

建物の外構地盤における液状化被害低減型工法に関する研究

Study on the Construction Method Reducing Liquefaction Damage in the Exterior Ground of Buildings

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

平田 裕一 YUICHI HIRATA

建築技術部 宮田 勝利 KATSUTOSHI MIYATA

建築技術部 高岡 雄二 YUJI TAKAOKA

建築技術部 西成田 由 YU NISHINARITA

構造設計ディビジョン 瀬藤 慎一 SHINICHI SETOU

集合住宅における駐車場等外構部の液状化被害の低減を目指し、浅層混合処理およびドレーンの組合せによる低コストの液状化被害低減型工法の開発を進めている。まず、実験的にこの工法による対策が間隙水圧の上昇特性や地盤の応答特性、ならびに沈下特性に与える影響について検討した。1G場における模型振動実験の結果、浅層混合処理は液状化に伴う沈下に対して低減効果があること、これにドレーンを加えて過剰間隙水圧の消散を促進することにより沈下量をさらに低減できることが明らかとなった。

キーワード：液状化、模型振動実験、間隙水圧消散工法、浅層混合処理工法

Low-cost liquefaction damage reduction method by shallow mixing and drains are under development to apply to exterior ground of condominium. In this study, shaking model tests in 1-G environment were carried out to evaluate the effects of them on pore pressures, soil responses and settlements by liquefaction. The followings were confirmed; 1) The shallow mixing reduces the settlement, 2) The drain is effective to reduce the settlement due to pore pressure dissipation.

Key Words: Liquefaction, Shaking Table Test, Drain Method, Shallow Mixing Method

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災により東京湾岸地域や千葉県、茨城県など非常に広範囲に液状化による被害が発生した。地震発生直後より、筆者らは東京湾岸地域において液状化を考慮して設計・施工した建物に重点をおき液状化被害調査を実施した¹⁾。本調査によれば、建屋直下が液状化すると判定され、対策工を施した範囲では液状化被害は確認されなかった。しかしながら、液状化対策を行っていない駐車場や道路、地中埋設配管などの外構部分では、本来その部位が果たしていた機能を保持できないほどの甚大な被害が発生し、緊急時活動のみならず日常の生活活動に大きく支障をきたす状態となっていた(写真-1)。

従来、外構部において液状化対策が十分に行われてこなかった要因としては、集合住宅のような建物の場合、敷地面積に対して外構面積が占める範囲が広く、液状化

対策に要する経済的負担が大きいことによるものと考えられる。しかし今回の震災による液状化被害を契機に、地震直後の救助活動・復旧工事が支障なく行われ、日常生活の継続性が維持できるよう、今後は外構部分における適切な液状化対策の必要性が高まるものと考えられる。

図-1は、液状化対策における対策工の性能とそのコストの関係を示したものである。当然のことながら、要求性能が高くなるのに伴い必要とされるコストは高くなる。本研究では、新設・既設を問わず外構部分への適用が可能であり、液状化の発生を許容する一方で日常生活に支障を生じない程度に被害を抑制する性能とそれに対応した低コスト化を図る液状化被害低減型工法の開発を目的として検討を行った。

本報は、開発目標とする低コストの液状化被害低減型工法の概要とその効果を検討するために実施した模型振動実験結果について報告するものである。



写真-1 液状化被害状況（新浦安）



写真-2 振動台と2次元固定土層

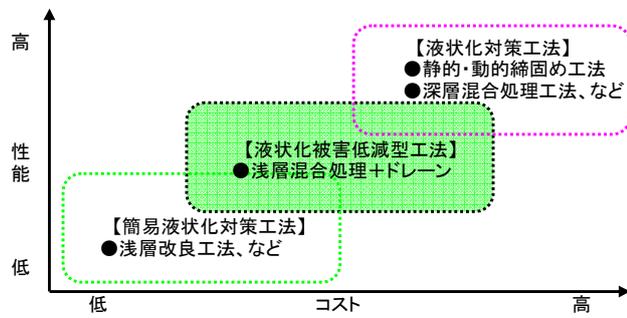


図-1 液状化工法の費用対効果の関係

よって液状化に伴うある程度の沈下は許容するものの、過大な沈下や不同沈下，ならびに多量の噴砂の流出を従来の液状化対策工法に比べて安価に防止しようとするものである。なお，既往の研究²⁾によると，液状化に伴い住宅が傾いた場合，その傾斜角が10/1000程度以上になると水平工事が必要になることが報告されている。この傾斜角は，建物の沈下量が50~100mm程度の場合に生じるものである。液状化被害低減の指標として沈下量に着目した場合，これらの値が目安になりうると考えられる。

3. 模型振動実験概要

模型振動実験は，浅層混合処理による改良層とドレーンの対策効果を確認することを目的として実施した。実験は写真-2に示す2次元固定土槽（長さ2650mm×幅390mm×深さ600mm）を所定の間隔で3槽に仕切った構造にしたものを用い，縮尺率1/10として重力場で実施した。これにより3種類の模型地盤を同時に加振できるようにした。なお，各隔壁には鋼製板を用い，その両面にはウレタンラバーを貼付けて固定端の影響を小さくするようにした。ドレーンは元来円柱状のものを2次元的にモデル化したものであり，開口率35.4%の穴あき鋼板を中空矩形形状（幅370mm×奥行き40mm×高さ580mm）に加工したもので，前面をステンレスメッシュ（目開き75μm）で覆った構造である。

表-1に示す実験ケースは浅層混合処理，ドレーンの有無および排水距離すなわち土槽幅をパラメータとして設定した。図-3および図-4は，実験ケースごとの実験模型と計測器配置を示したものである。図-3に示すCASE1は，対策工の有無に着目したものであり，CASE1-1は無対策，CASE1-2は浅層混合処理のみ，

2. 液状化被害低減型工法

本研究における低コストの液状化被害低減型工法（以下，本工法）とは，図-2に示すように浅層混合処理と簡易なドレーンを組み合わせたハイブリッド形式のものである。例えば，外構部分に位置する駐車場や車路では，表層の舗装直下に地盤改良された路盤・路床が存在する。本工法ではこれらを浅層混合処理による改良層として利用し，さらに簡易なドレーンを設置することに

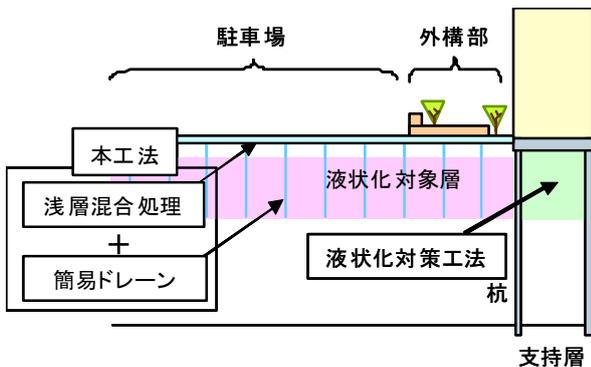


図-2 液状化被害低減型工法イメージ

表-1 実験ケース

実験ケース	浅層混合処理	ドレーン	土槽幅 (比率)
CASE1	1	無	2
	2	有	2
	3	有	2
CASE2	1	有	1
	2	有	2
	3	有	3

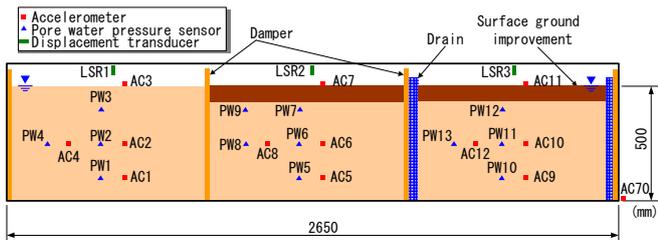


図-3 実験模型 計測器配置図 (CASE1)

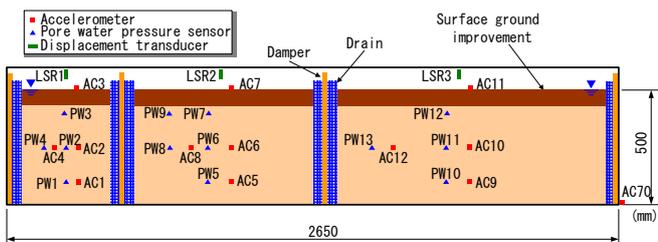


図-4 実験模型 計測器配置図 (CASE2)

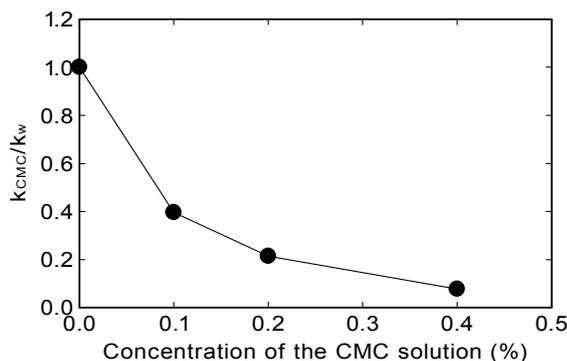


図-5 透水係数比 (k_{CMC}/k_w) と CMC 溶液濃度の関係

CASE 1-3 は浅層混合処理にドレーンを加えたものである。図-4 に示す CASE2 は、ドレーンの排水距離の違いに着目したものであり、それぞれの土槽幅は排水距離の比が 1:2:3 の割合になるように設定した。なお、改良層は早強性の無収縮モルタル (密度 $2.1g/cm^3$) を用いて作製し、層厚は約 70mm とした。

計測項目は、加速度、間隙水圧および沈下量である。加速度計は 3 深度 (地表面 $\pm 0mm$, $-250mm$, $-400mm$),

間隙水圧計は 3 深度 (地表面 $-100mm$, $-250mm$, $-400mm$) にそれぞれ設置した。また、沈下量は定規を用いて所定の位置における地表面沈下量を計測したのに加え、各土槽の中央部に直接基礎構造物を模して改良体と同じ材料で作製した模型 (直径 40mm, 高さ 40mm) を設置し、これの沈下量をレーザー変位計により計測した。

地盤材料には珪砂 6号を用い、ふるいを介した水中落下法により初期相対密度 30% を目標として模型地盤を作成した。しかしながら実際の模型地盤の初期相対密度は CASE1 が約 20%, CASE2 が約 40% となり、目標値に対してばらつきが生じた。この要因としては後述する間隙溶液に用いた粘性流体の粘度の違いに起因して土粒子の沈降速度が両ケースで異なったことが影響しているものと推察する。土粒子の CASE1 および CASE2 の粘性流体の粘度が事前に実施した透水試験の結果から、使用した珪砂 6号 ($D_r=30%$) の透水係数は $k=2.8 \times 10^{-2} cm/sec$ であった。支配方程式に基づいた井合³⁾の相似則を参考にすると、プロトタイプに換算した透水係数は $k=1.6 \times 10^{-3} cm/sec$ となり、粗砂地盤を対象にしていることとなる。本実験では本来液状化が容易に生じうる細砂・中砂の地盤 ($k=5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1} cm/sec$ 程度) を対象にしているため、間隙水に粘性溶液であるカルボキシメチルセルロース (CMC) を加えて透水係数を 1/10 にすることとした。図-5 は、透水係数比と CMC 溶液濃度との関係を示したものである。ここで、透水係数比とは水を用いて求めた透水係数 (k_w) と CMC 溶液を用いて求めた透水係数 (k_{CMC}) との比 (k_{CMC}/k_w) である。図-5 の関係から、本実験では透水係数が 1/10 となる 0.4% の CMC 溶液を間隙流体に用いることにした。

入力加速度波形は周波数 10 Hz の正弦波であり、最大加速度は 200gal および 350gal, 最大加速度での加振時間は 6 秒間である。

4. 模型振動実験結果

(1) 過剰間隙水圧発生特性

図-6 は、代表的な実験ケースとして CASE1 および CASE2-1 の中間深度における 200Gal 加振時の過剰間隙水圧比の時刻歴を示したものである。なお、使用した計測システムのメモリ容量の制限により、データ収録時間は約 42 秒間となっている。無対策 (CASE1-1) の結果をみると、加振直後の過剰間隙水圧比は 1 となっており液状化に至っていることがわかる。過剰間隙水圧比はその後も低下すること無く、加振開始から 42 秒経過後も液状化の状態が継続していることが明らかである。この

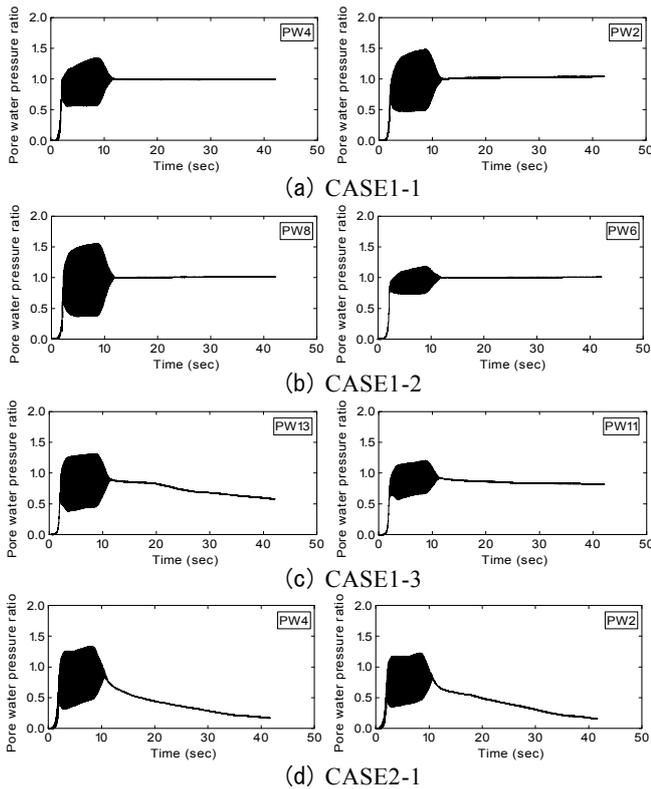
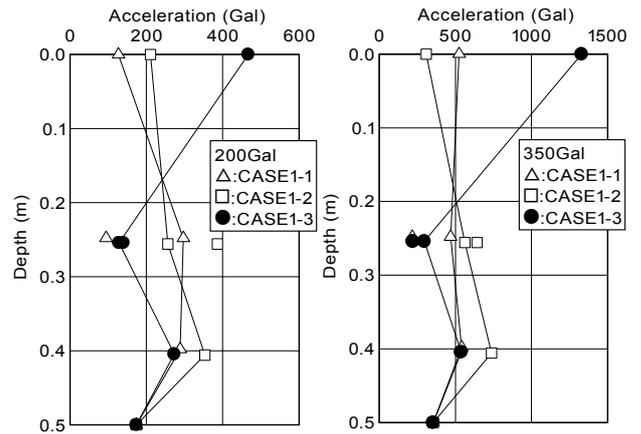


図-6 過剰間隙水圧比の時刻歴

ような過剰間隙水圧比の挙動は、浅層混合処理のみ (CASE1-2) でも同様に認められる。一方、浅層混合処理とドレーンを配置した CASE1-3 の結果は、波形内の振幅を滑らかに平均的にみると加振時の過剰間隙水圧比が 1 を若干ではあるが下回り、加振終了後には減少傾向を示している。過剰間隙水圧比の減少速度が土槽中央の PW11 よりもドレーンに近い位置にある PW13 のほうが速いのは、ドレーンの排水効果が排水距離に依存することによるものと考えられる。このことは、ドレーンを設置した場合、地盤内では排水距離に応じて有効応力の回復程度が異なることを示すものである。CASE1-3 よりも排水距離が短い CASE2-1 の波形をみると、加振終了直後からの過剰間隙水圧比の減少速度が CASE1-3 よりも速く、ドレーンによる間隙水圧消散効果が明確に確認できる。

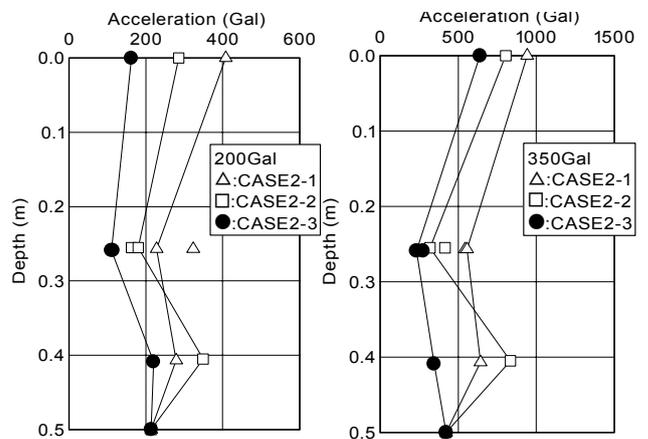
(2) 加速度応答特性

図-7 および図-8 に、各実験ケースにおける最大応答加速度の深度分布を示す。なお、改良体上で計測した地表面応答加速度波形にはスパイク状の高振動成分が認められたため、ローパスフィルタを用いて 30Hz 以上の成分を削除することとした。これは、本工法が対象とする外構部分に属する構造物の固有振動は設計用の参考値⁴⁾を考慮すると高くても 20Hz 程度であると推測されるこ



(a) 最大入力加速度 200Gal (b) 最大入力加速度 350Gal

図-7 最大応答加速度の深度分布 (CASE1)



(a) 最大入力加速度 200Gal (b) 最大入力加速度 350Gal

図-8 最大応答加速度の深度分布 (CASE2)

とから、30Hz 以上の高振動成分はその応答に大きく影響しないという判断によるものである。

まず、図-7 に示す CASE1 の結果をみると、ドレーンがない CASE1-1 と CASE1-2 の応答加速度は上層に向かって減衰していることがわかる。一方、ドレーンを設置した CASE1-3 の応答加速度は下層から中層に向かって減衰するものの、改良体上となる地表の応答加速度は増幅している。地中の応答加速度が減衰したのは、地盤の剛性が過剰間隙水圧の上昇によって低下して上層への地震動の伝搬を抑制したためと考えられる。これに対して、地表の応答加速度が増幅したのは、改良体のロッキングによるものと推察する。このことは、図-8 に示す CASE2 の結果からもわかる。

すなわち、図-8 に示す CASE2 の結果から、いずれの実験ケースにおいても応答加速度の深度分布は CASE1-3 のそれと同様な傾向となっている。すなわち、応答加

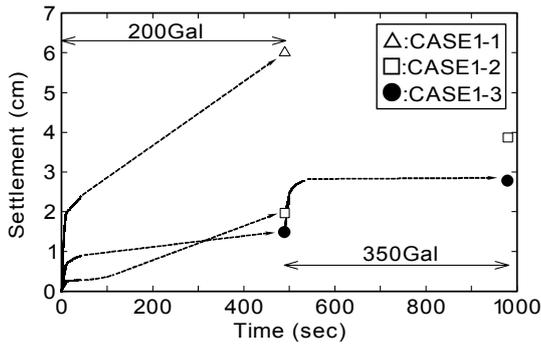


図-9 沈下量の時刻歴 (CASE1)

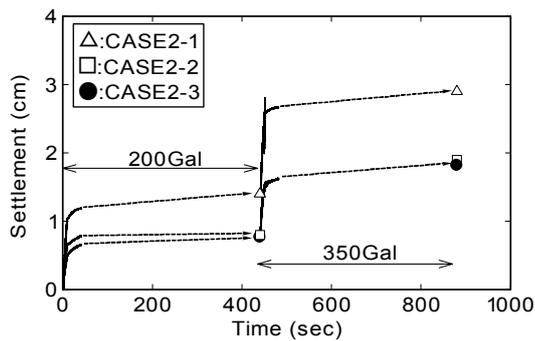


図-10 沈下量の時刻歴 (CASE2)

速度は上層に向かって減衰傾向を示すものの、改良体上のそれは増幅している。その増幅の程度は改良体の幅の大小に依存して異なり、応答加速度は改良体幅の小さなCASE2-1で最大となり、改良体幅の大きなCASE2-3で最小となっている。CASE2-1において改良体上の応答加速度が最大となったのは、加振中に改良体が揺すり込まれるように振動していたことから、幅の小さい改良体がロッキング振動したことに起因するものと考えられる。

(3) 沈下特性

図-9 および図-10 は、土槽中央部に設置した直接基礎構造物模型の沈下量の時刻歴を示したものである。なお、前述したようにデータの収録時間は約 42 秒間であるが、過剰間隙水圧がゼロになるまでにはそれ以上の時間を要した。そこで、最終的な沈下量は加振終了後所定の時間 (CASE1 では 490 秒, CASE2 では 440 秒) 経過後にメジャーを用いて計測した。両図は、レーザー変位計の計測値を実線で、定規による計測値を凡例に示す各マーカーで表し、両者間を破線で結んでいる。また、200Gal 加振時の沈下量に連続して 350Gal 加振時の沈下量を示している。なお、CASE1-1 における 350Gal の沈下量は構造物模型が地盤に埋没したため計測できていない。また、CASE2-2 および CASE2-3 の破線部分は、区別できる明確な結果がないため同一の破線として示して

いる。

図-9 に示す CASE1 の 200Gal 加振時の沈下量について、無対策 (CASE1-1) の沈下量は加振に伴って増大し、最終的な沈下量は約 6cm となった。一方、CASE1-2 の沈下量は加振直後にはそれほど大きく生じないものの、加振後 90 秒以降、改良体周辺からの噴砂を伴って増大し続け、最終的な沈下量は約 2cm となった。これに対してドレーンを設置した CASE1-3 の沈下量は主に加振時のみに増加し、加振終了後における沈下量の増加分はわずかであった。本ケースの最大沈下量は約 1.5cm であり、ドレーンがない CASE1-2 よりも小さな値であった。また、350Gal 加振時の両者の最大沈下量を比較すると、同様に CASE1-3 のほうが CASE1-2 よりも小さいことが明らかである。これらのことから、ドレーンにより過剰間隙水圧の消散を促進すれば、沈下量を低減することが可能であることがわかる。

同様なドレーンの沈下低減効果は図-10 に示す CASE2 の結果からも認められる。ただし、CASE2 のなかで比較すると排水距離が最短の CASE2-1 の沈下量が最大となっている。CASE2-1 の改良体は加振時にロッキング的な挙動をしていたことから、この影響によって沈下量が大きくなったものと推察される。

5. おわりに

浅層混合処理およびドレーンが間隙水圧の上昇特性や地盤の応答特性、ならびに沈下特性に与える影響を検討するために 1G 場における模型振動実験を実施した。

その結果、浅層混合処理による改良層には液状化に伴う沈下を低減する効果があること、またこれにドレーンを加えて過剰間隙水圧の消散を促進することで沈下量をさらに低減できることが明らかとなった。

なお、今回実施した模型振動実験は 1G 場での実験であるためその結果は定性的な評価に留まるものである。今後は遠心模型実験等により本工法の改良効果について定量的な評価を行い、実施工に向けた検討を進める予定である。

謝辞：本研究は、東京大学との共同研究として実施したものです。ご指導戴いた東京大学東畑教授・山田助教 (現大阪市立大学講師) に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 平田裕一, 高橋直樹, 宮田勝利, 高岡雄二, 瀬藤慎一: 【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三井住

友建設技術研究所報告, No.19, pp.139-146, 2011.

- 2) 安田進, 橋本隆雄: 鳥取県西部地震における住宅の液状化による沈下について, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, III-515, pp.1029-1030, 2002.
- 3) 井合進: 1G場での地盤・構造物系の模型振動実験の相似則について, 第19回地震工学研究発表会講演概要集, pp.341-344, 1987.
- 4) 日本建築学会: 建築物の減衰, pp.208-213, 2000.