

佐藤工業（株）中央技術研究所 ○規矩大義 辻野修一
 河野 興 中嶋智樹
 末富岩雄 伴 亨
 吉田 望 森山健吉

1 はじめに

発破を用いた地盤の締固めは、ヨーロッパや北米を中心に 50 年以上の歴史を持ち、施工例も数多く報告されている。この工法は、グリッド状に複数配置した発破を爆裂させることによって、地盤の粒子構造を破壊・再構成させ、地盤を密実化させるものである。発破の効果によって、緩い砂地盤が締め固まることから、液状化対策工法としての利用を目的に現場実験を行ない、その適用性を検討した。

発破を利用した液状化対策が実現すれば、広範囲な領域を、特殊な機械を使用せず、短期間にかつ経済的に施工することが可能となり、大規模な埋立地や造成地等への適用のみならず、構造物の重要度と経済性の観点から、従来、液状化対策が施されなかった地盤に対しても適用できる可能性がある。一方、発破を用いた本工法では、爆裂にともなう振動・騒音の問題は避けられず、それらが周囲に及ぼす影響について十分検討しておく必要がある。本報告は、発破を用いた液状化対策工法の適用性、効果の確認と周辺環境への影響を検討することを目的とした現場実験の結果について示すものである。

2 実験概要

2.1 地盤条件

図-1 に現場実験を行った地盤の柱状図を示す。当該地盤は1970年代に埋立てられた東京湾岸の埋立地で、N値が2～7程度の軟弱な粘土質シルト層およびシルト分を多く含む細砂層で構成されており（図-2 参照）、地下水位はおよそGL-4.3mに位置している。今回の実験では、GL-6.55m～GL-11.4mに存在する緩いシルト質細砂層を液状化対策の対象層とした。

2.2 実験方法

実験ケースを表-1 に、発破孔配置を図-3 に示す。実験は、発破による振動・騒音の影響の把握と本実験の装薬量を決定するための、1 孔のみの発破による予備実験を3 回行い、その後本実験として、グリッド状に配置した複数孔の発破を実施した。

装薬位置は、シルト質細砂層を対象としていることから、2 段装薬時ではGL-7.5mおよびGL-10.5mの2ヶ所に、1 段装薬時では、GL-10.5mとした。

2.3 計測

計測項目及び計測方法を表-2 に示す。また、図-4 には間隙水圧計の設置状況を示す。

表-1 実験ケース

実験ケース	発破孔(本)	装薬量および装薬位置
予備実験-1	1	1kg (GL-10.5m)
予備実験-2	1	3kg (GL-10.5m)
予備実験-3	1	2kg (GL-7.5m) 3kg (GL-10.5m)
本 実 験	12	2kg (GL-7.5m) 3kg (GL-10.5m)

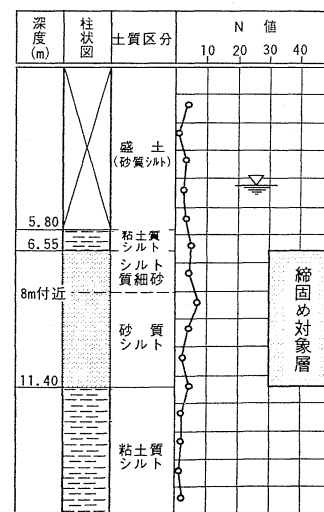


図-1 対象サイトの地盤柱状図

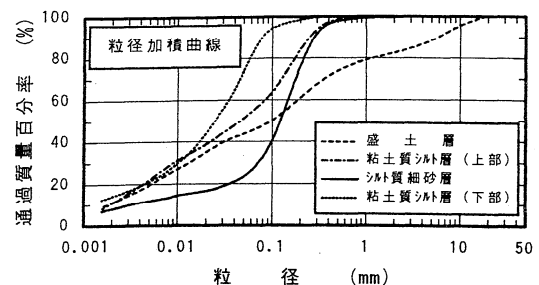


図-2 粒度試験結果

表-2 計測項目及び計測方法

計測項目	目的	計測方法	計測位置
間隙水圧	液状化の程度の把握	間隙水圧計による 静ひずみ測定	図3, 4 参照
地表面沈下量	同上	レベルによる測量	図3 参照
地表面速度	発破振動性状の把握	3成分速度計による測定	図5 参照
公害振動・騒音	振動・騒音 レベル性状の把握	振動レベル計 騒音レベル計	図5 参照

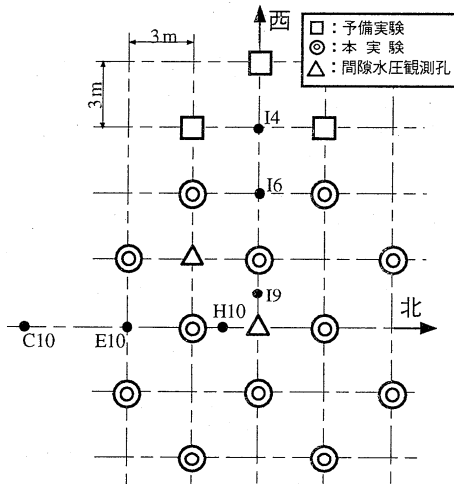


図-3 発破孔と間隙水圧計の配置図

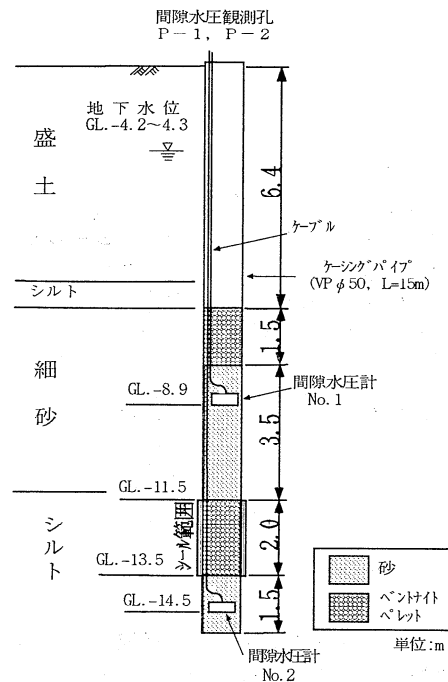


図-4 間隙水圧計の設置状況

3 実験結果

3.1 発破による地表面速度

予備実験-2と本実験-1の地表面速度（上下動）の時刻歴を図-6、7に示す。発破孔近傍では、爆裂によるP波が卓越し最大速度が生じているが、発破孔からの距離が100m程度になると、明瞭なP波は見られず、振動数3Hz程度¹⁾の波が卓越し、その部分で最大応答が生じている。

図-8には、予備実験及び本実験で観測された上下動の最大速度値と両ケースの火薬の装薬量で正規化された距離（スケール・ディスタンス）との関係を図示する。これらの関係は、総装薬量、発破孔数に係わらず、発破孔の最大装薬量に依存し、ほぼ1本の直線で近似できる。1孔の試験発破において複数点での地盤振動を測定することにより、上下動の最大速度値とスケールディスタンス関係が求められ、これを利用して施工時の発破による地盤振動を予測することが可能となる。

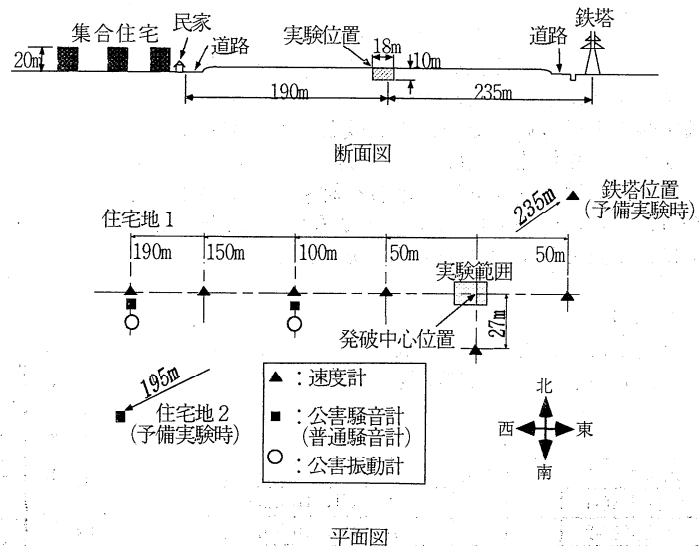


図-5 実験概要および計測器設置

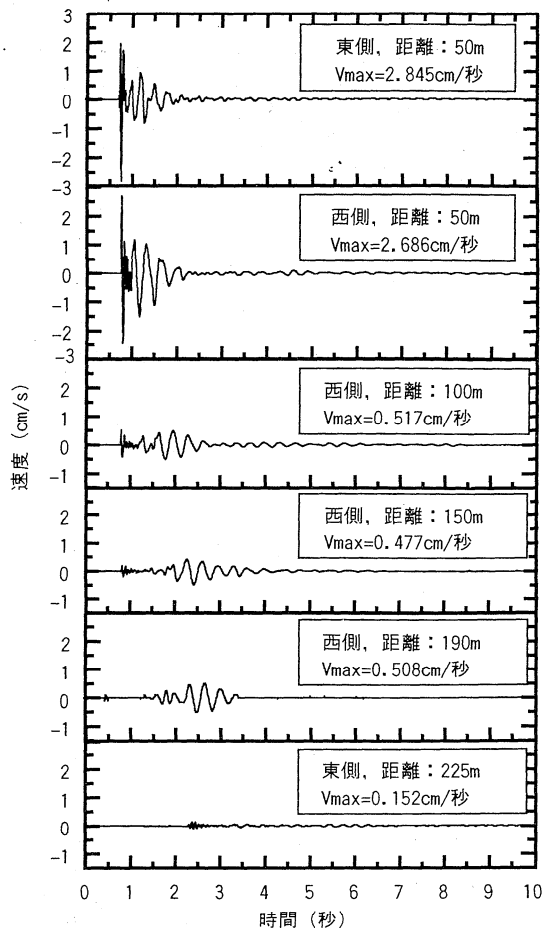


図-6 予備実験の速度波形時刻歴

3.2 公害振動・騒音計測

本実験での振動レベルは、発破位置100mでは、最大78dBと建設作業振動規制基準の振動規準値75dBを若干オーバーする結果となったが、発破位置から200m離れた位置になると、振動規準値以下となり、発破による振動レベルは予想よりも小さな結果となった。

表-3には、騒音レベルの計測結果を示すが、発破締固めによる騒音の計測結果は、約100m離れると最大でも69dB(A)程度となり、騒音規制法の騒音規準値85dB以下であった。これは、やや騒々しい街頭の騒音レベル²⁾に相当する。発破による騒音の継続時間は、本実験時で最大2sec以下であり、人が感じる騒音は計測結果よりも小さくなるものと考えられる。なお、この地点の暗騒音レベルは、50dB(A)程度であった。

3.3 間隙水圧

予備実験による間隙水圧の上昇量の経時変化を図-9に示す。なお、予備実験は30分間隔で実

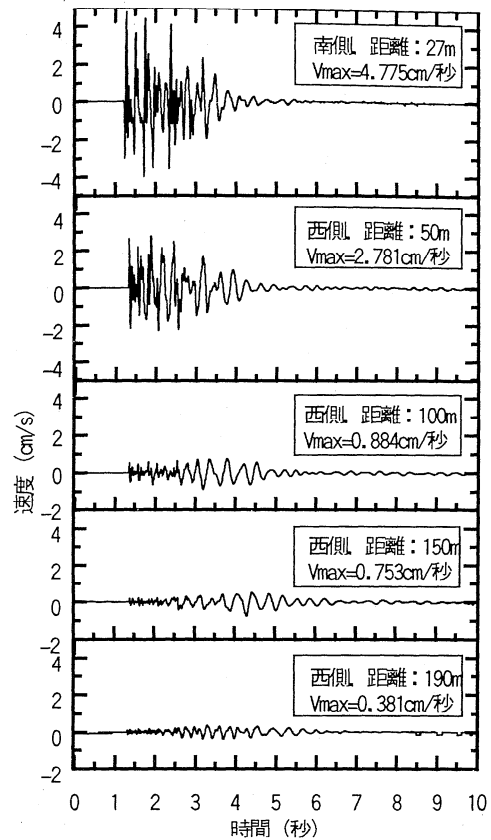


図-7 本実験の速度波形時刻歴

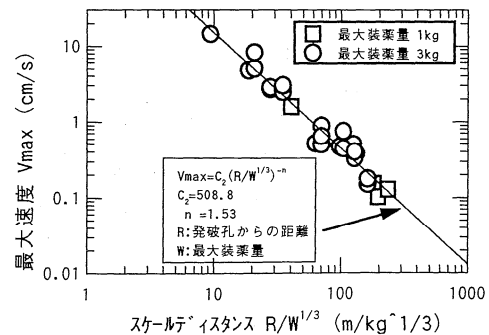


図-8 地表面速度の距離減衰

表-3 騒音測定結果

距離 (m)	騒音レベル max. (dB(A))	備考
100	69	
190	60	住宅地 1
195	52	住宅地 2 ^{注)}

注) 実験位置の方向へ10m程度離れた位置に高さ2.5mのフェンスがある。

施したため、過剰間隙水圧が完全に消散する前に次の発破を実施している。間隙水圧の測定間隔は10秒とした。

予備実験より得られた、発破による過剰間隙水圧上昇量をもとに、発破孔をグリッド状に配置した本実験時の配置間隔を検討した。発破による液状化対策工法では、発破により対策地盤を完全液状化させることがより効果的である。図-10には、予備実験時の装薬量で正規化した発破孔からの距離と過剰間隙水圧比の関係を示す。図中の直線は計測結果より推定した近似直線である。

予備実験より得られた近似式より、装薬量 W を3kgと仮定すると、過剰間隙水圧比が1.0（液状化）まで上昇する領域は、発破孔から3.3m（発破孔間隔6.6m）以内となるため、本実験における、発破孔間隔を6mと設定した。

3.4 地表面沈下

図-11に地表面沈下量の経時変化を示す。沈下は、本実験終了直後で最大30cm程度発生しており、その後、時間の経過とともに増加しているが、2週間後から4週後の沈下量の増加量は、最大で1cm程度となり、沈下はほぼ収束していることが見てとれる。図-12には地表面沈下量分布を、図-13には発破2週間後の沈下量コンターと地表面クラックを重ね合わせた図を示す。沈下は対策範囲を中心にして対称な性状を示し、発破範囲の中心では最大38cm、対策範囲境界部分でも約21cmの沈下が生じている。

クラックは、発破直後に対策範囲を中心として円形に近い形で生じ、時間の経過とともにクラックどうしがつながるとともに、クラック幅の増加が見られた。

一方、地表面沈下量には、シルト質細砂層の上の盛土層の沈下量も含まれている。このため、シルト質細砂層上部まで設置した塩ビ管の実験前後の突出高さから、盛土層の沈下量を推定した。この結果、発破締め固めの対象としたシルト質細砂層の沈下量は、本実験終了2週間後で18~31cmとなり、シルト質細砂層厚（5m）に対して約4~6%の体積圧縮量となった。

4 考察

4.1 サウンディングによる対策効果の確認

発破による改良効果を確認するため、スウェーデン式サウンディングを発破前と直後、1週間後、2週間後ならびに4週間後に実施した。結果を図-14に、また、発破前と4週間後の貫入量1m当たりの半回転数の頻度分布を図-15に示す。液状化が生じている発破直後を除いて、時間の経過とともに貫入抵抗は増加している。また、対象層の貫入抵抗の平均値でみると、実験前と4週間後では1.4倍に強度増加していることが分かる。

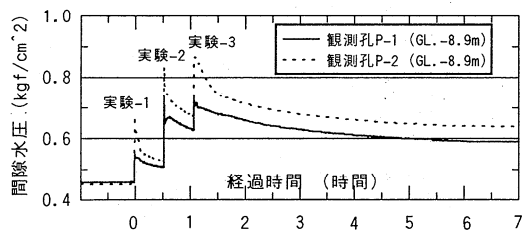


図-9 間隙水圧測定結果

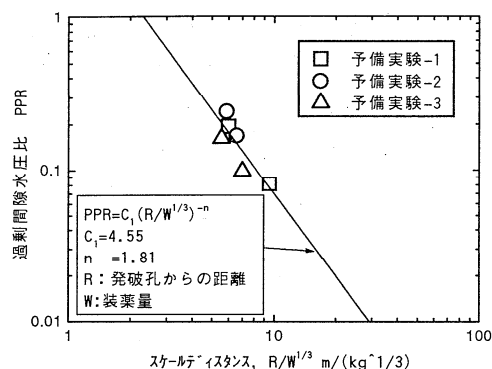


図-10 過剰間隙水圧比—スケールディスタンス関係

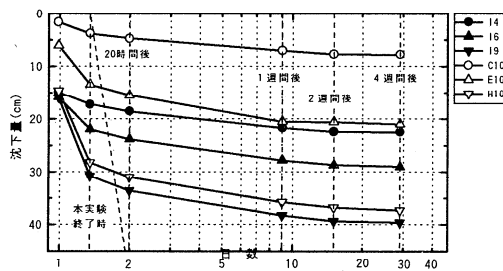


図-11 地表面沈下量計測結果

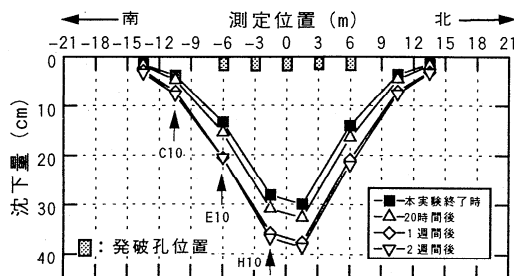


図-12 地表面沈下量の分布

4.2 標準貫入試験による対策効果の確認

図-16 に実験前と4週間後の標準貫入試験の結果を示す。実験前のN値は、対策対象層でN=2~7、平均でN=4程度、4週間後はN=4~9、平均でN=6程度の結果である。この結果から、実験前後のN値の変化は平均で約1.5倍であり、大幅なN値の増加は見られない結果となった。これは、対象層の細粒分含有率が30%以上と非常に高かったことが原因と考えられ、一般的な液状化が懸念される地盤においては、さらに対策効果が上がるものと考えられる。

対策対象層のN値から求めた推定液状化強度比Rを図-17に示す。液状化強度比の算出は、道路橋示方書・同解説V、耐震設計編の液状化発生の予測式を用いた。この結果から、液状化強度比の増加率は、GL-9.3m位置で約1.3、全体の平均で約1.2となっている。

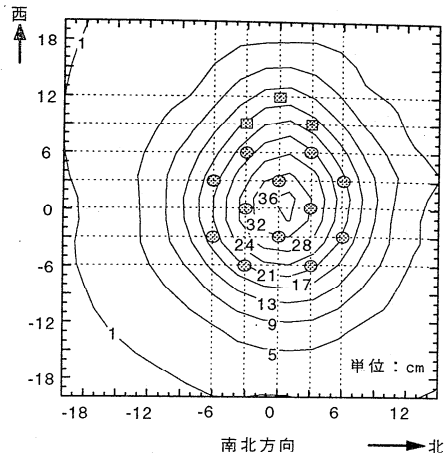


図-13 地表面沈下量の
コンターとクラック

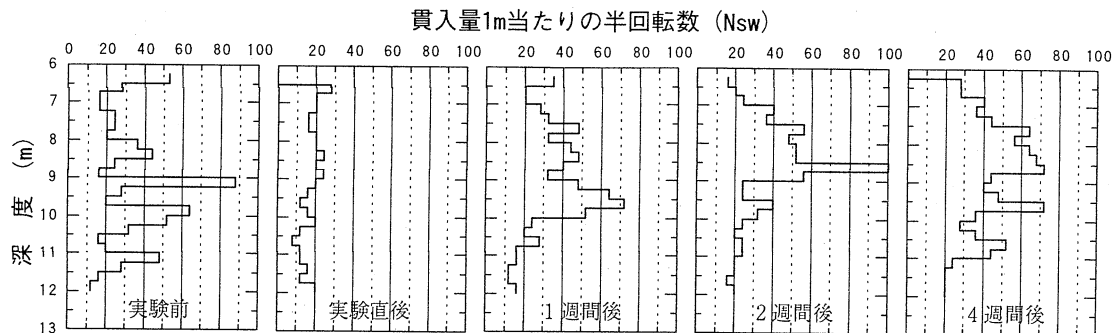


図-14 スウェーデン式サウンディングの結果

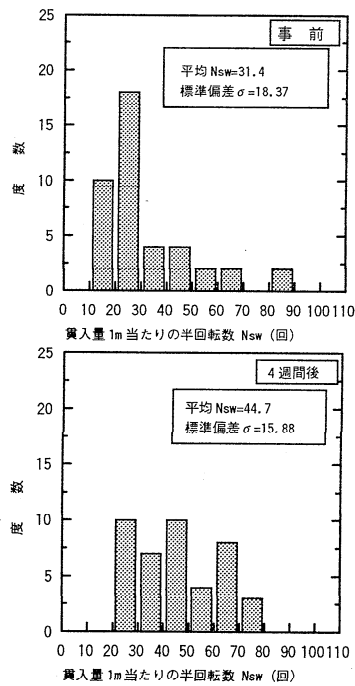


図-15 貫入抵抗値の頻度分布
(サウンディング試験)

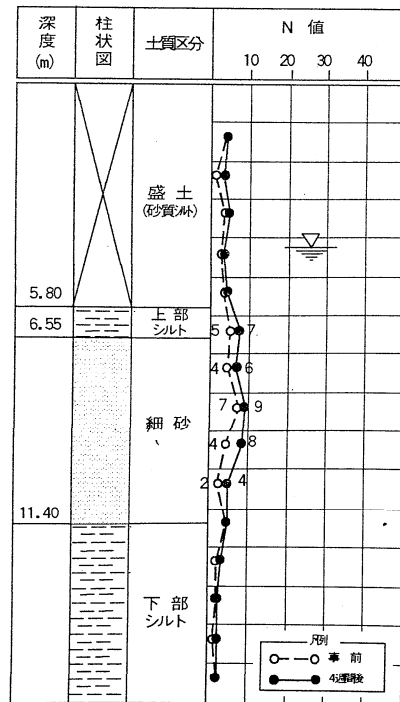


図-16 標準貫入試験結果 (事前と4週間後)

4.3 微動探査法による対策効果の確認

微動探査法³⁾により実験前と4週後のS波速度構造を評価した。結果を図-18に示す。対策対象層のS波速度は、実験前で143m/s、4週後で157m/sと1割程度の増加となっている。

盛土層と粘土質シルト層において、S波速度が4週間後で2割程度減少している。これは、S波速度の結果は、各層の平均速度であるため、発破振動により盛土層の上部(2m程度まで)がゆるんだ影響を、そのまま層のS波速度としているためと考えられる。

以上のように改良範囲のS波速度にも、サウンディング試験や標準貫入試験結果と同様に、対策効果が表れている。

5 まとめ

発破による液状化対策工法による対策効果の確認、周辺環境への影響把握のための振動・騒音計測結果について検討を加えた。実験より以下のことが確認された。

(1) 発破による地表面沈下量は、平均で30cm(体積圧縮量で6%)生じ、対象層の土質が、シルト分を30%以上含む細砂層であったことから、急速な強度増加ではないものの、改良効果が得られた。また、効果の確認に、サウンディング試験、標準貫入試験、微動探査法の評価手法が適用出来ることも確認出来た。

(2) 発破による周辺地盤の振動は、1孔の発破によって応答速度の距離減衰を推定でき、予備実験、本実験ともほぼ1本の直線で近似出来た。この関係から、対象とする保安物件の許容値より、施工時の装薬量、施工位置の決定が可能である。

(3) 発破による騒音は、地中での発破であり地表への土砂の飛散等は起こらないため、騒音レベルは予想以上に低い値が得られた。

以上、振動・騒音の面で課題は残るものの、広い範囲を経済的にしかも短期間で改良できる可能性があることが確認できた。今後は、発破孔の削孔・設置方法の改善、完爆の確認方法や周辺の地盤振動の制御方法の検討を加えて行きたい。

参考文献

- 1) 伴 亨、辻野修一、中嶋智樹、森山健吉、吉田 望、河野 興：発破を用いた液状化対策工法に関する現場実験 その1. 実験概要および対策効果について；佐藤工業(株)技術研究所報、No.23、1997
- 2) (社)産業公害防止協会、公害防止の技術と法規 [騒音編]、1991
- 3) Masanori Horike: Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the s-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas; J. Phys. Earth, 33, 59-96, 1985
- 4) 辻野修一、中嶋智樹、森山健吉、吉田 望：発破を用いた液状化対策工法の適用性に関する現場実験 その1.

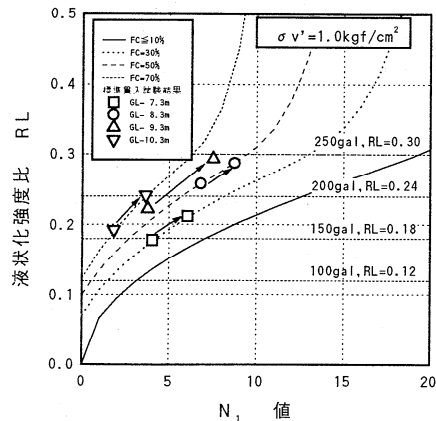


図-17 推定液状化強度比～ N_1 関係

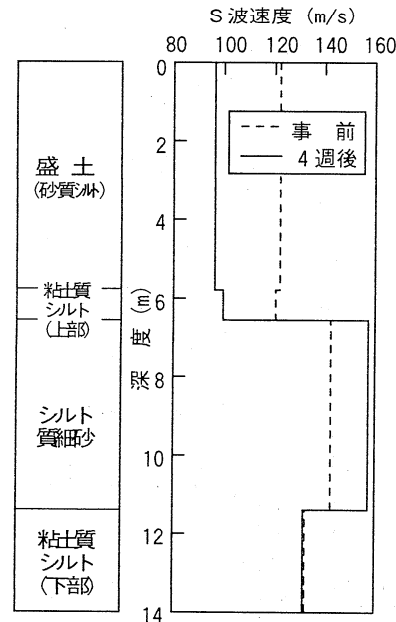


図-18 S波速度の分布

実験概要および過剰間隙水圧の測定結果について；第52回土木学会年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A、1997

5) 中嶋智樹、辻野修一、伴 亨、河野 興、吉田 望；発破を用いた液状化対策工法の適用性に関する現場実験 その2. 地表面沈下量およびサウンディングによる効果確認について；第52回土木学会年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A、1997

6) 伴 亨、辻野修一、中嶋 智樹、末富岩雄、吉田 望；発破を用いた液状化対策工法の適用性に関する現場実験 その3. 振動および騒音測定結果について；第52回土木学会年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A、1997