速度構造

2.2 鱈川配水場の液状化被害

鱈川地区の神栖配水場は県企業局の鱈川浄水場から約1km南で、浄水場と同じく鱈川沿岸にある。鱈川浄水場と送水管で連結されておらず、鹿行水道事務所からの別ルートの送水を受け、配水池に貯水される。配水池の北側地盤では液状化により路面が地下し、亀裂が生じていた(図-5、図-6)。配水場の北には農業排水路があり、亀裂も排水路に沿ったものであるために、少なからずこの影響があると考えられる。北側の建屋周辺では沈下しているものの、浄水場の様に広域で沈下しているのではなく、表層が亀裂してブロック単位で沈下・移動していた。

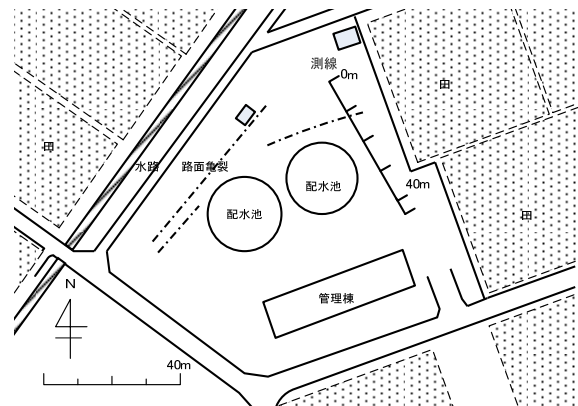


図-5 鱈川(神栖)配水場の概要図と表面波探査場所



図-6 配水場北側の液状化による路面亀裂

水道局の話によると、2つある配水池の内、一つの配水池の取り合い部の可撓管とDIP(K形)の継輪で漏水

した。配水池との取り合い部の伸縮可撓管はベローズ形式のもので、離脱防止機構が付いている（図-7）。写真でも明らかなように継手の地盤側が沈下している。DIPφ300のK形継手の被災箇所は配水池取り付け部から10mほどの場所であり、図-6の段差が生じている箇所符合する。



図-7 配水池取り合いの伸縮可撓管

図-5 に示す測線に沿って表面波探査を行った結果が図-8である。浄水場と同様に表層から5m程度でS波速度は160m/s近くになるが、均一な成層地盤である。表層はわずかであるが、農業排水路側の地盤にやや遅い140m/sのS波速度の地盤があることがわかった。

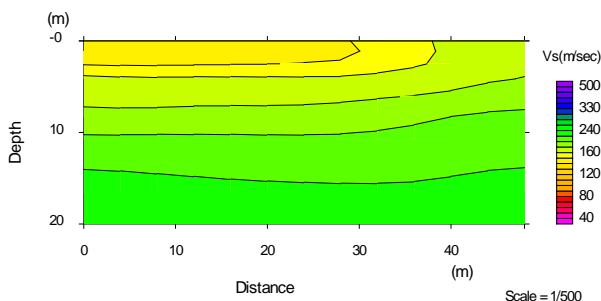


図-8 鱒川配水池 測線のせん断波速度構造

2.3 潮来市日の出の宅地における液状化被害

潮来市日の出地区では、鹿島工業地帯の開発とともに宅地造成された地区である。潮来市は霞が浦から流れる常陸利根川と北浦から流れる鱒川に挟まれた地域である。潮来市内では、JR 潮来駅周辺の常陸利根川沿岸部の宅地でも液状化が見られたが、日の出地区の液状化程度ははるかに甚大なものであった。日の出の宅地一帯で液状化が発生し、水道・下水道などの地中管路被害の他、支持物も至る所で傾斜している（図-9）。3月末に事前調査したときには、主要道で支持物の修繕や下水マンホール内の土砂の洗浄や、横に変位したマンホールセグメントの修繕が進められていた。図-9のように雨水枡が1m近く浮上している箇所もあるが、その一方で図-10に示すように、雨水枡は浮上せず、その横に埋設されていた水道管（VP-RR）φ100、下水管（VUφ250 接着接合）が雨水

枡と宅地の壁で拘束されているため液状化の噴砂とともに地上に露出している箇所もあった。露出範囲は80m近くにおよび、途中マンホールがある周辺で下水道管と水道管の上下が交差していた。

日の出地区中央の日の出中学校南側で表面波探査を実施したところ、図-11に示すS波速度構造が得られた。鱒川地区と比べてかなり深くまで遅いS波速度の地盤が堆積していることがわかる。また、表層5m以浅に110m/sの非常に遅いS波速度の層があることが確認できた。



図-9 雨水渠の浮上（潮来市日の出）



図-10 下水・水道管の浮上（潮来市日の出）

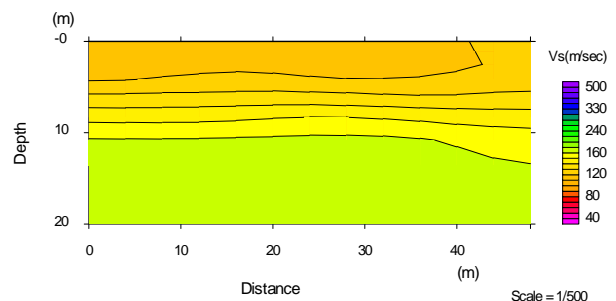


図-11 潮来市日の出 測線のせん断波速度構造

3. 水戸市的那珂川水管橋の被害

那珂川水管橋は茨城県企業局で管理されており、県中央水道事務所より水戸市に供給されている用水管路の一

部である。水戸市下国井町から同市飯富町へ那珂川を横断する水管橋の構造は単純トラス+3 径間連続斜張橋トラス+単純トラスで、1994年に竣工された(図-12)。水管橋の全長は492mある。この橋梁に口径900mmの鋼管が2条で布設されていたが、地震によって右岸側の単純トラスと斜張橋トラスとの中継橋脚(P5)で2条とも、伸縮継手で漏水が発生した。1条の管路については地震後まもなく応急復旧されて通水されたが、もう1条の継手では調査時でも供給が停止されていた(図-13)。

右岸側の橋脚(P6)には亀裂等の被害は確認できず、橋脚基礎周辺の路面にも液状化などの痕跡は見られなかった。右岸側単純トラスの下には河川堤防があり、法面ブロックに顕著な損壊は確認できず、また法面傾斜の変形も確認できなかった(図-14)。水管橋から南東6km先にK-NET水戸の地震計があり、地震時には786galの最大水平加速度が観測されている¹⁾。地震動の特徴として短周期成分が卓越しており、鹿嶋同様で継続時間が長い。

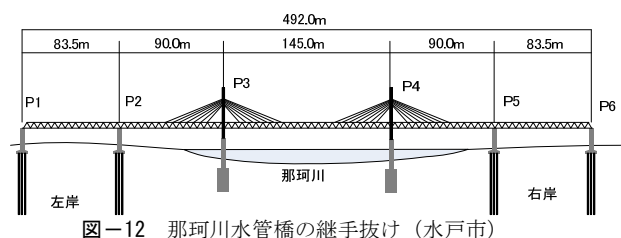


図-12 那珂川水管橋の継手抜け(水戸市)

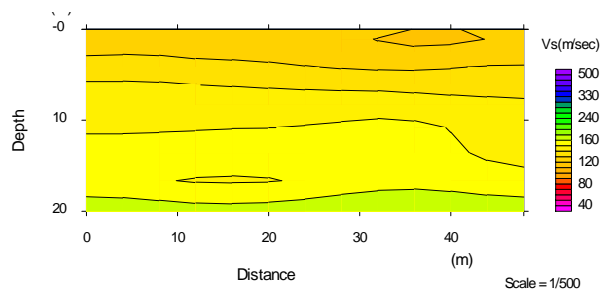


図-13 那珂川水管橋の継手抜け(水戸市)

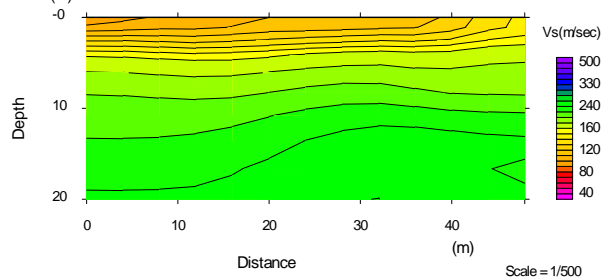


図-14 那珂川水管橋右岸単純トラス下の河川堤防(水戸市)

左右対称の水管橋において中央の継手のみで抜けの被害が発生するには、橋脚基礎の地盤条件が他のものと異なっていたと考えられる。そこで、図-12の橋脚P5、P6の基礎周辺で表面波探査を行った。右岸河川堤防の内外におけるS波速度の分布は図-15に示すとおりである。堤内と堤外の地表面の標高は、1m程度堤外地面が高くなっているがそれほど差はない。しかし、S波速度の分布をみると、20m程度までの深さの橋脚基礎地盤のS波速度に差異があることがわかる。この差異は被害要因の一つとして水管橋の応答に影響を与えたと考えられる。今後は地震動や水管橋の構造振動特性を考慮して被害メカニズムを明らかにする予定である。



(a) P5 周辺地盤(堤内側)



(b) P6 周辺地盤(堤外側)

図-15 水戸市那珂川水管橋測線のせん断波速度構造

4. ひたちなか市の被害

4.1 谷筋集水域における地盤災害

ひたちなか市では、那珂川の多くの支流が市内を横断するように走っており、支流によって形成される谷筋とその間の丘陵地によって起伏の大きい道路が多い。

ひたちなか市小砂町1丁目の市営住宅と支流の中丸川との間の道路では2m近く路面が陥没し、道路中央にあったマンホールは20cmほど隆起した(図-16)。交通量の多い道路ではないため、地震から2ヶ月後もそのままの状態が残されていた。陥没した道路延長は100mにも及ぶ。河川側には公園があったが、公園内の路面には亀裂が見られなかった。この道路には水道管路も埋設されており、地震で被害を受けている。陥没した住宅盛土側の表層地盤は、小石混じりの砂地盤であった。



図-16 液状化によって2m近く路面が陥没（ひたちなか市）

さらに、小砂町より東 1km ほどの中根の水戸勝田那珂湊線（県道 63 号）では、中丸川の支流となる河川の左岸盛土で路面の亀裂，変状が発生し，県道の一部区間を通行止めにして災害復旧工事が行われた（図-17）。被害を受けた箇所は旧河道であり，地形からも谷筋の集水地域であった。災害復旧では，被災した盛土地盤を撤去して，盛土の入れ替え工事が行われていた。



図-17 水戸勝田那珂湊線の道路盛土復旧

4.2 海門町の河川擁壁周辺の崩壊

ひたちなか市の太平洋側では，液状化だけでなく津波の浸水被害を受けている。海門橋では 2.04m の津波が観測されており，那珂湊漁港や隣町の大洗港では沿岸部の建物では 1m 以上の浸水痕が確認された。那珂川河口の海門町 2 丁目では，津波浸水の被害の他，河川護岸が決壊した。決壊箇所は海門橋より内陸の左護岸である。ひたちなか市の報告²⁾によると，図-18 に示すように護岸上部が後ろのめりになるように傾斜していた。図-18 手前の決壊しなかった内陸側の護岸は昭和 51 年に竣工されたものである。

さらに，上記護岸の左岸上流では，護岸天端が河川側に移動した（図-19）。周辺地盤の路面の起伏から液状化の作用も考えられなくはないが，津波による護岸周辺地盤の洗掘の作用も護岸被害に影響を与えている。



図-18 那珂川護岸の崩壊（ひたちなか市海門町2丁目）²⁾



図-19 液状化によって2m近く路面が沈下（ひたちなか市海門町2丁目）

5. 茨城・千葉県の液状化地盤の特徴

本稿では，二次調査ならびにその事前調査において茨城県・千葉県内の液状化被害が広範囲で発生した地域を対象として，液状化地盤の室内実験を実施し，液状化が発生した理由についての足がかりを得るための基礎データを提供している。

5.1 千葉県東北地域の地盤特性

試料の採取は，千葉県の香取市(1 箇所)，旭市(2 箇所)と茨城県潮来市(3 箇所)，鹿嶋市(2 箇所)の計 8 箇所で行った(図-20)。いずれも地表から 1m 程度の深さの試料であり，管路等の復旧工事に採取した。試料の ITK02，ITK03 は上述の日の出地区，KSM01 は鰐川浄水場，KSM02 は鰐川配水場に該当する。



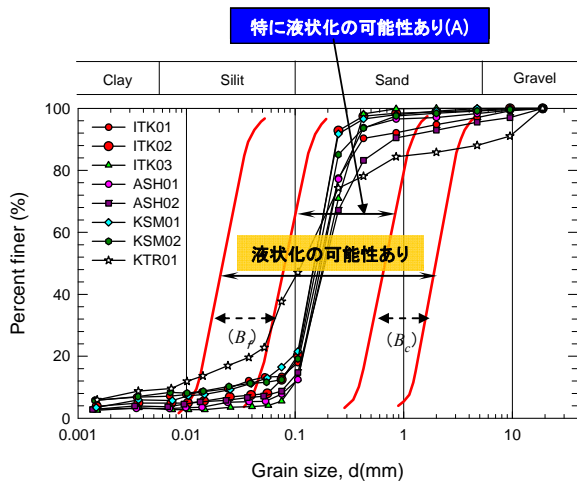
図-20 千葉県東北地域における試料の採取位置
(Google map に加筆)

これら試料の物理的特性および粒度分布をそれぞれ表-1 および図-21 に示している。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾では、想定する地震動に対して検討対象地盤が液状化するか否かを粒度と N_c 値を用いて予測・判定する。とりわけ、均等係数 3.5 が判定の重要な目安となる。この基準に照らすと、潮来市(ITK02), 潮来市(ITK03), 旭市(ASH01), 旭市(ASH02)の4箇所の均等係数が3.5より小さく、その他の潮来市(ITK01), 鹿嶋市(KSM01), 鹿嶋市(KSM02), 香取市(KTR01)の4箇所の均等係数は3.5より大きい。また、図-21 に示すように、「

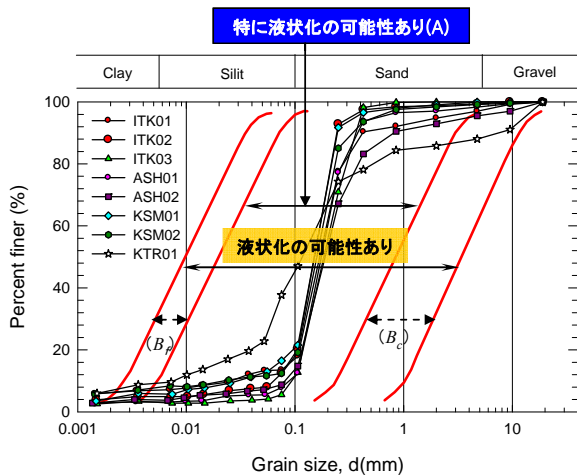
表-1 試料の物理特性

No.	試験試料	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	e_{\max}	e_{\min}	U_c	U_c'
1	潮来 (ITK01)	2.859	1.64	1.01	7.41	2.67
2	潮来 (ITK02)	2.708	1.28	0.80	2.79	1.39
3	潮来 (ITK03)	2.710	1.01	0.63	2.26	1.00
4	旭 (ASH01)	2.794	1.24	0.75	2.22	0.94
5	旭 (ASH02)	2.881	1.41	0.80	2.56	1.03
6	鹿嶋 (KSM01)	2.660	1.42	0.87	5.67	2.37
7	鹿嶋 (KSM02)	2.729	1.35	0.84	8.18	3.06
8	香取 (KTR01)	2.660	1.39	0.90	20.00	2.91

*柱; ρ_s =土粒子密度, e_{\max} =最大間隙比, e_{\min} =最小間隙比, U_c =均等係数, U_c' =曲率係数



(a) 均等係数の小さい砂の判定基準



(b) 均等係数の大きい砂の判定基準

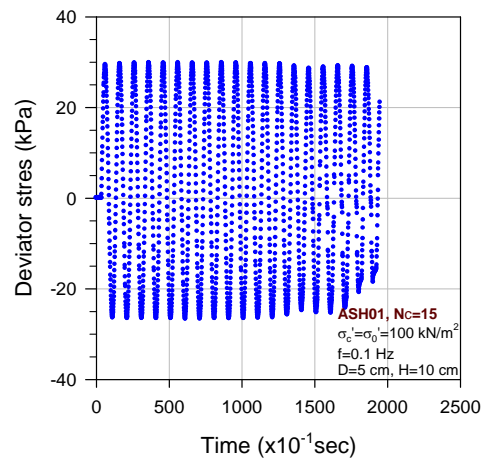
図-21 試料の粒度分布曲線と液状化の可能性

特に液状化の可能性があり」の範囲 A には、香取市(KTR01)で採取した試料以外の全試料が該当している。これは、千葉県を含む関東地域の液状化被害地を入念に調査した安田⁴⁾の報告と同様な結果である。

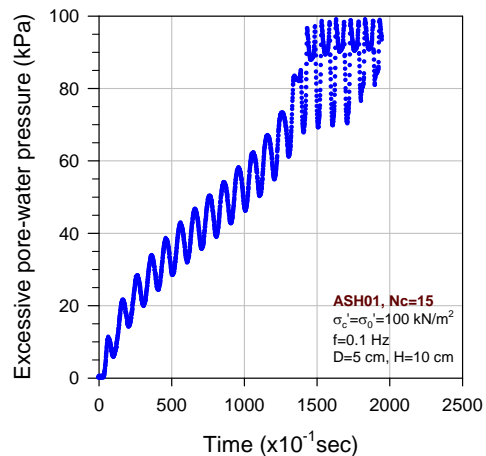
5.2 非排水繰返し三軸試験(液状化試験)

本研究では、鹿嶋市(KSM02), 旭市(ASH01)および香取市(KTR01)の3試料を用いた非排水繰返し三軸試験を実施した⁵⁾。各試料の2mmフルイ通過分を供試体とし、供試体の寸法は、直径50mm, 高さ100mmであった。空中落下法により相対密度 D_r が50%程度となるように、非常にゆる詰め供試体を作製した。供試体の B 値が0.95以上になったことを確認し、有効拘束圧 σ_0' は100kPaに統一した。また、繰返し載荷振動数は $f=0.1\text{Hz}$ とした。

例として、旭市(ASH01)の試料を用いた試験結果を図-22 に示す。この図に示すように、液状化発生の判定は有効拘束圧力と過剰間隙水圧(Δu_w)の比が0.95以上となった時点とし、その時の繰返し載荷回数 N_c を求めた。表-2は、試験結果のまとめである。3箇所の試料の密度の平均値は、それぞれ鹿嶋市(KSM02)で $D_r=54\%$, 旭市(ASH01)で $D_r=44\%$ および香取市(KTR01)で $D_r=47\%$ であった。

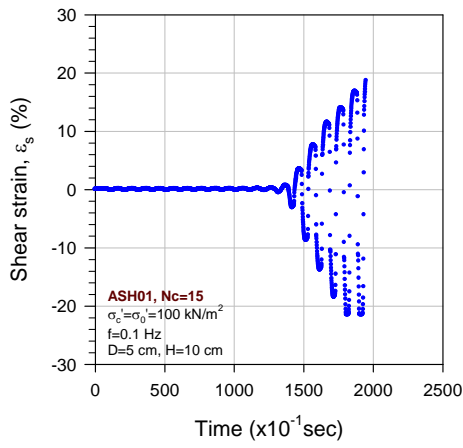


(a) 軸差応力の変化

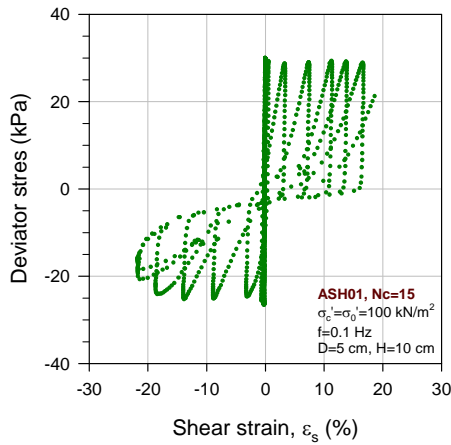


(b) 過剰間隙水圧の変化

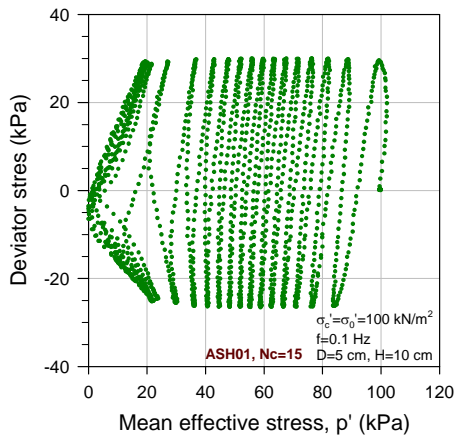
図-22 旭市(ASH01)試料の繰返し三軸試験結果



(c) せん断ひずみの変化



(d) せん断ひずみと軸差応力の関係



(f) 平均有効応力と軸差応力の関係

図-22 旭市(ASH01)試料の繰返し三軸試験結果 (続き)

表-2 繰返し三軸試験結果

	$D_r(\%)$	$\sigma'_d(\text{kPa})$	$\sigma'_d/2\sigma'_v$	N_c
ASH01	44.15	20.25	0.10	69
	44.69	23.37	0.12	30
	41.31	28.28	0.14	15
	43.42	32.75	0.16	5
KSM02	49.63	18.24	0.09	38
	55.44	20.02	0.10	26
	54.03	25.66	0.13	12
	56.98	29.22	0.15	4
KTR01	44.27	21.48	0.11	47
	51.85	30.24	0.15	15
	42.87	34.18	0.17	11
	51.01	46.04	0.23	4

図-23 は、 N_c と繰返し応力振幅比($\sigma'_d/2\sigma'_v$)の関係である。図中には、比較のために $D_r=50\%$ の豊浦砂の試験結果をプロットしている。この図から、例えば $N_c=20$ では今回の試料の方が豊浦砂よりも大きな強度を示していることが分かる。

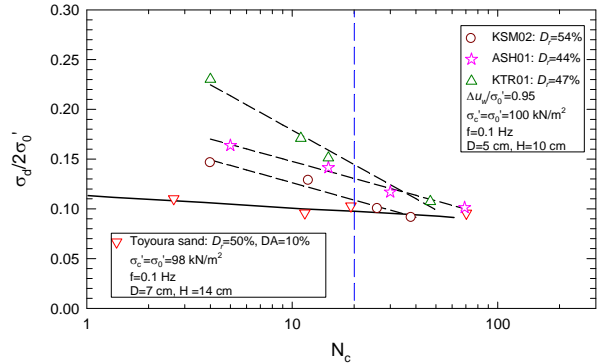


図-23 繰返し载荷回数(N_c)と繰返し応力振幅比($\sigma'_d/2\sigma'_v$)の関係

一方、図-24 は、(独)防災科学研究所の K-NET 鹿嶋で記録された加速度波形(東西方向)¹⁾である。今回は、地震動の継続時間が長いのが一つの大きな特徴であるため、現行設計における $N_c=20$ の見直しが関心事となっている。

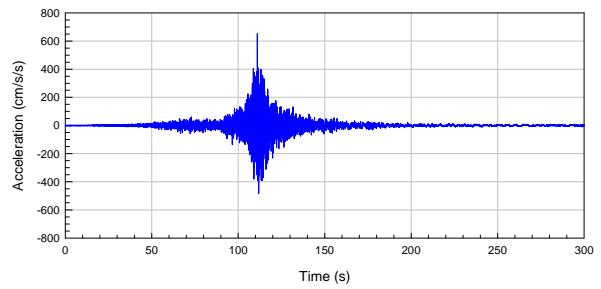


図-24 茨城県鹿嶋市で観測された地震波(東西方向)

図-25 は、現行設計における繰返し载荷回数を $N_c=20$ として、 $(\sigma'_d/2\sigma'_v)_{N_c}/(\sigma'_d/2\sigma'_v)_{N_c=20}$ と N_c との関係を示している。この図から、 N_c が 20 回を越えて 100 回に近くなっても液状化強度の減少傾向は収束していない。

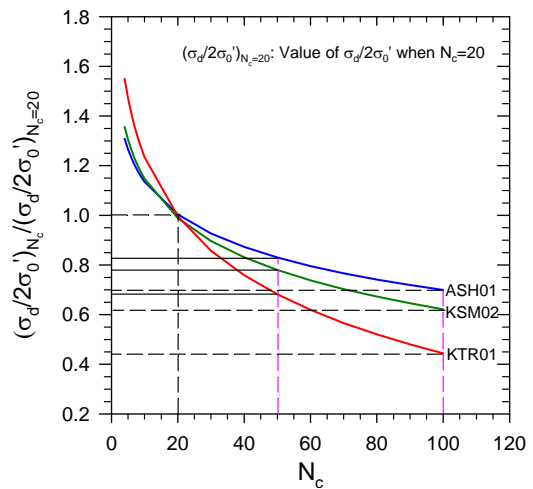


図-25 (N_c)と $(\sigma'_d/2\sigma'_v)_{N_c}/(\sigma'_d/2\sigma'_v)_{N_c=20}$ の関係

6. まとめ

地盤工学会第二次調査団として茨城県内の地震被害について調査し、さらに茨城・千葉の液状化地盤の土質特性について試験を行った。調査結果のまとめは以下の通りである。

- ・ 利根川流域の広域液状化による宅地や地中構造物の被害は甚大である。特に、施設周りは液状化による沈下が集中している。表層 4-5m の埋め戻し土が十分締め固まっておらず、また埋め戻し土も粒径の揃った砂であることがわかった。
- ・ 那珂川水管橋の被害原因の一つとして、橋脚基礎周辺地盤の固さが1 スパン間で大きく異なっていることが考えられる。今後は地震動や水管橋の構造振動特性を考慮して被害メカニズムを明らかにする予定である。
- ・ ひたちなか市では、谷筋や旧河道にあたる場所で液状化による路面の陥没や斜面盛土での亀裂、変状が発生した。いずれも局所的な地盤災害であるが、沈下した変位は 1m 以上で大きい。
- ・ ひたちなか市では津波の被害によって河川護岸が決壊している。護岸地盤の液状化と津波による洗掘による被害とを判別できなかった。
- ・ 現地地盤調査で茨城県、千葉県で液状化を確認した地域の 8 箇所採取した試料を用い、物理的特性と粒度分布曲線を求めた。港湾の施設の技術上の基準・同解説に基づいて各試料の粒度分布曲線結果から、8 箇所の全地盤の液状化の可能性があるが、均等係数が 3.5 より小さい 4 箇所の地盤については、液状化の可能性が非常に高いと判断された。
- ・ 地震動に対する液状化特性を調べるため、3 箇所(鹿嶋市(KSM02), 旭市(ASH01), 香取市(KTR01))の試料で繰返し三軸試験(液状化試験)を行った。その結果、各結果の推定線が直線的になっているが、 $\sigma_d/2\sigma'_0$ の値によって液状化が生じるに必要な繰返し載荷回数(N_c)が予測できると考えられる。
- ・ 茨城・千葉県の液状化の発生メカニズムを調べるための足がかりとして、液状化したサイトから採取した試料群を用いた一連の非排水繰返し三軸試験を実施した。今回の試験の範囲では、ほとんどすべての試料の一次的性質は、「液状化の可能性あり」の砂質土の範囲にあった。さらに、現行設計における繰返し回数 $N_c=20$ をはるかに越えて 100 回に近づいても液状化強度の減少傾向は収束しないことが分かった。

術者のための土と基礎シリーズ20, 1993.

- 4) 安田 進, 関東の液状化被害. 東北地方太平洋沖地震 災害調査報告会(第一回)開催の報告, 地盤工学会, 平成23年4月11日, 2011.
- 5) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, その冊II, pp.730-749, 2011.

参 考 文 献

- 1) (独)防災科学技術研究所: 強震観測網K-NET, <http://tkamada.web.fc2.com/jishin/jishin.htm>, 2011.
- 2) ひたちなか市: ひたちなか市の地震被害 (<http://www.city.hitachinaka.ibaraki.jp/SKYU/index.html>), 2011.
- 3) 土質工学会: 液状化対策の調査・施設から施工まで, 現場技