

【東日本大震災 調査報告 3】

東北地方太平洋沖地震における東京湾岸地域の液状化被害調査

Damage Investigation of Liquefaction in Tokyo Bay Area after the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

	平田 裕一 YUICHI HIRATA
	高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
建築技術部	宮田 勝利 KATSUTOSHI MIYATA
建築技術部	高岡 裕二 YUJI TAKAOKA
構造設計ディビジョン	瀬藤 慎一 SHINICHI SETO

東北地方太平洋沖地震による東京湾岸地域の液状化被害状況を調査した。調査対象は、当社施工物件を中心に行っている。液状化対策工法を採用した物件では、建物の構造的被害は、ほとんど観察されていない。液状化被害は、地盤沈下、地盤変状に伴うライフラインの被害が顕著であった。液状化対策工法の効果を確認するために、地盤物性の検討と有効応力解析を実施している。解析結果は、観察された液状化状況と調和的であった。

キーワード： 東北地方太平洋沖地震、東京湾岸地域、液状化、液状化対策工法、有効応力解析

Damage investigation of liquefaction was executed in Tokyo Bay area after the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. The investigation objects were buildings constructed by Sumitomo Mitsui Construction Co. While damage of buildings was hardly observed, damage of lifeline by land subsidence and ground transformation was remarkable. The comparison between soil properties and the effective stress analysis were carried out to confirm the effect of countermeasures against liquefaction. It is demonstrated that the effective stress analysis can simulate the observed behavior.

Key Words: The 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, Tokyo bay area, liquefaction, countermeasures, effective stress analysis

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、三陸沖を震源とするマグニチュード9.0というこれまでに経験したことのない国内最大規模のものであった。東北地方から関東地方にかけての太平洋沿岸で、大きな津波が発生し、各地に甚大な被害が生じた。本地震が多く、その被害状況を把握することが急務であった。

筆者らは、主として、液状化被害の状況を把握するために、地震発生直後から、東京湾岸地域の液状化被害調査活動を行った。本報告は、その調査結果と若干の分析結果をまとめたものである。

2. 地震および地震動概要

本地震は、最大で震度7（宮城県栗原市、3成分加速度合成値2933gal）が観測されるなど、震源域に近接する岩手県、宮城県、福島県など太平洋側の広い地域において、強い揺れが生じた。震源域は、450km×200kmと広範囲におよんでいる。この震源は、おおむね東西に圧縮される逆断層型であり、破壊開始点附近の宮城県沖と、茨城～福島県沖に、すべり量の大きな強震動生成領域が2つ同定されている。

観測地震動は、(独)防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET, KiK-net)、(独)建築研究所が管理する地震計などの記録が公開されている。これらから推定される東京湾岸地域の計測震度は、5前後であり、大部分の地域は、5弱であった。PGAは150gal程度の観測点が多いが、一部では250galを超えているところも見られた。

3. 液状化被害調査結果

(1) 液状化被害調査概要

本被害調査は、地震後の復旧対応を迅速に進めることおよび今後の液状化対策に関する資料収集のために行ったものである。調査項目は、主に以下の3項目である。

- ① 本地震による液状化現象の状況の把握
- ② 当社施工物件の被害状況の把握
- ③ 液状化対策工法の効果の確認

調査範囲は、東京湾岸地域（千葉、海浜幕張、市川、新浦安、舞浜、新木場、有明、豊洲、東京）である。その地域の中で、当社で液状化対策工法を採用している施工物件を中心に被害調査を行った。全調査建物数は、25棟である。調査期間は、2011年3月12日～3月18日である。表-1に調査した建物一覧を示す。

表-1 調査建物一覧

地区	番号	用途	階数	躯体
新浦安	1	集合住宅	14	RC
	2	集合住宅	14	RC
	3	集合住宅	13,14	RC
	4	養護施設	4	RC
	5	集合住宅	18	RC
	6	集合住宅	14	RC
	7	宿泊施設	8	-
新木場	8	物流施設	5	RC
	9	物流施設	7	RC,S
舞浜	10	商業施設	-	RC,S
海浜幕張	11	商業施設	-	RC,S
有明	12	集合住宅	33	RC
	13	集合住宅	33	RC
豊洲	14	集合住宅	23,20,2	RC
	15	集合住宅	52,32,7,5,4	RC
	16	学校	13	S
市川	17	集合住宅	24	RC, SRC
	18	集合住宅	24	RC, S
東京	19	集合住宅	25,9,5	RC
	20	物流施設	5	複合
	21	物流施設	5	複合
	22	集合住宅	33	RC
千葉	23	工場	-	S
	24	学校	9	S
	25	商業施設	-	S

(2) 東京湾岸地域の被害状況

a) 新浦安地域

新浦安地域の液状化被害状況を写真-1, 2, 3 に示す。写真-1 は、新浦安駅前の EV 周りの液状化による地盤沈下状況である。数 10cm 程度の沈下が認められ、周辺に著しい噴砂が観察された。写真-2 は、液状化により建物が、砂に埋まっている状況である。建物の 1 階床に砂が入り込んでいる。写真-3 は、歩道のマンホールが液状化のために 2m 近く浮き上がっている状況である。このようなマンホールの浮上りは、数多く見られた。新浦安地域は、地震直後から各種報道機関に取り上げられており、今回の地震において、顕著な液状化が観察された地域の一つ



写真-1 新浦安駅前 EV 周辺の地盤沈下



写真-2 新浦安地域のセブンイレブンの液状化被害



写真-3 新浦安地域のマンホールの浮き上がり

である。

b) 新木場地域

新木場地域の液状化状況を写真-4, 5, 6 に示す。写真-4, 5 は、新木場駅前から、若洲方向に向かう歩道で撮影したものである。液状化により噴出した砂の量が夥しい。

写真-4 より、マンホール上面から測定して、30cm 以上の砂が堆積している。写真-5 では、自転車の車輪が、およそ半分埋まっている。写真-6 は、歩道の沈下状況である。歩道の沈下により、敷地境界付近のインターロッキングが、大きく傾斜している。



写真-4 新木場地域のマンホールの噴砂の堆積



写真-7 舞浜駅前の液状化による歩道の被害



写真-5 新木場地域の噴砂に埋まる自転車



写真-8 舞浜駅前の歩道の沈下、浮き上がり



写真-6 新木場地域の歩道の沈下



写真-9 舞浜駅前のデッキ柱脚周辺の被害状況

新木場地域は、工場施設などが多く、住宅地と比べて報道機関の取り上げられ方が少ない。しかしながら、実際には、大きな液状化被害が生じている。

c) 舞浜地域

写真-7, 8, 9 に舞浜地域の液状化状況を示す。写真は、いずれも舞浜駅前周辺の被害状況である。数 10cm 程度の地盤変状が観察された。全体的に、歩道がうねるような上下の不陸が見られた。

(3) 当社施工物件の被害例

本液状化調査を行った 25 棟の建物は、液状化対策工法を適用した箇所では、建物の構造的な被害は生じていない。ただし、ライフラインの損傷などに伴う設備的な被害や、駐車場、外構において、噴砂、沈下などが生じている。これらの中から、新浦安地域にある代表的な 2 つの建物の被害状況を図-10, 11 に示す。以下、外構部分の被害が顕著であった建物を①、被害が少なかった建物を②と記す。

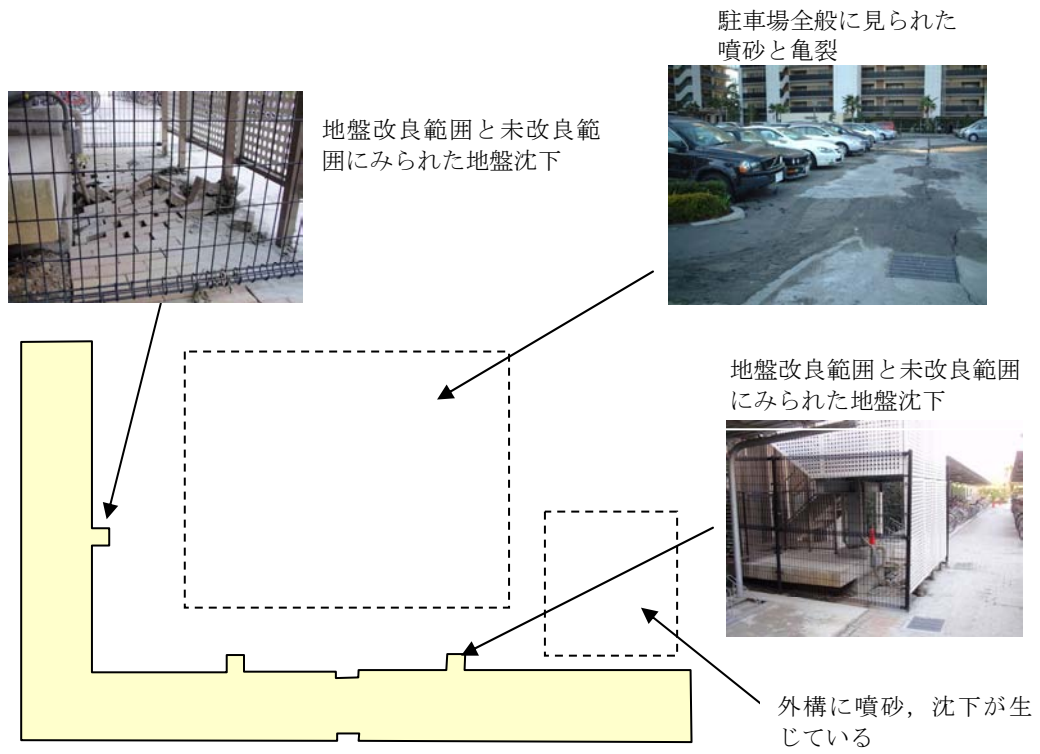


図-10 建物①の被害状況例（駐車場，外構などの液状化被害が顕著）

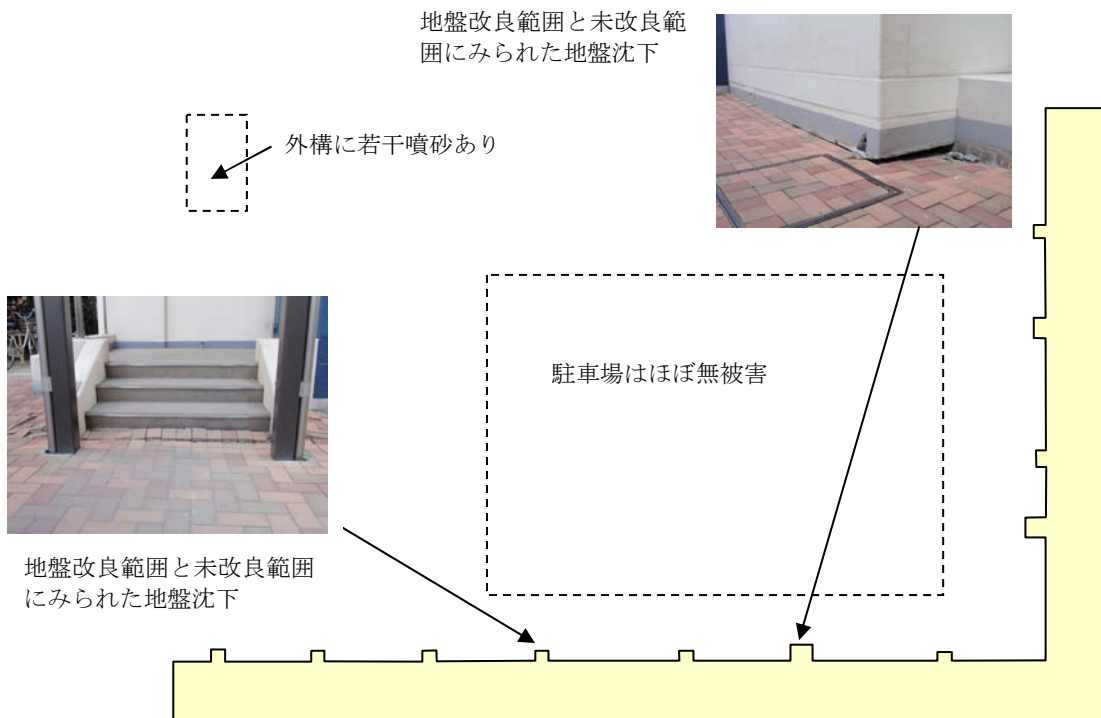


図-11 建物②の被害状況例（駐車場，外構などの液状化被害が軽微）

図より、建物①では、液状化対策工法を採用していない駐車場で、著しい噴砂とアスファルトの亀裂が確認された。この亀裂は、施工時の打継ぎ面に沿って生じていると思われる。目視した範囲では、駐車場は、20cm程度の沈下が生じている。また、外構部分において噴砂、沈下が生じている。地盤改良範囲と未改良範囲の境界領域においても地盤沈下が見られた。

これに対して、建物②では、液状化対策工法を採用していない駐車場においても、噴砂などの影響が確認できなかった。ただし、外構の一部と地盤改良範囲と未改良範囲の境界領域において、建物①と比較すると小さいが、地盤沈下が確認されている。

4. 液状化被害状況の分析

(1) 被害状況の検証

前節に示した当社施工物件の液状化被害状況を評価するために、新浦安地域の面調査、土質柱状図、細粒分含有率、FL値の4項目に関してまとめる。

a) 新浦安地域の面調査

新浦安地域では、地震直後から東京大学東畑郁生教授らによる面調査（調査日：2011年3月13,15,16,18日）が行われている¹⁾。その調査結果の一部を、図-12に示す。図は、当該地域を踏査し、液状化の痕跡（噴砂、沈下など）のあったところを赤、それ以外を青で示している。

図より、前節に示した建物①の建設された高洲地区は1980年に埋め立てされた土地であり、「全域液状化」と判定されている。これに対して、建物②が建設された明海地区は、1988年に埋め立てされた土地であり、海側ではほとんど液状化が確認されていない。

同調査によれば、同じ新浦安地域内においても、液状化による被害状況は大きく異なる。これらの違いは、埋



図-12 東畑研究室による新浦安地域の液状化調査

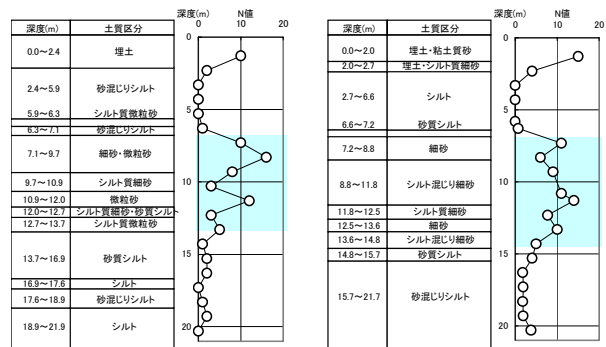
立て時期、埋立てに用いた地盤材料、埋立て施工方法などの影響を受けているものと思われる。

建物①、②の敷地内において、液状化対策を行っていない箇所の液状化状況は同調査の報告と対応している。

液状化対策を施す前の地盤の特性として、今回の地震に対しては、建物①周辺（高洲地区）が、建物②周辺（明海地区）よりも液状化の影響を受けやすかったことが推測される。

b) 土質柱状図

建物①、②の敷地の土質柱状図を図-13に示す。図より、表層2~3mは埋土であり、その下に、N値0の軟弱なシルト層がある。深度約7m以深において、N値10前後の細砂層があり、そこから深度14m程度までが、液状化対象層である。これらは、両地盤に共通して見られる特徴である。土質柱状図から認められるN値の深度分布は、表層近傍において若干建物②が大きいものの、全体的にはかなり類似していると思われる。

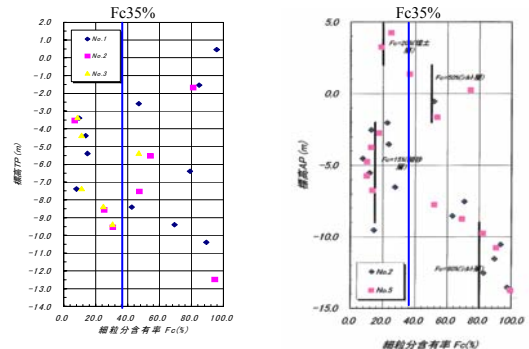


a) 建物①（高洲地区） b) 建物②（明海地区）

図-13 土質柱状図

c) 細粒分含有率 Fc

図-14に細粒分含有率の深度分布を示す。図より、建物①では、TP-3.5m~9.5mにFc=35%以下の層が見られる。建物②では、AP-2.0m~9.5m（≒TP-1.0m~8.5m）に存在する。両者の細粒分含有率の構成も、かなり類似している。



a) 建物①（高洲地区） b) 建物②（明海地区）

図-14 細粒分含有率

d) FL 値

表-2, 3 に建物①, ②の地盤の代表的な FL 値を示す。表より, 地表面加速度 200Gal の場合, 建物①の FL 値は, 深さ方向の平均値として評価した場合, 0.736~1.065 であり, 建物②では, 0.842~1.115 である。また 350Gal では, 建物①は, 0.421~0.609 であり, 建物②では, 0.481~0.637 である。2 つの地表面加速度で, ともにわずかながら建物②の FL 値が大きい。また, 深度方向の FL 値の標準偏差は, 建物①では, 200Gal の場合, 0.105~0.408, 350Gal の場合, 0.060~0.234, 建物②では, 200Gal の場合, 0.187~0.632, 350Gal の場合, 0.107~0.361 であり, 建物②のばらつきがやや大きい。

これは, 建物①の地盤に比べ, 建物②の地盤の液状化抵抗が, 局部的にはかなり大きくなっている箇所が混在すること示している。このことや, 図-13 の土質柱状図に見られた表層の N 値が, 建物②が若干大きいことを考え合わせると, 建物②の地盤は, 液状化対象層から表層にかけて, 局部的に液状化抵抗の大きい層と弱い層が互層のような構造を形成し, そのことが, 建物②の被害を小さくしたのではないかという可能性が考えられる。

表-2 建物①地盤の F 値

標高 TP	No.1		No.2		No.3			
	200	350	200	350	200	350		
-3.395	0.825	0.471	-3.53	0.691	0.395	-3.37	0.886	0.506
-4.39	1.601	0.915	-5.53	—	—	-4.37	1.14	0.651
-5.39	0.766	0.438	-7.53	0.869	0.497	-5.375	—	—
-6.395	—	—	-8.56	0.623	0.356	-7.37	1.16	0.663
-7.39	0.767	0.438	-9.545	0.762	0.435	-8.37	1.072	0.612
-8.405	—	—	-12.49	—	—	-9.375	1.069	0.611
平均	0.990	0.566	平均	0.736	0.421	平均	1.065	0.609
標準偏差	0.408	0.234	標準偏差	0.105	0.060	標準偏差	0.108	0.062

表-3 建物②地盤の FL 値

標高 AP	No.1		No.2		No.3			
	200	350	200	350	200	350		
-1.76	1.073	0.613	-2.058	0.635	0.363	-1.85	—	—
-2.76	0.666	0.38	-2.558	2.366	1.352	-2.85	1.277	0.73
-3.76	0.791	0.452	-3.558	1.002	0.572	-3.85	0.74	0.423
-5.26	0.885	0.506	-4.558	0.943	0.539	-5.35	0.915	0.523
-5.76	1.157	0.661	-5.558	0.72	0.411	-5.85	0.632	0.361
-6.76	0.723	0.413	-6.558	1.517	0.867	-6.85	0.948	0.541
-7.76	0.799	0.457	-7.558	—	—	-7.85	0.876	0.501
-8.76	0.638	0.365	-8.558	—	—	-8.85	0.918	0.525
-9.76	—	—	-9.558	0.621	0.355	-9.85	—	—
平均	0.842	0.481	平均	1.115	0.637	平均	0.901	0.515
標準偏差	0.187	0.107	標準偏差	0.632	0.361	標準偏差	0.201	0.115

(2) 液状化対策工法の効果

被害例で示した建物①, ②で採用した液状化対策工法は, 静的締固め工法である。液状化対策範囲は, 敷地内の住棟直下であり, 駐車場および外構部分には適用されていない。なお, 液状化対策工法における設計クライテリアは, 建物①, ②で若干異なる。これは, 地盤改良の設計指針²⁾の刊行が, 2006年11月であり, その年を挟

んで, 2 つの建物が設計, 施工されたためである。ただし, クライテリアの違いによる地盤改良の改良ピッチなどには, 大きな差異はない。

a) 建物①の液状化対策効果

図-15 に改良後の N 値の深度分布 (施工後結果) を示す。砂杭の改良ピッチは, 2.1m (改良率 8%) である。図より, 地盤改良後 N 値は, 10 以上増加している。建物①の地震後調査で確認された液状化発生箇所は, 液状化対策工法を採用していない駐車場などに集中していた。液状化対策工法を適用した箇所では, 顕著な液状化の発生が認められず, N 値の増大とも整合的である。液状化対策工法の効果が現れていると思われる。ただし, 液状化による路面の沈下やがたつきなどの被害がマンション本体近傍において生じていることから, 適切な余改良範囲についての検討は, 今後進める必要があると思われる。

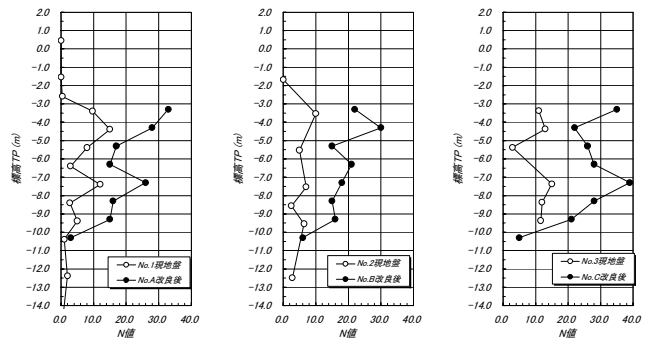


図-15 建物①の液状化対策後の N 値分布

b) 建物②の液状化対策効果

図-16 に改良後の N 値の深度分布 (施工後結果) を示す。砂杭の改良ピッチは, 2.0~2.1m (改良率 9.6~8.7%) である。図より, 地盤改良後 N 値は, 建物①と同様に, 10 以上増加している。建物②の地震後調査では, 対策工法の採用した箇所と採用していない箇所ともにあまり著しい液状化の発生が認められていない。建物②においても, 液状化対策工法が有効であったものと思われる。

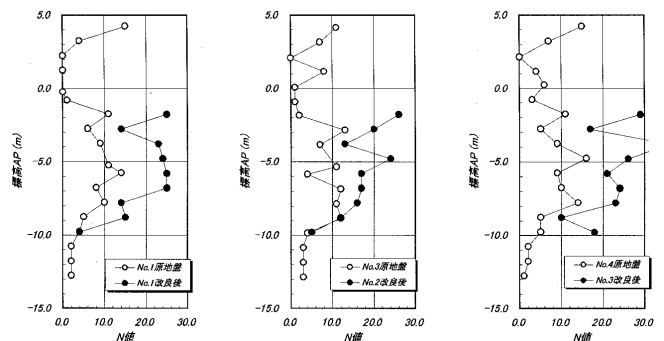


図-16 建物②の液状化対策後の N 値分布

(3) 液状化・残留変形解析

本節では、新浦安地域の建物①を対象とし、解析的に地盤の液状化特性ならびに残留変形特性（沈下特性）について検討した結果を示す。解析条件（地盤のモデル化、入力地震動など）は、現時点で入手可能な情報に基づいて設定している。このため、今回示す結果は、暫定的なものであり、今後、詳細な情報が得られた場合、適宜解析結果を修正する予定である。

地震応答解析は、2次元液状化解析プログラム FLIP を用いた。また、FLIP の解析結果に基づき、応力・浸透の連成した Biot の多次元圧密方程式を解析することにより、地震終了後の過剰間隙水圧の消散・移動およびこれに伴う沈下・変形の予測を行っている。

地震応答解析に用いた入力地震動は、公開されている観測地震動の中から、建物建設地点に近く、目視観察の報告から液状化の影響が少ないと思われる地点の観測波形を工学的基盤に引戻して用いている。引戻し波形の最大加速度は 204Gal である。

解析モデルを図-17 に示す。基礎地盤を 15 層に分け、それぞれマルチスプリング要素でモデル化した。マンション躯体および基礎梁は、建物の水平固有周期が対応するように等価剛性と等価質量を評価し、平面ひずみ要素としてモデル化した。杭基礎は梁要素でモデル化している。なお、以下において、建物直下の地盤を構造物近傍地盤、建物から離れた周辺地盤を自由地盤と表記する。

マルチスプリング要素のパラメータは、「港湾技研資料：FLIP パラメータ簡易設定法（1997）」³⁾ に準じて設定した。この方法により、N 値と細粒分含有率 FC から計算に必要な材料パラメータ（地盤）を設定することが可能である。材料諸元は、当該敷地のボーリングデータから設定している。

図-18 は、過剰間隙水圧比ならびにせん断ひずみの深度分布である。図-19 は、過剰間隙水圧比のコンター図である。図より、過剰間隙水圧比は深度 6m～10m の砂層において 1 近くになっており、これらの層は液状化に至っている。また、深度 40m 付近の砂層においても過剰間隙水圧比が若干上昇していることが認められる。

せん断ひずみは、GL-10m 以浅の液状化した砂層において大きく生じている。GL-10m 以深のシルト層においても比較的大きな値となっている。GL-9m 付近の L6 層のせん断ひずみが大きな値となっているのは、上下の砂層と比較して相対的に N 値が小さいため、ここにひずみが集中したものと考えられる。なお、この層の過剰間隙水圧比がゼロとなっているのは、細粒分含有率が比較的高い (Fc=50%) ため、液状化しないものとしてモデル化したことによる。自由地盤と構造物近傍の結果を比較す

ると、せん断ひずみは構造物近傍の方が大きく、特に 10m 以浅において顕著である。

過剰間隙水圧消散後の変形量に関して、図-20 に沈下量の深度分布および地表面沈下量を、図-21 に鉛直変位のコンター図を示す。

地表面沈下量は、自由地盤で 19.7cm、構造物近傍地盤で 0.3cm であった。この値は、実際の観測状況と調和的である。この結果より、自由地盤における沈下量に関して、地表面沈下量のほとんどが、10m 以浅の液状化層において生じているとしても解釈可能であることになるが、これについては地盤物性の評価、入力地震動の評価の影響が大きいため今後の課題としたい。

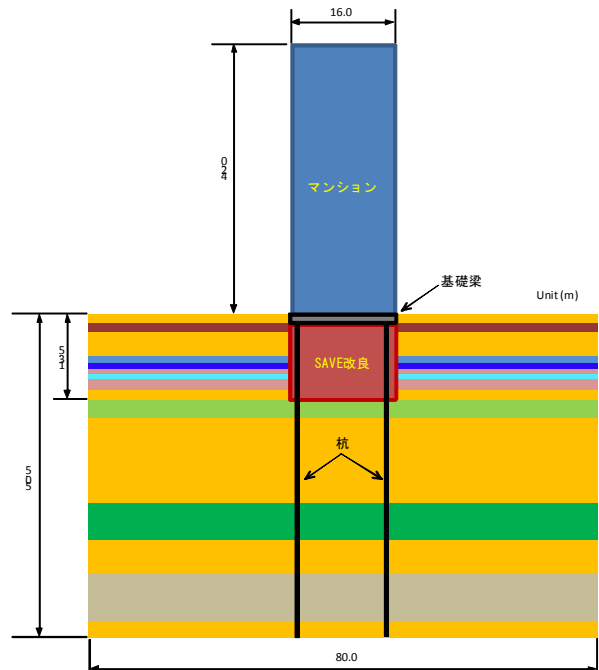


図-17 解析モデル

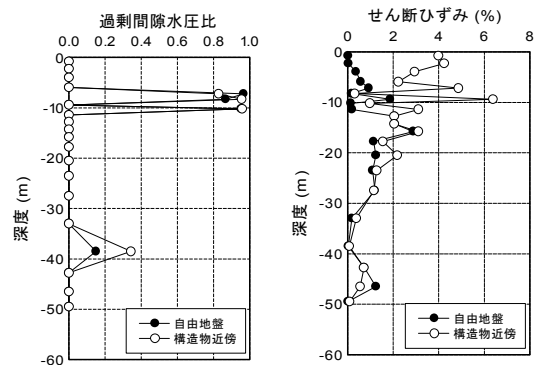


図-18 過剰間隙水圧比とせん断ひずみの深度分布

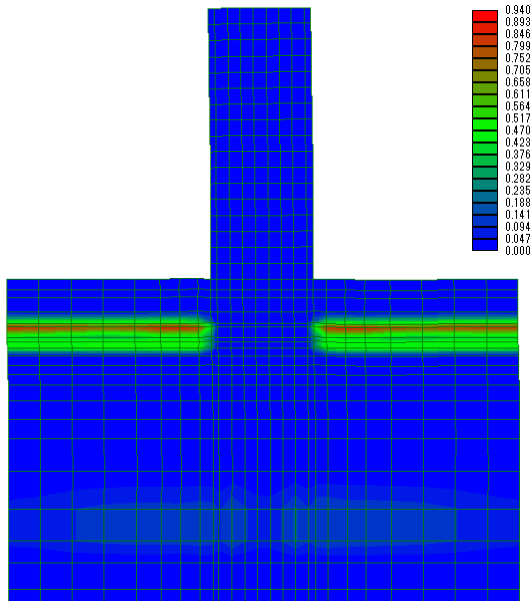


図-19 過剰間隙水圧比のコンター図

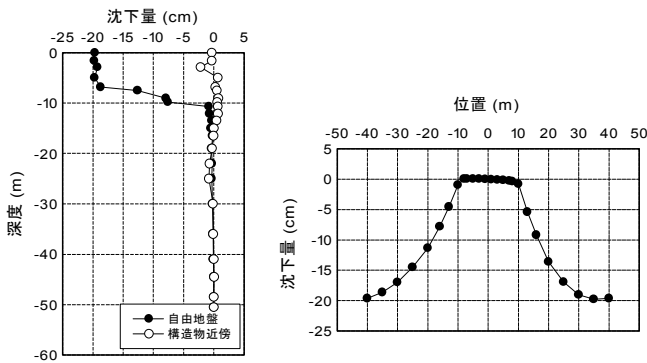


図-20 沈下量の深度分布および地表面沈下量

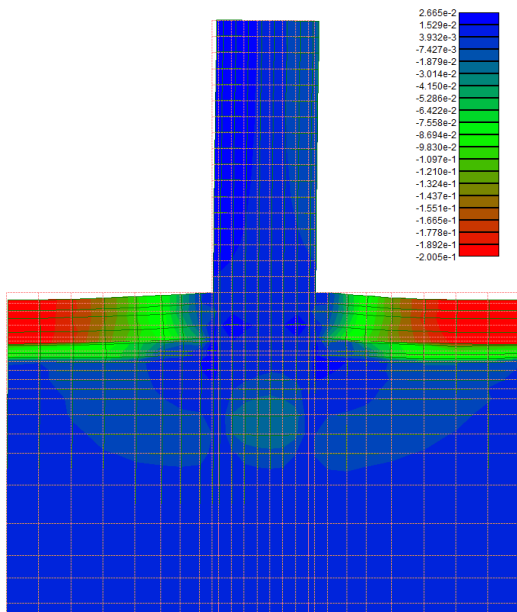


図-21 地盤鉛直変位のコンター図

5. おわりに

2011年3月12日～3月18日にかけて東京湾岸周辺地域を中心として液状化被害調査を実施した。一部の物件においては外構設備やライフラインなどに被害が生じたが、本体基礎における損傷などの大きな被害は認められなかった。地盤改良による液状化対策効果については、改良範囲にある本体構造物に対しては、対策効果が確認できたものの、改良範囲と未改良範囲の境界における地表面沈下の問題などが指摘される。

液状被害状況と地盤物性の比較検討から、局部的に液状化抵抗が大きい層が混在する場合に、被害が小さくなる可能性を考察したが、その評価に関しては、今後の課題である。また、液状化・残留変形解析の結果は、液状化観察状況と調和的であった。

平成13年の国交省告示第1113号には、地震時に液状化する恐れのある地盤の場合は、建築物の自重による沈下やその他の地盤の変形などを考慮して建築物又は建築物の部分に有害な損傷、変形および沈下が生じないことを確かめなければならないとしている（ただし、確認申請を不要とする比較的規模の小さい第四号建築物を除く）。

液状化に対して、杭基礎の場合は、液状化層を地盤改良し、杭の設計応力の軽減を図るという方法や、地震時の液状化を考慮して杭自体を剛強にするなどの方法があり、その設計手法は、おおむね確立しているものと思われる。これに対して、直接基礎の場合は、地盤の液状化の特性そのものの評価精度と設計の考え方が密接に関連するので、液状化に対しどのような対策を行うかは、今後の課題の一つであると考えられる。

今後は、引き続き本調査結果の分析、解析的検討の評価精度の向上などを行うとともに、低コストの合理的な液状化対策工法について検討する予定である。

参考文献

- 1) 東畑郁夫：東北地方太平洋沖地震（2011/03/11）南関東地区の被害調査速報（東京大学），2011.3
- 2) 日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針，2006.11
- 3) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法，港湾空港技術研究所資料 0869，1997.6