

液状化強度にばらつきを有する固化処理地盤の 地震時沈下予測に関する振動台実験

重岡 知之¹・善 功企²・陳 光斉³・笠間 清伸⁴

¹九州大学大学院工学府建設システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館1110号室) E-mail:bousai14@civil.kyushu-u.ac.jp

²九州大学教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館11階1128号室) E-mail:zen@civil.kyushu-u.ac.jp

³九州大学助教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館11階1127号室) E-mail:chen@civil.kyushu-u.ac.jp

⁴九州大学助手 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館11階1111号室) E-mail:kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

液状化対策として固化処理された改良地盤では,対象地盤の土質の不均質性や,固化材の混合の不均一 性などの原因により,液状化強度の空間的なばらつきが生じることが報告されており,その地震時沈下挙 動は未解明な点が多い.本文では,強度のばらつきを表現した模型地盤を用いて振動台実験を行い,地震 時沈下挙動を明らかにしたうえで,地盤改良効果について考察した.さらに,鉛直ひずみの深度分布に着 目した,地震時沈下量の簡易予測式を提案し,一次元でなく二次元方向で改良パターンを考慮すれば,精 度が高くなることを明らかにした.本式は今後の研究により,固化処理地盤の品質評価手法の発展等に寄 与できると考えられる.

Key Words : Liquefaction, Soil Improvement, Settlement, Shaking table

1. はじめに

我が国は,世界有数の地震国であり,過去の地震にお ける港湾,空港,道路などの土木施設の被害が少なくな い.これらの原因の一つが,地震時における地盤の液状 化現象であり,液状化による施設の被害を防ぐためには, 施設建設前に液状化判定を行い,液状化すると判定され る場合には,地盤改良等により液状化対策がなされるの が一般的である.ところが,液状化対策が実施されてい ない古い施設や,建設後に設計基準などが改訂された結 果,新基準を満たさない施設など,新たに液状化対策の 必要性に迫られている施設も少なくない.近年頻発する 大地震により,液状化対策の重要性はますます高まって いるといえる.

液状化対策工法には各種の固化処理工法があり,セメ ントの混合による深層混合処理工法や事前混合処理工法 といった従来の工法に加え,近年では,薬液の注入によ る浸透固化処理工法¹⁾が注目されている.前者は,地盤 にセメントを混合することで,固結力を与える工法であ る.後者は,既存構造物の直下の地盤に,浸透性の高い 恒久型の薬液を注入し,間隙水を所要の強度を有するゼ リー状の物質に置換し,地震時の過剰間隙水圧の発生を 抑えて液状化を防止する工法である.

しかしながら,液状化対策として固化処理された改良 地盤では,対象地盤の土質の不均質性や,固化材の混合 の不均一性²⁾,薬液の浸透特性³など種々の原因により, 液状化強度に空間的なばらつきが生じていることが報告 されている.土質の不均質性に起因する液状化強度のば らつきを防ぐことは現実的には困難であるが,このばら つきが固化処理地盤の地震時挙動に与える影響は,未だ に解明されていない点が多いというのが現状である.

そこで,著者らは,これまでに強度のばらつきを表現 した模型地盤を用いて,地震時を想定した振動台実験を 行ってきた⁴⁾.その実験結果より,間隙水圧挙動,地震 時沈下挙動および変位特性を明らかにし,地盤改良効果 について考察した.さらに,本文では,間隙水圧および 鉛直変位の分布を観察した結果から,鉛直ひずみの深度 分布に着目した,地震時沈下量の簡易予測式を提案した.





図-3 改良パターン(50mm メッシュ)

2. 実験概要

図-1に,本実験で使用した模型土槽を示す.強度のば らつきを有する改良地盤を表現するために,地盤をメッ シュ状に分割し,液状化しやすい要素(未改良部)と液状 化しない要素(改良部)の2つにモデル化した.未改良部 では,5号硅砂(最大乾燥密度1.565g/cm³,最小乾燥密度 1.250g/cm³,透水係数8.53×10²cm/s,D50=0.63mm)を使用し, 水中落下により相対密度60%に調整した.改良部は,改 良部に見立てた模型を予め作製しておき,未改良地盤を 作りながら,その模型を所定の位置に設置して作製した. なお,模型は,アルミ製の箱に薬液(エコシリカ1)を入 れたのち,5号硅砂を水中落下させて蓋で密封したもの で,比重は未改良部とほぼ等しい.

表-1に,実験ケースを示す.地盤全体積に対する改良 部の体積比である改良率は,未改良(Untreated),40%, 60%,80%とした.メッシュ幅は,50mm,75mm, 150mmとし,ケース番号のA,B,Cはそれぞれ50mm, 75mm,150mmのメッシュを意味する.**図-2**に,メッシ ュ幅の概況を示す.改良パターンは,乱数を発生させて 無作為に決定し,改良状態による違いを把握するため, 各ケースでパターンを変えて3回行った.すなわち,改 良を施したケースは,合計9×3=27ケースとなる.**図-3**に, 改良パターンの一例として,50mmメッシュの改良パタ ーンを示しており,図中の矢印は,後に示す間隙水圧分 布のグラフ作成に用いた,間隙水圧計の設置位置である.

振動台の加振は,重力場において,3Hzの正弦波を10 波ずつ100Gal~400Galまで,100Gal単位で増加させるス テップ載荷で行った.模型土槽には,図-1の位置に間隙 水圧計およびマーカーを設置し,各入力加速度毎にデジ タルカメラによる撮影を行い,各地盤要素の変位量を測 定した.メッシュの中心線上では,それぞれ地表面の沈 下量を測定した.なお,図-1のように,模型地盤の地表 面の左端を原点とし,x座標とz座標をとるものとする.

3. 実験結果および考察

(1) 間隙水圧挙動

図-4,図-5,図-6にそれぞれ,未改良地盤,40%改良 地盤,60%改良地盤の代表的なケースについて,過剰間 隙水圧比の最大値の深度分布図を示す.なお,グラフに おいて,改良部では間隙水圧は上昇しないため,便宜上 0とした.



図-4より,未改良地盤では,100Gal加振時に,深度 75mmの地点で過剰間隙水圧比が1に近づき,液状化が生 じており,200Gal以上の加振時で,深度225mmの地点ま でがほぼ液状化している.一方,図-5によると40%改良 地盤では,過剰間隙水圧比は未改良地盤に比べて,全体 的に小さくなる.さらに,図-6 a)によると60%改良地 盤では,深度225mmにおける過剰間隙水圧比は最大でも 0.5以下で,40%改良地盤の1/2程度まで抑えられており, 地盤改良の効果が見て取れる.

また,図-6 a), b)より,同じ60%改良地盤で比較をす ると,深度75mmの地点において,同一深度であるにも 関わらず,液状化のしやすさに差異が生じている.ここ で,図-3 d),f)のx=525mmの地表面付近に注目すると, 間隙水圧計を設置した地点の周囲においては,改良状態 の違い(液状化強度のばらつき)が生じていることが分か る.図-3 d)より,CaseA60-1では未改良部は,周囲を改 良部によって拘束されているのに対して,図-3 f)より, CaseA60-3では,未改良部が広い範囲にわたって連結し ている.以上より,未改良部が連結する範囲が大きいと, 過剰間隙水圧比は上昇しやすく,逆に,未改良部が連結 する範囲が小さいと,改良部の拘束によって未改良部の 変形が抑制され,間隙水圧の上昇が抑えられると考えら れる.以上のような液状化強度のばらつきに起因する間 隙水圧上昇の程度の違いは,他の全てのケースにおいて も共通に見られた.

(2) 変位特性

図-7に,マーカーから求められる,40%改良および 60%改良地盤の,300Gal加振後の変位ベクトル分布図を 示す.図-7より,40%改良地盤では60%改良地盤に比べ, 地表面付近で大きく鉛直方向に変位が生じることが分か る.しかしながら,40%改良と60%改良のいずれにおい ても,同一深度の鉛直変位量が,それぞれの点で異なる. さらに,鉛直変位と比較すると小さいものの,水平変位 が生じることも確認できる.このように各地盤要素で多 様な変位が生じる原因としては,それぞれの変位が,周 囲の改良状態によって複雑に影響を受けるためであると 推察される.





図-8に,40%改良および60%改良地盤の300Gal加振後 における鉛直変位の深度分布図を示しており,図中には 回帰曲線も示した.図-8b)は傾向が異なるが,図-8a), c)ともに鉛直変位は地表面付近で大きく,深度方向に向 かって曲線的に小さくなる傾向が見られ,これは殆どの ケースにおいて共通であった.

しかしながら,マーカーにより観察された鉛直変位は, 同一深度の要素でも,周囲の改良状態(液状化強度のば らつき具合)によって大きくばらついている.さらに, 同じ60%改良地盤で比較しても,CaseA60-3の分布の方が 全体的に大きくなっており,液状化強度のばらつきの影 響が確認できる. (3) 地表面沈下量

図-9,図-10,図-11にそれぞれ,未改良地盤,40%改 良地盤,60%改良地盤の代表的なケースについて,地表 面沈下量の水平分布図を示す.図-9および図-10による と,未改良および40%改良の地盤では,200Gal加振後で 大幅な沈下が発生し,300Gal加振後でさらに沈下が生じ ている.しかし,400Gal加振後では,沈下の程度は比較 的小さく,これは,300Gal加振後までに大きく沈下し, 地盤の高密度化が生じたためであると考えられ,図-4お よび図-5に示した過剰間隙水圧比が,400Gal加振時で比 較的小さくなったことと整合している. また,図-11より,60%改良のCaseA60-1では,400Gal 加振後の地表面沈下量は5mm程度に抑えられており, CaseA60-3でも未改良,40%改良と比較すると全体的に小 さい.なお,CaseA60-1は,60%改良で改良パターンを変 えて3回実施したなかで,最も平均沈下量が小さかった ケースで,CaseA60-3は最も大きかったケースである. 同じ改良率でも,改良状態の違い(液状化強度のばらつ き)により沈下にばらつきが生じる.

ここで,図-10および図-3 c)より,地表面付近が改良 されていない地点では,地表面が大きく沈下する一方で, 逆に地表面付近の要素が改良されている水平座標 x=525mmの地点では,ほとんど沈下が生じていない.こ れと同様の傾向が,図-11 b)および図-3 f)についても 確認できる.よって,液状化強度のばらつきが生じた場 合でも,地表面付近が広く改良されている地点では,沈 下が小さくなると考えられる.

(4) 沈下抑制効果

ここで,未改良地盤の平均沈下量に対する,改良地盤 の平均沈下量の比を,平均沈下率【=改良地盤の平均沈 下量 / 未改良地盤(CaseU)の平均沈下量×100 (%)】と定義 する.図-12に,改良率と平均沈下率の関係を示す.図-12より,40%改良地盤では,平均沈下率は60%程度であ リ,未改良地盤に対して,40%程度の沈下抑制効果があ ったことになる.未改良地盤のひずみ量と改良部に混在 する未改良部のひずみ量が等しいと仮定すると,改良率 と沈下の抑制率はこのような等価の関係になると考えら れる.ところが60%改良地盤になると,平均沈下率は 20%程度で,未改良地盤に対して,80%程度の沈下抑制 効果が見られ,改良率が高い地盤に混在する未改良部の ひずみ量は,未改良地盤のひずみ量より小さくなってい る. つまり, 液状化に起因する沈下に対して, 改良率以 上の沈下抑制効果が得られたことを意味する.この原因 としては,地盤の60%が改良部に置き換わったことで, 沈下量が減少しただけでなく,残り40%の未改良部の変 形を、構造的に拘束する効果があったためであると考え られる.以上のことから,地盤全体の60%以上が液状化 しない状態に改良されていれば,沈下を抑制する効果は, 相対的に高いと考えられる。

4. 地震時沈下量の簡易予測式の提案

(1) 鉛直ひずみの深度分布の仮定

図-4に示す過剰間隙水圧比の深度分布と、図-8に示す 鉛直変位の深度分布は類似しており、今回の実験条件で は、地震時の平均的な鉛直ひずみの深度分布を、曲線で



図-12 改良率と平均沈下率の関係

近似してよいと考えられる.

しかしながら,改良地盤に混在する未改良部の鉛直ひ ずみ分布の推定には,図-8に示すように,1)改良率の違 いによる影響を加味するパラメータ,2)各要素で周囲の 改良状態(液状化強度のばらつき)の影響を加味するパラ メータが必要である.加えて,図-12に示すように,3) 改良率がある値より高いときに生じる,付加的な沈下抑 制効果を加味するパラメータを導入すべきであり,これ らの3点については現在検討中である.

そこで今回は,予測式を提案する第一段階として簡便 さを考慮し,一律に未改良地盤の鉛直ひずみ分布を用い た.以下では典型的な沈下が生じた 300Gal 加振後の地 震時沈下量について,未改良地盤 CaseU の鉛直ひずみの 深度分布を利用した地震時沈下予測式を提案する.

(2) グレード1の方法(一次元)

強度のばらついた固化処理地盤において,未改良部の みの鉛直ひずみを深度方向に積分すれば,地震時沈下量 が求められると考えられる.予測沈下量Sの求め方のイ メージを図-13に示す.斜線部の面積の和が予測沈下量S である.鉛直ひずみの深度分布を指数関数で仮定し,深 度方向のみの改良パターンに着目する(グレード1の方 法)と,予測沈下量Sは次式で表せる.

$$S = \int_0^D u(z) \cdot \varepsilon_{z0} \cdot \exp(-\frac{2z}{L_z}) dz \tag{1}$$

上式で, *u*は各要素の液状化危険度(未改良部=1,改良部 =0とする)であり,改良部の鉛直ひずみを0で計算するた めのパラメータである. 。*u*は地表面の鉛直ひずみ(%)で ある.*L*,は鉛直方向の自己相関距離(mm)である.これは 距離の次元を持ち,任意の2点間の相関性を特徴づける パラメータであり,**図-4**,**図-8**の傾向とビデオ観察より, 一律に*L*=300mm とした.*D*は深度 (mm)であり, *D*=600mmとなる.



図-14 予測沈下量Sと実測沈下量の関係

なお,地表面の鉛直ひずみ ₂は,未改良地盤CaseUの 300Gal加振後の平均沈下量28.8mmを,式(1)に代入して逆 算し, ₂₀=19.5%と決定した.

図-14に,式(1)を用いた予測沈下量Sと実測沈下量の関係を示す.図-14より,予測値と実測値には相関が認められるが,ばらつきは大きい.これは,導入できていないパラメータがあることに加え,式(1)では,深度方向の影響のみを考慮しているためであると考えられる.観察された地盤の沈下現象は,ある地点が独立に沈下するのではなく,近傍の水平方向地盤と相互に作用しながら沈下するため,何らかの方法で近傍の沈下量の影響も考慮すべきである.

(3) グレード2の方法(二次元)

上述のように,実際の地盤は,同じ体積の未改良部が あったとしても,近傍の地盤が未改良部で沈下が大きい 場合と,近傍が改良部で沈下が小さい場合とでは,側方 流動量や揺れの程度が異なる.そこで,沈下の大きい地 点と,小さい地点の地表面が相互に作用しながら,なだ らかに平均化される様子を表現する手法として,加重平 均を用いた.これにより,間接的にではあるが,地表面 付近での水平方向の影響が加味される.

以上のことより,式(1)により求めた任意地点の予測



図-15 加重平均イメージ(x₀=525mm)



図-16 予測沈下量S*と実測沈下量の関係

沈下量Sを,周辺地盤の沈下量に水平方向の重みを付け て平均化【加重平均】した(グレード2の方法).加重平 均のイメージを図-15に示す.

重み関数は,近傍の影響が特に大きいと考え,指数関数を用いた.重み関数 は次式で表せる.

$$\omega(x) = \exp(-\frac{2|x - x_0|}{L_x}) \tag{2}$$

上式で, x₀は任意の地点の水平座標(mm), L_xは水平方向 の自己相関距離(mm)である.分子を|x - x₀としたのは, **図-15**のように,沈下量を求める地点x=x₀について,対称 に重みを付けるためである.

式(1)および式(2)を用いて加重平均した予測沈下量S*は 次式で表せる.

$$S* = \int_{x_0 - L_x}^{x_0 + L_x} S \cdot \omega(x) dx \ / \ \int_{x_0 - L_x}^{x_0 + L_x} \omega(x) dx \qquad (3)$$

上式で,積分区間は,水平座標 x_0 に,正負の方向に自己 相関距離Lxを加えた $x_0 - L_x \sim x_0 + L_x$ とした.そのさい,実 験条件とビデオ観察の結果より,一律に $L_x=150$ mmとし た.**図-15**に示すのは, $x_0=525$ mmの地点の例である.

図-16に,式(3)を用いた予測沈下量S*と実測沈下量の 関係を示す.図-16より,SよりもS*のほうが,実測沈下 量との関係が良好であり,比較的精度の高い予測ができ ている.しかしながら,沈下量を実測値よりも大きく計 算する傾向がある.その最大の要因は,改良地盤でも一 律に未改良地盤CaseUにおける鉛直ひずみの深度分布を 用いたためである.前述のように,1)改良率の違いによ る影響,2)各要素での周囲の改良状態(液状化強度のば らつき)の影響,3)改良率がある値より高いときに生じ る,付加的な沈下抑制効果,これら3点を加味するパラ メータを導入すべきである.これらのパラメータを予測 式に導入することができれば,更に精度の高い予測式の 提案が可能である.

また,鉛直ひずみの深度分布や自己相関距離の決定手 法に関しては,多方面からの検討が必要であるが,今後 の更なる研究により,固化処理地盤の品質評価手法の発 展や,最適な改良形状の考案等に寄与できると考える.

5. まとめ

- (1) 未改良部が連結する範囲が小さいと,改良部の拘束 によって未改良部の変形が抑制され,間隙水圧の上 昇が抑えられると考えられる.
- (2) 液状化強度のばらついた固化処理地盤では各地盤要素で多様な変位が生じ、その原因は、それぞれの変位が、周囲の改良状態により、複雑に影響を受けるためである。
- (3)本研究の実験条件では,固化処理地盤に混在する未 改良部の鉛直変位は,同一深度でばらつきはあるものの,概ね,地表面付近で大きく,深くなるにつれ て曲線的に小さくなる分布となった.
- (4) 液状化強度のばらついた固化処理地盤でも,地表面 付近が広く改良されている地点では,沈下が小さく

なる.

- (5) 地盤全体の60%を改良した地盤で,未改良地盤に対して80%程度の沈下抑制効果が得られた.地盤全体の60%以上が液状化しない状態に改良されていれば,沈下を抑制する効果は,相対的に高いと考えられる.
- (6) 固化処理地盤について,未改良部の鉛直ひずみの深度分布を利用した地震時沈下予測式を提案した.また,一次元でなく二次元方向で改良形状を考慮すれば,予測式の精度が高くなることが明らかになった. 今後の研究により,1)改良率の違いによる影響,2)各要素での周囲の改良状態(液状化強度のばらつき)の影響,3)改良率がある値より高いときに生じる,付加的な沈下抑制効果,これら3点を加味するパラメータを導入すべきである.これらのパラメータを予測式に導入することができれば,更に精度の高い予測式の提案が可能である.

参考文献

- 1) 財団法人 沿岸開発技術研究センター:浸透固化処理工法技 術マニュアル,2003
- 2) 細谷芳巳ら:セメント系改良材による現場改良土の品質評価, 地盤工学会,セメント系安定処理土に関するシンポジウム, 委員会報告3, pp.42-55, 1996
- 3) 林健太郎ら:溶液型薬液注入工法の浸透および強度特性に関 する大型土槽実験,土木学会論文集 No.694/ -57, pp.221-228, 2001
- 4) 重岡知之ら:液状化強度のばらつきを有する改良地盤の地震 時挙動に関する実験的考察,第7回地盤改良シンポジウム 論文集, pp.233-236,2006

(2007.4.6 受付)

ESTIMATION ON SEISMIC SETTLEMENT OF IMPROVED GROUND WITH VARIABILITY OF LIQUEFACTION STRENGTH USING SHAKING TABLE

Tomoyuki SHIGEOKA, Kouki ZEN, Guangqi CHEN and Kiyonobu KASAMA

The anti-liquefaction ground improved by cement-mixing and permeable-grouting shows the spatial variability of liquefaction strength resulting from the spatial variability of original soil profile before treatment, the non-uniformity of mixing and grouting, etc. The seismic behavior of improved ground with the spatial variability of liquefaction strength, however, has not been fully clarified.

In this paper, in order to evaluate effects of spatial variability of liquefaction strength on the seismic behavior of improved ground, a series of model experiments has been carried out through investigating the seismic behavior of partially improved ground using shaking table test. Moreover, the estimation of seismic settlement considering the depth distribution of vertical strain in terms of 1 dimensional (1D) and 2 dimensional (2D) improvement patterns has been proposed. It can be seen that estimated seismic settlement from 2D improvement pattern shows better agreement with observed settlement than 1D estimation.