杭基礎周面に限定した改良による液状化対策工に関する実験的研究

桐生郷史[1]・澤田亮[2]

[1]鉄道総合技術研究所　研究員
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail:kiryu@rtri.or.jp
[2]鉄道総合技術研究所主任研究員　（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: sawada@rtri.or.jp

杭基礎構造物の液状化対策工としては，周辺地盤の強度を増加させる地盤改良といった広範囲を対象とした対策工が多い．しかし，鉄道構造物は線状構造物であり，また，都市部では狭隘な箇所が多く，施工性，経済性を考慮すると周辺地盤全体を対象とした改良は合理的ではない．そこで，薬液注入工法あるいは深層混合処理工法による杭周面のみの限定した範囲を改良する対策工を考案し，その効果等を1G場の模型振動実験より検証した．その結果，提案する液状化対策工の妥当性を確認した．

Key Words : *liquefaction, Pile-foundation, Model shaking test*

１．はじめに

液状化地盤中の杭の対策工に関して多くの研究や実験が行われているが，対策範囲が広範囲に渡るものが多く，線状構造物である鉄道構造物を対象とした場合には非現実的であることが多い．また，最近の設計法は性能照査型へ移行されてきており，液状化対策工についても要求性能に応じた対策工が必要であると考えられる．

そこで，本研究では，鉄道構造物の杭基礎を対象として薬液注入により杭周面のみの狭い範囲を改良した際の対策工の効果，および液状化の程度別に対策範囲の異なる杭の対策効果を 1G 場の模型振動実験により把握することを試みた．

２．静的載荷実験による検証

杭周辺地盤が液状化した際，液状化の進行（地盤の軟化）に伴い，地盤抵抗が低下すると考えられる．ここでは，地盤の状態のみを評価するため，単杭を対象として，対策工を施した際の液状化の程度と対策工の効果の関係を比較検討することで，地盤抵抗および発生断面力の低下程度を把握することを試みた．

(1) 実験概要

図-1 に示すように，実験は長方形せん断土層（L=2600mm，H=750mm）を用い，単杭を 4 本配置している．地盤の相対密度は，Dr=55%として作成した。模型地盤には珪砂 6 号を使用し，水中落下法で作成した．入力波は，完全液状化状態までを模擬することを目的として，正弦波（最大加速度 100gal）を用いた。杭模型は，杭径D=20mm，杭長 750mm，曲げ剛性 287000kN/m^2 からなるアクリル系剛性樹脂材（ABS）も用い，杭頭フリーとした．また，実験で用いた改良体は，実スケールの杭強度と薬液注入による実強度の関係，および挙動が同様となる強度に設定した．（E_{50}=485kN/m^2）

なお，計測機器の配置は図-1 の通りである．地盤内に間隙水圧計および加速度計，杭にひずみゲージ，土層リングに加速度計および変位計，地表面およびフーチング部に変位計を配置している．

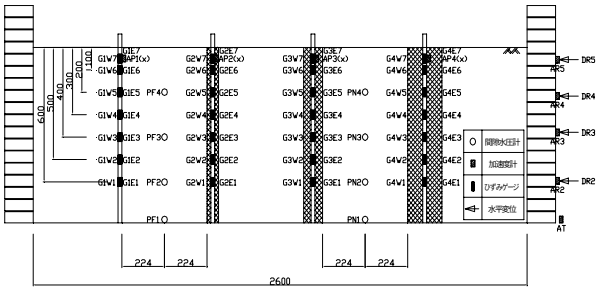

図-1　実験装置図（長方形土層）

(2) **実験ケース**

杭配置と改良径の関係を図-2 に示す．改良径の異なる単杭４本（無対策，１Ｄ改良，２Ｄ改良，４Ｄ改良）を配置し，水平荷重 10.0kN を載荷した状態で加振をおこなった．加振方向は載荷方向と直角とし，杭に慣性力が生じない方法とした．なお，改良深さは，全てのケースについて杭全長を改良するものとした．

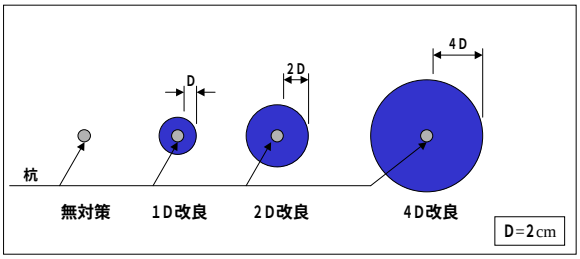

図-2　杭配置と改良径 平面図

(3) **実験結果**

図-3～5 に初期（間隙水圧比　0）・中規模（間隙水圧比　0.5）・完全液状化状態（間隙水圧比 1.0）における曲げモーメント分布を示す．対策を施した場合，液状化状態に関わらず，改良径に応じて第１不動点が杭頭方向へ移動し，発生最大モーメントにおいても改良径が大きいほど小さくなる傾向がある．

図-6 に無対策を基準として各液状化状態毎に改良径別の発生断面力の低下程度を示している．初期（液状化前）状態では，杭改良径に応じて発生断面力が小さくなる関係が得られている．中規模液状化状態では，無対策に対する低下程度が「１Ｄ改良」「２Ｄ改良」で２割，「４Ｄ改良」では３割となり，「１Ｄ改良」と「２Ｄ改良」では低下程度に大差がないことが分かる．また，完全液状化状態では「４Ｄ改良」で２割程度低下しているが，「１Ｄ改良」「２Ｄ改良」については，無対策と大差なく対策工の効果がない．完全液状化状態でも対策効果を発揮させるためには，「４Ｄ改良」が必要であるが，中規模液状化状態を対象とした対策を講じる場合には，

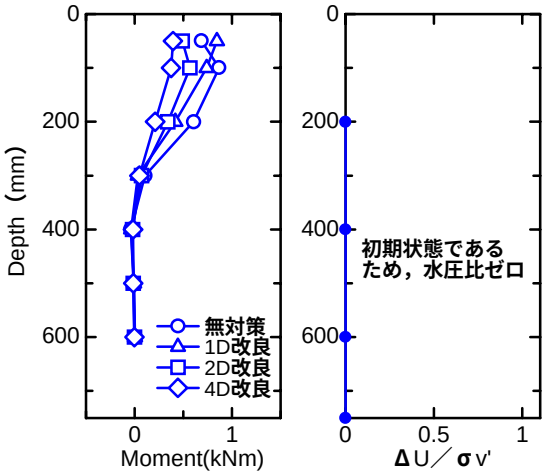

図-3　初期状態

「１Ｄ改良」あるいは「２Ｄ改良」程度で十分効果を発揮することが分かる．

以上より，液状化程度に応じて対策範囲とその効果が異なることが分かり，要求性能に応じて効率的な対策工（範囲）を選択できる可能性が示された．

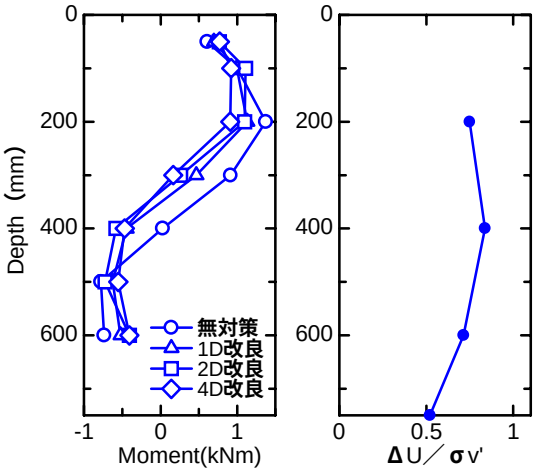

図-4　中規模液状化状態

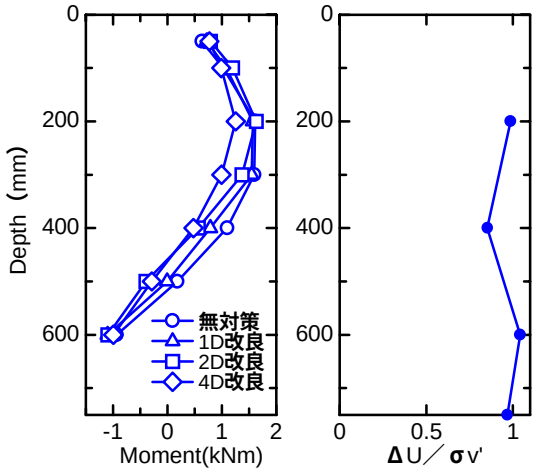

図-5　完全液状化状態

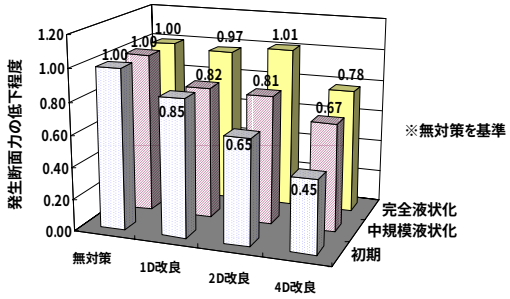

図-6　液状化状態と発生断面力の低下程度

３．振動実験による検証

前述した静的実験における対策効果の実験結果を受け，実施工として常識的な範囲，かつ対策効果を発揮すると想定される「１Ｄ改良」で，対象構造物を群杭として構造物全体系の挙動の把握を試みた．

(1) 実験概要

図-7 に示すように，実験は円形大型せん断土層（φ=1200mm，H=750mm）を用いた．土層中央に群杭（4 本杭）の杭基礎模型を配置して加振をおこなった。地盤の相対密度は，液状化層，非液状化層ともに Dr=60%として作成した。なお，液状化層と非液状化層の境界部については，止水性があり剛性の小さい改良体層（5mm～10mm）を配置し，地盤作成後の水の浸透を防ぐこととした。入力波は，加振中の各段階で入力波と構造物の共振状態が確認できるよう，図-8 に示す 0.5～5.0Hz の広帯域波（ホワイトノイズ）を用いた．模型地盤及び構造物模型は，単杭の実験結果と同様とした．また，４本の杭に上部工として 98Nの重量を杭頭に載せ，杭先端及び杭頭ともに剛結とした．

なお，計測機器の配置は図-2 の通りである．地盤内に間隙水圧計および加速度計，杭にひずみゲージ，土層リングに加速度計および変位計，地表面およびフーチング部に変位計を配置している．

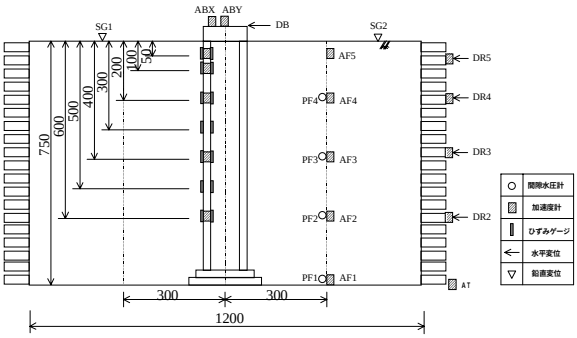

図-7　実験装置図（円形土層）

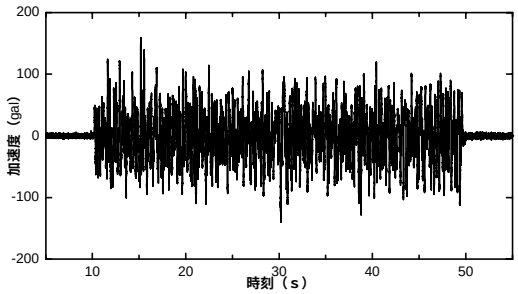

図-8　入力加速度波形
（最大加速度 150gal）

(2) 実験ケース

実験ケースを表-1 に，改良体配置模式図を図-9 に示す．

C-1～C-3 は，地盤全層が液状化層で対策工の深さが異なるケースである．C-4～C-5 は，杭上部 30cm を非液状化層として対策工の範囲が異なるケースである．なお，改良径は単杭の対策効果（前述）をもとに中規模の液状化状態で対策効果を発揮すると想定される１D（=2cm）とした．

表-1　実験ケース

Case	改良深さ	土層構成
C-1	なし	液状化層のみ
C-2	全長	
C-3	杭頭-30cm	
C-4	なし	非液状化層あり
C-5	-30cm～杭下端	

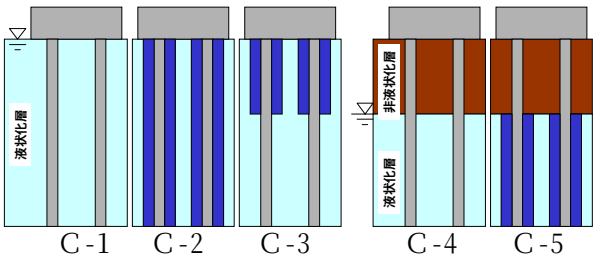

図-9　改良体配置模式図

(3) 実験結果

(a) 杭の加速度応答倍率

本実験では，入力加速度波形に広帯域波（ホワイトノイズ）を用いており，また各ケース，各時刻の最大入力加速度も異なるため，最大応答値そのものからは定量的な考察を行うことが困難である．そこで，図-10 に示すように，初期から過剰間隙水圧上昇中の中規模液状化状態と，完全液状化状態において，入力加速度と杭天端の応答加速度のフーリエ振幅を算出し，さらに区間内の周波数に対して積分することにより,各区間毎の入力エネルギーと構造物の応答エネルギーの比（応答倍率=構造物／入力波）を算定し，この値を応答倍率として検討をおこなった．応答倍率の算定結果を表-2 に示す．

中規模液状化状態については加速度応答倍率は，全てのケースにおいてほぼ一定となっており，改良体によって構造物の固有振動数が変化する影響は各

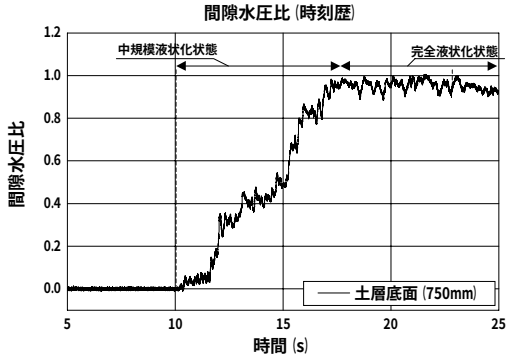

図-10　過剰間隙水圧上昇過程

表-2　加速度応答倍率一覧

	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
中規模 液状化状態	1.80	1.81	1.75	1.77	1.95
完全 液状化状態	1.23	0.61	0.55	1.15	0.93

ケース間では小さい．完全液状化状態では，改良体の影響により，各ケース間で応答倍率にバラツキがあり，非液状化層の有無に関わらず，改良体を施すことによって，加速度応答倍率が無対策と比べて低下している．これは，地盤抵抗がゼロに近くなることにより構造物の影響がより卓越するためと推測される．

(b) **全層液状化層の場合の杭挙動（C－1～C－3）**

杭のモーメントは発生断面力が最大を示している時刻をピックアップして比較をおこなった．なお，単杭の挙動検討結果（前述）から改良範囲１Ｄにおいて中規模液状化状態までは対策効果を発揮する傾向が見られたことから，ここでは中規模液状化状態に着目して検討した．

図-11 に中規模液状化状態の場合のモーメント分布，間隙水圧比分布を示す．無対策（C-1）は杭頭で最大モーメントが発生している．杭全長を改良したC-２については，杭中央付近の変局点および発生モーメントが，無対策のC-１とほぼ同様であるが，杭頭においては発生断面力が抑制されており，十分に対策工の効果を発揮していることが分かる．また,杭頭-30cm 改良のC-３については,改良された杭頭付近については,C-2 同様に発生断面力を抑制しているが,杭中央部における発生モーメントが大きくなっている．浅い範囲（GL-30cm）の改良を施すことは，杭の剛性に差を生じさせ，改良体の境界部で発生モーメントが大きくなり，後述する非液状化層を有する場合と類似したモードになったものと考えられる．

以上のことより，中規模液状化状態においては，改良範囲に応じて発生モーメントが抑制する効果が発揮されるが，改良範囲を杭途中までとした場合には，杭頭モーメントの対策工になる反面，改良体の境界付近の発生モーメントが大きくなる可能性がある．よって，改良前の発生モーメントが小さい箇所は，段落としが施されていることも考えられ，弱点箇所が改良体の境界になると杭にとって危険側になる場合があるため，改良範囲を杭体の途中までとする場合には，両者を勘案して定める必要がある．

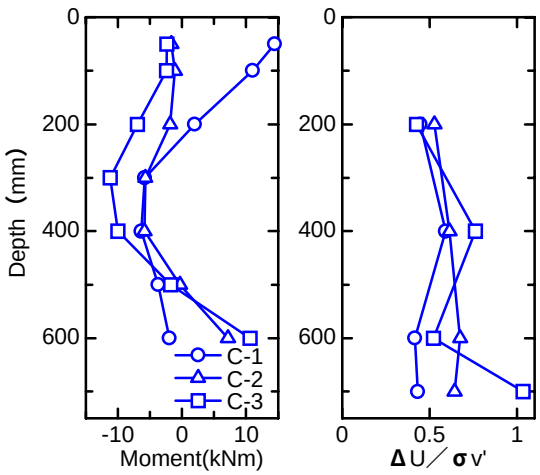

図-11 C-1～C-３（中規模液状化状態）

(c) **非液状化層を有する場合の杭挙動**

図-12 に中規模液状化状態におけるモーメント分布図，間隙水圧比分布図を示す.非液状化層を有する場合のモーメント分布は，層境界部に変局点が生じることが特徴である [1]が,中規模液状化状態において,対策工を施したC-5 においては,発生断面力を抑制し,層境界で明確な変局点は生じていないことが分かる.層境における変局点は，液状化の有無（地盤の剛性比）が影響を及ぼすものと考えられるが，改良体を施すことにより，液状化層と非液状化層の剛性の差を小さくすることになり，発生断面力を抑制することに繋がったと考えられる．

以上のことより，非液状化層の地盤強度と構造物の剛性の関係，及び液状化層における改良体と構造物の剛性の関係を合致させた時に変局点の影響を軽減できると考えられ，地盤強度と改良体強度の関係を勘案して対策工を講じる必要があると言える．

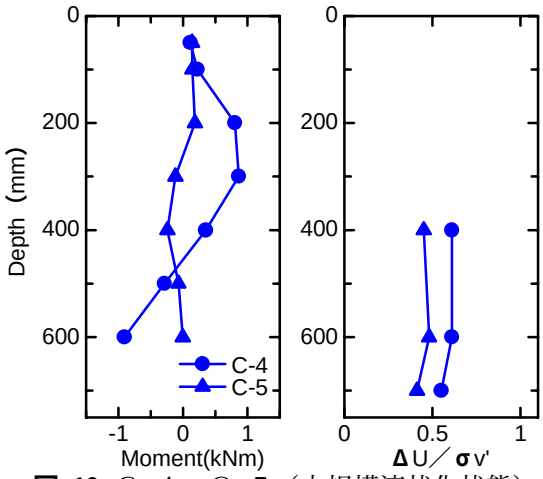

図-12 C-４，C-５（中規模液状化状態）

４．おわりに

静的載荷実験においては，改良範囲が広いほど効果的であることが確認され，改良範囲１Ｄ,２Ｄにおいては，中規模の液状化までの段階であれば，発生断面力低減効果を発揮することが確認された．振動実験（１Ｄ改良）については，静的載荷実験と同様に，中規模の液状化段階までにおいては対策効果を発揮することが確認され，要求性能に応じた対策工として有効であることが示された．

今後は，既設の鉄道構造物を対象とした実施工を想定して,用地内で施工可能な範囲における対策工で効果的な対策範囲を検討していく予定である．

謝辞：本研究は国土交通省からの補助金を受けて得られた研究成果の一部である．

参考文献

1) 桐生郷史，弥勒綾子，澤田亮：過剰間隙水圧上昇過程の上昇過程を考慮した杭基礎の挙動に関する模型振動実験（その２），液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム 発表論文集，pp.199-204，2004

（2005.6.16受付）

EXPERIMENTAL STUDY ON LIQUEFACTION COUNTER MERSURE METHOD BY IMPROVING LIMITED TO SUBGRADE AROUND PILE FOUNDATION

Satoshi KIRYU and Ryo SAWADA

A lot of liquefaction counter measure methods have been developed, which are methods improved the wide-ranging ground. In railway structures, which are line structures, it is not reasonable to apply those methods. In this paper, we propose a method improving limited to subgrade around pile foundation using chemical grouting method or deep mixing stabilization method. We confirmed the validity of the proposed method by model shaking tests.