

発破を用いた締固め工法の 液状化対策効果の確認実験

辻野修一¹・前田幸男²・中嶋智樹³・吉田望⁴・国松 直⁵

¹正会員 工博 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

² 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

³正会員 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

⁴正会員 工博 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

⁵正会員 工博 工業技術院 資源環境技術総合研究所 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-3)

発破締固め工法は、地盤内にグリッド状に配置した爆薬を発破させた際の衝撃力により、緩い砂地盤の粒子構造を破壊・液状化させ地盤をより密な状態に改良するものであり、本工法の液状化対策としての適用性を確認するために現場実験を行った。本工法の改良効果として、各種サウンディングの貫入抵抗の増加、液状化強度の増加が認められた。本報では、効果確認のために実施した試験結果を報告する。さらに、地中で発破することによる地盤振動については、段発の秒時差による影響および段発時の振動予測について考察した。

Key Words : *Blasting, liquefaction, surface wave, ground vibration, Densification,*

1. はじめに

発破を用いた締固め工法は、地盤内にグリッド状に配置した爆薬を発破させた際の衝撃力により、緩い砂地盤の粒子構造を破壊し、地盤をより密な状態に変化させるものである^{1),2),3)}。本工法の締固め効果による液状化対策としての適用性を確認するために現場実験を行った。本工法では、地盤内で発破をかけることから、発破による周辺への地盤振動を予測し、近傍に保安物件等がある場合には、周辺の地盤振動を低減する必要がある。

本報では、改良効果確認のために実施したサウンディング結果ならびに現場実験の際の地盤振動測定結果および秒時差による地盤振動の低減効果について報告する。

2. 実験概要

(1)実験概要

実験は、図-1に示すように1孔発破(予備試験)の両側にグリッド状発破(本実験)を行う R1, R2の実験ヤードを設けた。各発破孔には、上下2段の

装薬ユニットを設置し、1ステージ(1回)当りの発破は、6孔×2段=12発の段発とした。

各ケースの発破は表-1に示すように装薬量、発破の秒時差を変え、発破時の騒音・振動^{4),5)}ならびに実験前後のサウンディング、間隙水圧、沈下量の経時変化を測定した。

段発の秒時差は、実験前に常時微動アレー観測を実施し、地盤の卓越周期を求めた結果、0.2~0.25秒であると予想されたため、表-1に示す範囲に設定した。

(2)地盤条件および装薬深度

実験場所は、千葉県東金市の沢部を約5m盛土した造成地であり、N>50の洪積砂層の上部に沖積層が堆積した地盤である。沖積層の下部はシルト薄層が挟在また礫が点在する細砂が主体で、上部はシルト~粘土質細砂が互層となっている。地下水位は沢部の難透水層境界を流れる伏流水も考えられるが、GL-7m前後である。ヤードR1の調査結果を図-2に示す。実験は、N<15の沖積層を液状化対策の対象(図中網掛け部分)とし、上下2段の装薬深度(GL-10m、-14m)を設定した。

3. 効果確認試験

(1)標準貫入試験および液状強度試験結果

図-2 にヤード R1 の場合の事前・事後の標準貫入試験結果および道路橋仕方書の方法⁶⁾によりN値から算出した動的せん断強度比 R_L 、液状化安全率 F_L の深度分布を示す。なお、 F_L の計算条件としての水平震度は、加速度レベル 200gal 相当とし、地震動タイプはタイプIの場合とした。

事後のN値の増加は、改良対象層下部の細砂層で

大きく2～13、上部の薄層の互層部で4程度と、下部の細砂層で大きなN値の増加が認められた。液状化安全率 F_L については、事前0.66～0.97 に対し、事後0.98～1.34 と増加し、N値の増加に伴う液状化抵抗の向上が認められる。

つぎに、GL-15m 付近より採取した不攪乱試料に対する液状化試験(JGS T 541-1990)結果を図-3 に示す。繰返し三軸強度比($N_c=20$)は、事前 $R_L=0.230$ に対し、事後 $R_L=0.295$ となり、液状化強度の増加が確認された。図-2 に示した R_L は、GL-14.3m～-15.3m におけるN値に対し、事前 $R_L=0.181\sim0.216$ 、事後 $R_L=0.231\sim0.297$ であり、N値の増加は液状化強度の増加を裏付ける結果となった。

(2)スウェーデン式サウンディング試験結果

図-4 にヤード R1 の場合の結果を示す(試験箇所

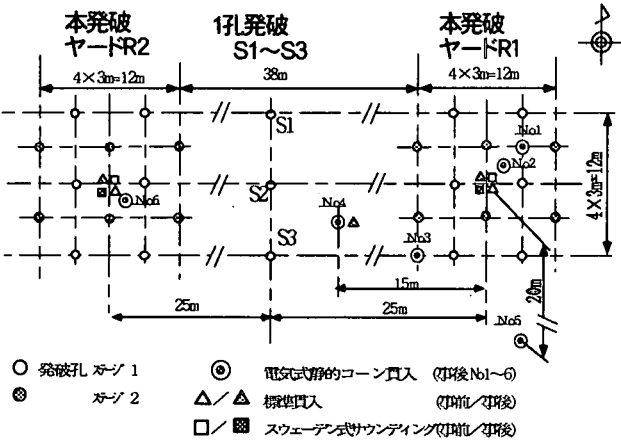
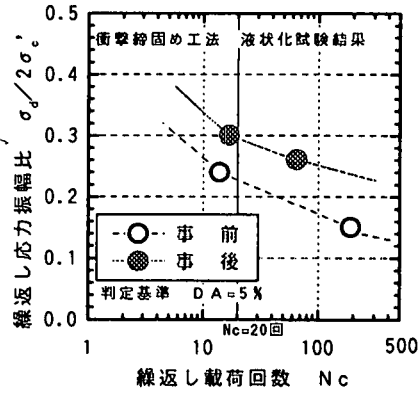


図-1 実験場所平面図

表-1 実験条件

実験ケース	予備実験			本実験(グリッド状発破)			
ケースNo	S1	S2	S3	R1-1	R1-2	R2-1	R2-2
実験ヤード	S(1孔発破)			ヤードR1		ヤードR2	
発破ステージ	—			ステージ1	ステージ2	ステージ1	ステージ2
日程	1日目			3日目	5日目	3日目	5日目
実験順序	①	②	③	⑤	⑦	④	⑥
発破孔数(孔)	1	1	1	6		6	
装薬ユニット数(個)	1	1	2	6孔×2段=12		6孔×2段=12	
装薬量(kg/ユニット)	1.5	3	3	3		1.5	
発破の秒時差(sec)	—	—	0.3	0.15	0.30	0.20	0.25



ヤード R1、GL-15m 付近採取
φ 75×150mm、荷重周波数 0.1Hz

図-3 液状化強度試験結果

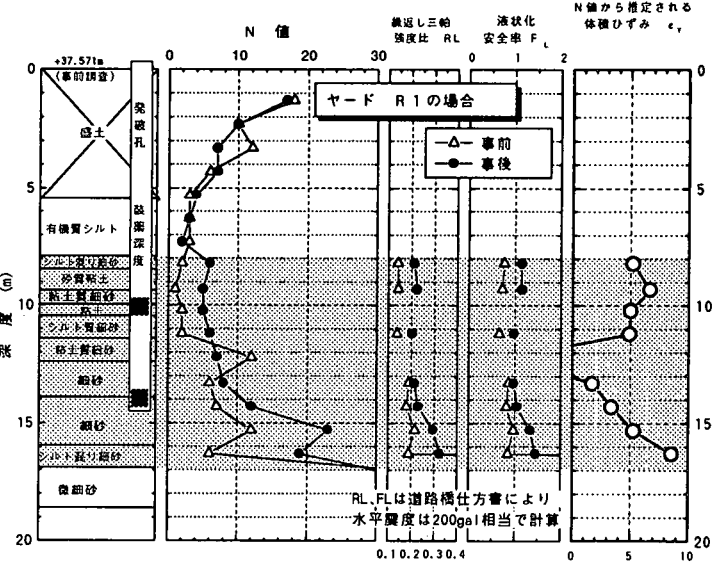


図-2 標準貫入試験結果

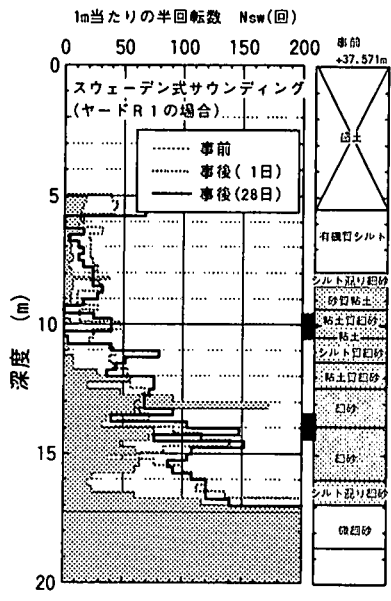


図-4 サウンディング結果

図-1 参照)。同図より、事前の貫入抵抗 N_{sw} (網掛け部分) に対して、事後の N_{sw} は対象層下部の細砂層で大きく 70~90 回、また、粘性土の薄層が挟在する対象層上部においても、20~50 回、増加しており発破による改良効果が認められた。

貫入抵抗の発現時期については、事後 1 日と 28 日の N_{sw} をみると大差がないことから、発破後 1 日程度で貫入抵抗の増加が現れたといえる。後述のように、今回の実験では、過剰間隙水圧の消散、地表面沈下の増加の大部分が発破後 1 日程度で生じていることを確認している。

(3) 沈下量および間隙水圧の測定結果

図-5 にステージ 1 発破後の地表面沈下の経時変化を示す。沈下量は、装薬量の多いヤード R1 で大きく、発破 4 週間後ではヤード R1: 258 mm, R2: 123 mm となった。沈下量の経時変化は、各ステージの発破直後に大きく生じ、4 週間経過時点ではほぼ収束している。

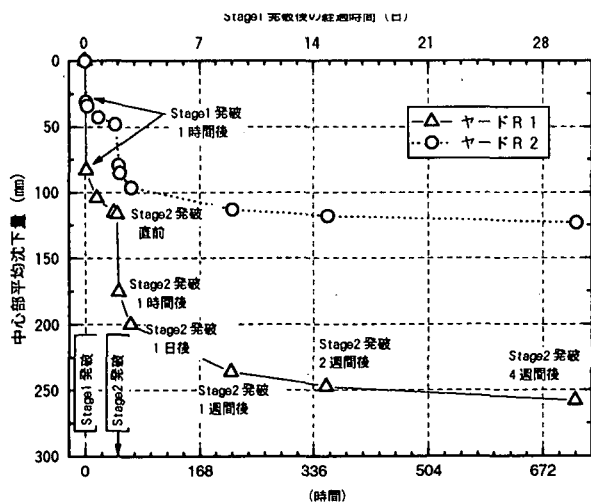


図-5 地表面沈下の経時変化

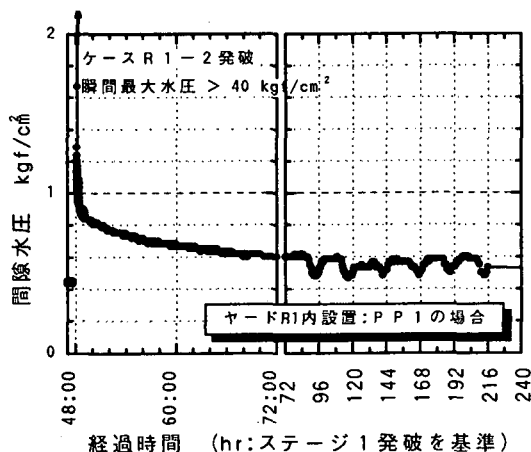


図-6 間隙水圧の経時変化

今回の実験地盤では、図-6 に示すように、間隙水圧の大半が 24 時間程度で消散していること、また、前述のとおり、1 日、28 日経過後のスウェーデン式貫入試験の結果に大差がなかったことから、改良効果は比較的早く生じたと考えられる。

改良による締固め効果を体積ひずみ $\epsilon_v = \text{沈下量} / \text{改良対象層厚}$ として推定すると、R1 の場合 $\epsilon_v = 2.9\%$ となる。これは、改良対象層が一様に沈下したと仮定したものであるが、地盤調査結果から明らかなように、土質および N 値は深度方向に不均一であり、実際には、改良効果 (N 値の増分) の大きな部分に、より大きな ϵ_v が生じていると考えられる。 N 値から推定される体積ひずみ ϵ_v (図-2 参照) は、実験前後の N 値より、間隙比 e を推定し、 e の変化より算出した結果であるが、体積ひずみは、 N 値の増分に対応し $\epsilon_v = 1.7 \sim 8.6\%$ と推定された。

4. 振動測定結果および振動予測解析

(1) 振動測定結果

計測された地盤振動 (速度記録) の内ここでは、発破地点から 50, 100, 175m の距離の地表面での鉛直速度成分について示す。図-7 は、1 孔 1 箇所装薬時 (ケース S1) の鉛直速度記録である。距離 50m 位置では、実体波による鋭いピークが記録されている。この成分は、0.2 秒程度で減衰し、その後 5 Hz 程度の周波数の表面波成分が見られる。一方、距離が 100, 175m と離れるに従い、実体波は減衰し、表面波成分が顕著となる。

図-8 に、本実験 4 ケースの発破領域中心からの距離と地表面速度 (鉛直成分) の関係を示す。距離減衰特性は、1 箇所当たりの装薬量および段発の秒時差

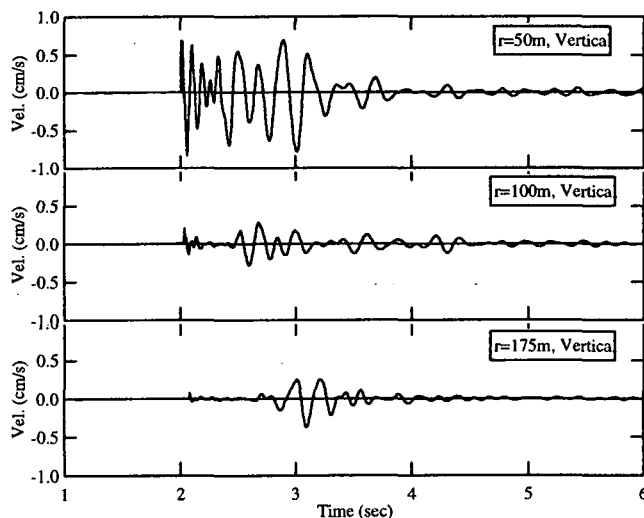


図-7 観測記録 (ケース S1、鉛直成分)

の違いにより傾向が異なる。地盤の固有周期に近い秒時差 0.20 (R2-1) および 0.25 (R2-2) のケースでは、距離による最大速度の減衰が他のケースに比べて小さくなっている。距離 175m においては、秒時差 0.15 (R1-1)、0.30 (R1-1) 秒のケースは、装薬量が 2 倍 (3.0kg と 1.5kg) 違うにもかかわらず、最大速度値は小さく、段発の秒時差の設定による振動低減の効果が確認された。

(2) 地盤振動予測解析結果

1 孔のみの試験発破計測結果より、複数発破 (本実験) 時の地盤振動の予測解析を行った。解析方法は、試験発破時に記録された観測点各位置での振動波形を、段発時の秒時差に応じて重ね合わせるにより行った。この方法による予測波形と観測波形の比較 (ケース R2-2) を図-9 に示す。実体波の影響が大きい 50m 位置では、解析と観測結果の差が生じているが、表面波が卓越する 175m 位置では、ピーク値、その時刻、振幅とも非常に良い一致を示している。地盤特性を反映する表面波の再現性は高く、振動制御が可能であることがわかる。

今回の実験では、秒時差として 0.15~0.30 秒の 4 ケースについて実施したが、解析は 0.00~0.50 秒の範囲について、0.05 秒間隔で行った。これらの結果を計測震度として図-10 に示す。秒時差 0 秒の場合には非常に大きな解析結果が得られるが、0.05 秒で最も小さな応答となり、地盤の固有振動数に対応する 0.2 前後の秒時差においてピークが見られる。

5. まとめ

発破を用いた締固めによる液状化対策工法の効果を各種サウンディング試験、液状化強度試験により確認できた。

また、発破による振動については、段発の秒時差の設定によって、周辺への地盤振動の低減の可能性について、現場実験および解析的検討を加えた。この結果、今回実験の秒時差 (0.15 秒~0.30 秒) より短い秒時差を用いることで、さらに地盤振動の低減の可能性のあることが分かった。

今後は、データの蓄積をはかり、地層に応じたより効果的な発破仕様の設定方法について検討するとともに、計測結果をさらに分析し、地盤振動の予測、秒時差の設定方法について検討を進めていきたい。

謝辞: 本実験の騒音・振動計測および比抵抗探査は、工業技術院資源環境技術総合研究所との共同研究として実施した。ご指導・ご協力頂いた神宮司元治、

今泉博之の両氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 辻野他: 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~その3, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, pp. 284-289, 1997. 9.
- 2) 前田他: 発破を用いた締固め工法の液状化対策効果の確認実験, 第 34 地盤工学研究発表会 (投稿中).
- 3) 中嶋他: 発破を用いた締固め工法の効果確認実験, 土木学会第 54 回年次学術講演会 (投稿中).
- 4) 辻野他: 発破を用いた締固め工法による地盤振動に関する考察, 第 34 回地盤工学研究発表会 (投稿中).
- 5) 国松他: 発破を用いた締固め工法による地盤振動性状, 土木学会第 54 回年次学術講演会 (投稿中).
- 6) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成 8 年 12 月.

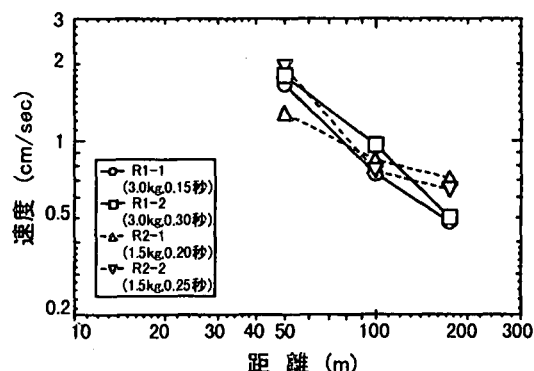


図-8 地盤振動の距離減衰 (計測結果、鉛直成分)

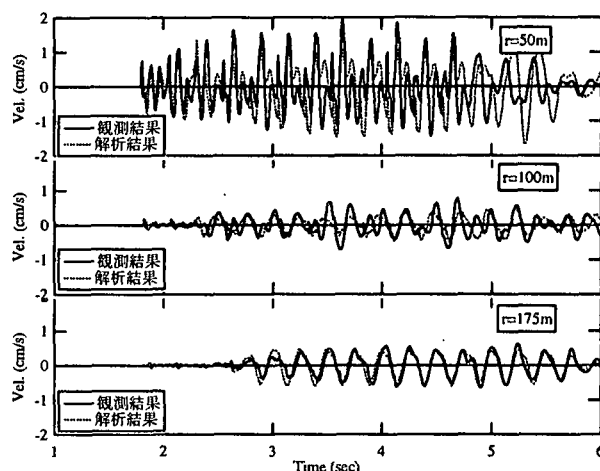


図-9 観測波形と解析結果の比較
(実験ケース R2-2、鉛直成分)

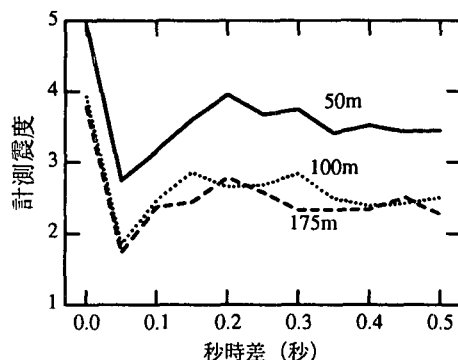


図-10 発破秒時差による地盤振動の変化