

# グラベルドレーン工法における液状化対策効果の定量的評価

—— 振動台実験と有効応力法地震応答解析による検証 ——

鳥井原 誠 山田 祐樹  
平間 邦興

## Evaluation of Gravel-drain Method for Preventing Liquefaction

—— Shaking Table Tests and Simulations of Effective Stress Method ——

Makoto Toriihara Yuuki Yamada  
Kunioki Hirama

### Abstract

Gravel drain is one of the most effective methods for preventing liquefaction. Because of its low pollution in vibration and noise, it is available not only for construction of new buildings but also for modification of existing buildings. This method is not used for improving the ground itself. Therefore, particular quantitative analysis is necessary to determine its effect in the design stage before construction. This paper describes vertical drain shaking table tests and simulations using the effective stress method. Three types of tests and analyses were executed. (1)Single circle drain (30cm diameter); confining drain effect, (2)Twelve circle drains (6cm diameter, 30cm interval); simulation of actual whole ground, (3)Wall drain; comparison between 2-dimensional model and 3-dimensional model. The shaking table tests demonstrate the drain effect and the 2-dimensional effective stress analysis simulates the gravel drain method.

### 概要

間隙水圧消散工法の代表的なもののひとつであるグラベルドレーン工法は、振動・騒音が小さくてすむため、新設構造物だけでなく既設構造物に対する液状化対策工法としてその効果が期待される工法である。しかしながら、この工法は地盤そのものを改良するものではないため、実際の効果を確認可能なものにするためには、事前の設計段階での定量評価ができるだけ詳細になされている必要がある。そのため、本研究では、グラベルドレーン模型地盤の振動台実験を行うとともに「EFFECT」<sup>1)</sup>を用いた有効応力法シミュレーション解析を行い、この工法の改良効果の詳細な検証を行った。実験ケースとしては、φ30cmのドレーン単体の排水効果に着目した実験と、φ6cmのドレーンを30cmピッチで12本配置した全面改良地盤の実験、および三次元モデルを二次元モデルに置き換えることの妥当性を検証するための壁状ドレーンの実験の3ケースである。その結果、振動台実験によってグラベルドレーンの有効性を確認するとともに、二次元モデルによる有効応力法地震応答解析で改良効果の定量的評価が可能であることが明らかとなった。

#### 1. はじめに

地盤の液状化対策工法には、地盤を締固める方法や地盤変形を拘束する方法など原理の異なるさまざまな工法があるが、その中のひとつに地盤中の過剰間隙水圧を速やかに消散させて液状化を防止する工法がある。その代表的なものがグラベルドレーン工法である。

これは、Fig. 1に示すように地盤中に透水係数の大きな碎石（グラベル）のパイプを多数造成し、土中に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制して液状化を防止する工法である。この工法は、工事中の振動・騒音が比較的少

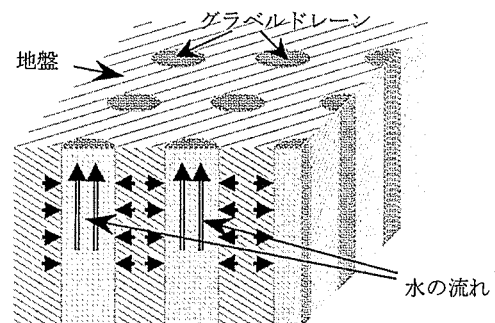


Fig.1 グラベルドレーン工法の概要  
Outline of Gravel-drain Method

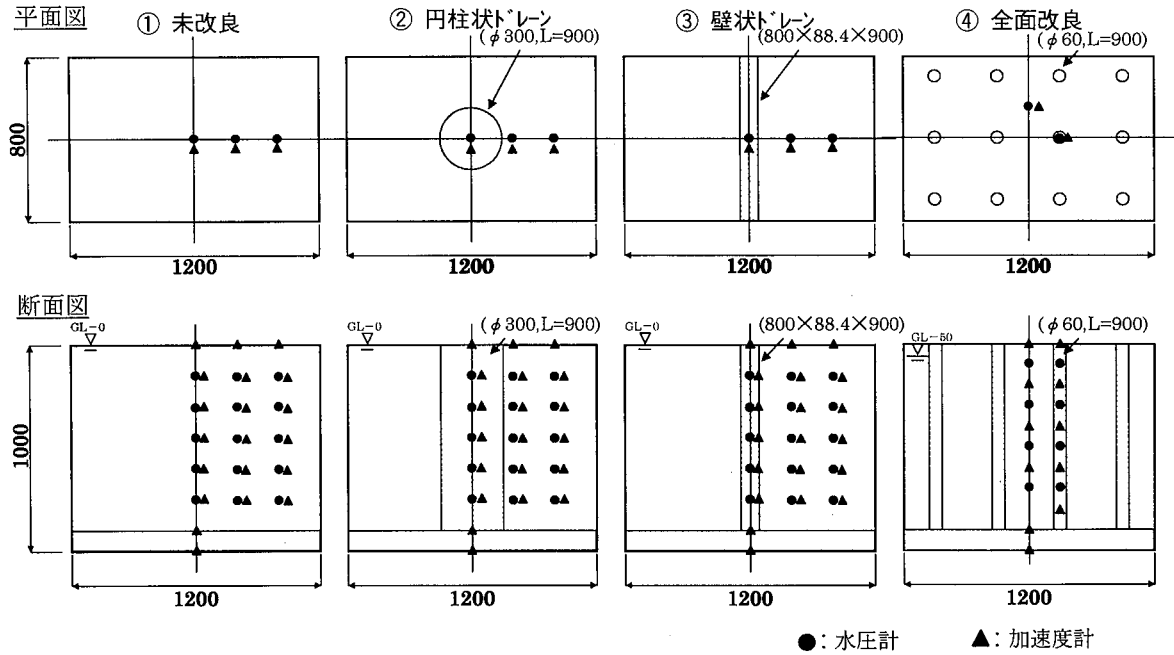


Fig.2 実験ケース  
Cases of Experiment

なくてすむということもあって、新設構造物だけでなく、既設構造物近傍あるいは既設構造物そのものに対する対策工法としても、その効果が期待される工法である。

しかしながら、この工法には、土中に排水層（グラベルドレーン）を設けるのみで地盤そのものを改良するわけではないので、たとえば締め固め工法のように地盤改良後のN値で対策効果を確認するといったことができない、といった問題点がある。したがって、液状化対策工法としての信頼性を確保するためには、事前の設計段階における液状化対策としての評価ができるだけ詳細になされている必要がある。

そのため、本研究ではいくつかの振動台実験と有効応力法による詳細なシミュレーション解析を実施し、グラベルドレーン工法の改良効果の定量的な評価を行なった。

## 2. 振動台実験による改良効果の検証

### 2.1 実験概要

今回の実験は、グラベルドレーン工法の効果を詳細な有効応力シミュレーション解析で検証することを目的に、以下に示す4種類の地盤で液状化実験を行なった。

- ①未改良地盤
- ②φ30cmの円柱状ドレーン1本を設置した地盤
- ③φ30cmと同一面積の壁状ドレーンを設置した地盤
- ④φ6cmドレーンを30cm間隔に設置した全面改良地盤

### 2.2 実験方法

2.2.1 実験材料 実験で用いた地盤材料は岐阜砂、グラベルドレーンの材料は6号砕石である。それぞれの材料の代表的な物性値をTable. 1に示す。

Table.1 材料物性値

Soil Properties

材料名	砂 (岐阜砂)	砕石 (6号)
平均粒径 (mm)	0.35	10.0
透水係数 (cm/s)	$1.1 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^0$
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.35	1.68

2.2.2 実験手順と加振方法 使用した土槽は、Fig. 2に示す1,200×800×1,000mmのせん断土槽である。土槽下部に厚さ10cmの砕石層を設置し、砂を上部から投入した後に下部から圧力水を送ってボイリングさせることによって、緩い砂地盤を作成した。できあがった地盤の相対密度は約40%である。

グラベルドレーンは、所定の形状を有するステンレス製の柔らかいメッシュ籠を設置し、その中に砕石を投入することによって作成した。

加振方法としては、所定の加速度振幅を有する周波数5Hzの正弦波を4秒間継続させ、全体の繰返し回数を20波とした。加速度振幅は、25, 50, 75, 100, 125, 150galと段階的にあげていくステップ載荷方式を採用した。

計測項目は加速度、間隙水圧などであり、それぞれの計器をグラベルドレーン内と砂地盤内にFig. 2に示すように配置した。

計測時間は加振開始から35秒間とし、加振中だけでなく加振停止後の間隙水圧消散過程の状況も検証することとした。

また、実験前後には地盤の動的特性を把握するためにS波測定および5gal程度のホワイトノイズ加振を行なった。ホワイトノイズ加振は、各周期成分が一様に分布している入力波に対する地盤の応答の卓越周期成分により、地盤の固有周期を求めるものである。

### 2.3 実験結果

加速度振幅75galにおける過剰間隙水圧と加速度の時刻歴をFig.3,4に示す。未改良地盤では加振開始後すぐに過剰間隙水圧が上昇し液状化が発生していることが明らかである。そのときの加速度波形をみると過剰間隙水圧が小さいうちは加速度応答も大きいですが、過剰間隙水圧が上昇して液状化に至った後は加速度も大きく低下して

いる。これは地盤の液状化によって有効応力が失われ、せん断力が伝達されなくなったためであるが、この現象は兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震記録でも確認されている。<sup>2)</sup>

それに対して、グラベルドレーンを設置したケースではいずれも過剰間隙水圧の上昇が抑制されており、液状化は発生していない。その結果、加速度応答も未改良地盤のケースほど小さくなっておらず、地盤のせん断抵抗力が残存していることが明らかである。

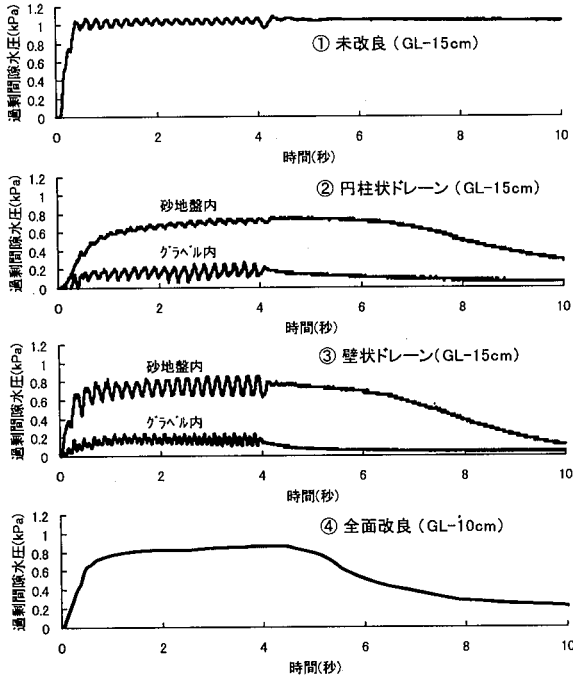


Fig.3 過剰間隙水圧の時刻歴  
Excess Pore Water Pressure Time Histories

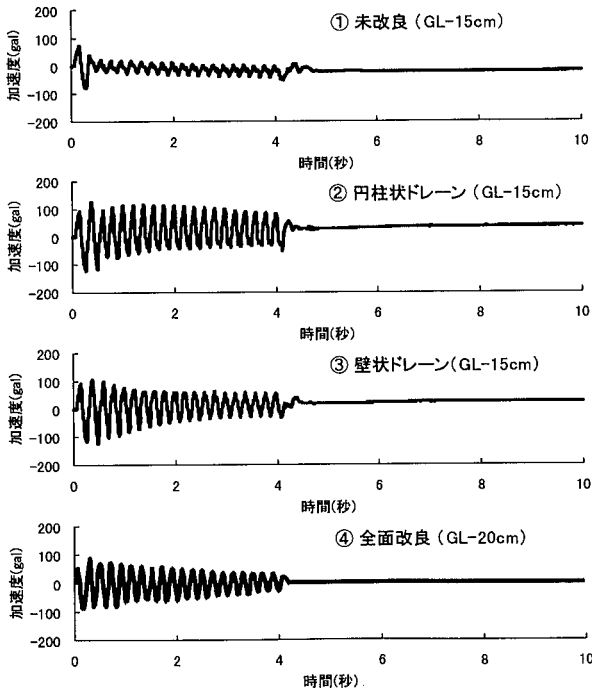


Fig.4 加速度の時刻歴  
Acceleration Time Histories

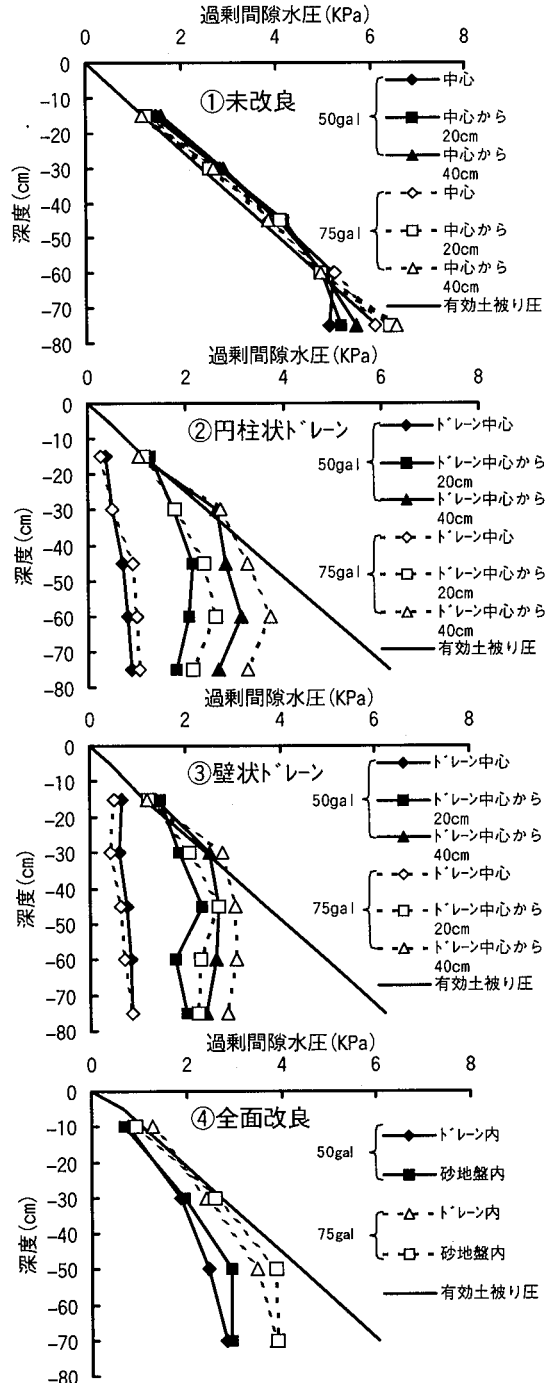


Fig.5 最大過剰間隙水圧の深度分布  
Vertical Distribution of Maximum Excess Pore Water Pressure

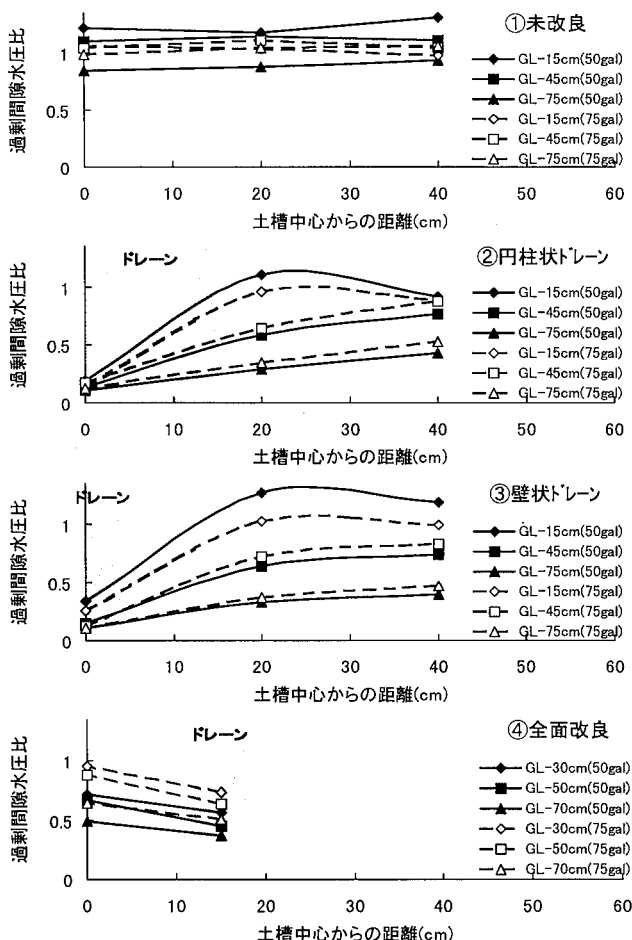


Fig.6 過剰間隙水圧比の平面分布  
Horizontal Distribution of  
Excess Pore Water Pressure Ratio

また、グラベルドレーン内の過剰間隙水圧はかなり小さくなっており、排水効果が有効に発揮されていることがわかる。そのため、グラベルドレーンがある地盤では加振停止後に過剰間隙水圧が速やかに消散しているのに対し、未改良地盤ではほとんど低下していないのである。

各実験ケースにおける最大過剰間隙水圧の深度分布を Fig. 5 に示す。それぞれの計測結果は 50gal, 75gal で加振した実験における、グラベルドレーン中心と中心から 20cm, 40cm 離れた位置での値を示している。図中の実線は、土被り圧から初期静水圧を減じた有効土被り圧である。過剰間隙水圧が上昇してこの値と等しくなった時点で、有効応力がゼロになり液状化に至る。

未改良地盤ではすべてのケースで過剰間隙水圧が有効土被り圧と等しくなっており、全層で液状化したことが明らかである。それに対して、グラベルドレーンを設置した他のケースでは、地表面から GL-30cm までの浅い部分で過剰間隙水圧が有効土被り圧とほぼ等しくなっているが、GL-30cm で深では明らかに有効土被り圧より小さくなっており液状化には至っていない。

Fig. 5②は円柱状グラベルドレーンの中心とそこから 20cm, 40cm の結果を示しているが、ドレーン中心の水圧

上昇は小さく、ドレーンから離れるにつれて水圧の上昇が大きくなっていることが明らかである。これは、Fig. 5 ③の壁状ドレーンでも同様な結果となっている。この 2 つのケースでほぼ同様な結果が得られたということは、本来 3 次元モデルであるグラベルドレーンを 2 次元に置き換えて解析してもよい、というひとつの根拠になる。

これに対して、Fig. 5④の全面改良地盤では液状化対策としての効果はみられるもののドレーン内の過剰間隙水圧はやや大きくなっている。これは円柱状ドレーンが直径 30cm と大きいのにに対して、全面改良地盤のドレーン径は直径 6cm と小さいため、排水効果に差があったことが原因だと思われる。ただし、この場合でも、ドレーンを多数配置しているため地盤全体に対する液状化対策効果は有効に発揮されている。

Fig. 6 は横軸を土槽中心からの距離、縦軸を過剰間隙水圧比（過剰間隙水圧 / 初期有効土被り圧）として、グラベルドレーンの水圧低減効果がドレーンからの距離によってどのように変化するかを示したものである。未改良地盤はほぼすべての過剰間隙水圧比が 1.0 となり、一様に液状化していることがわかる。他のケースでは、地表面から近い GL-15cm での結果をのぞいて、ドレーンから離れるほど過剰間隙水圧比が大きくなり、改良効果が小さくなっていることが明らかである。

### 3. 数値解析による改良効果の検証

#### 3.1 解析方法

今回の解析は、当社開発の有効応力解析プログラム「EFFECT」を用いた 2 次元有効応力解析である。したがって、円柱状ドレーン、全面改良のケースでは、それぞれドレーンを厚さ 88mm, 9.4mm の壁状ドレーンとして解析している。境界条件としては、地盤底面を固定、側方を等変位境界とした。

解析に用いた主なパラメータを Table. 2 に示す。これらのパラメータは、基本的に実験土槽内の地盤からブロックサンプリングした試料を用いて行なった室内要素試験結果から求めたものである。

Table. 2 解析パラメータ

Numerical Analysis Parameters		
材料名	砂	碎石
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	45.2	72.3
ポアソン比	0.3	0.3
内部摩擦角(°)	38	42
間隙比	0.95	0.51
ダイレイタンシーパラメータ	$\lambda : 1.07$ $\mu : 0.25$	$\lambda : 1.30$ $\mu : 0.15$
硬化係数	0.0021	0.0003
透水係数(cm/s)	$1.1 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^0$

Fig. 7 は GL-10cm と GL-60cm で採取した試料の液状化試験結果である。実線は今回の解析プログラムである「EFFECT」を用いた要素シミュレーション解析の結果である。試験結果に比較するとやや急勾配な結果とな

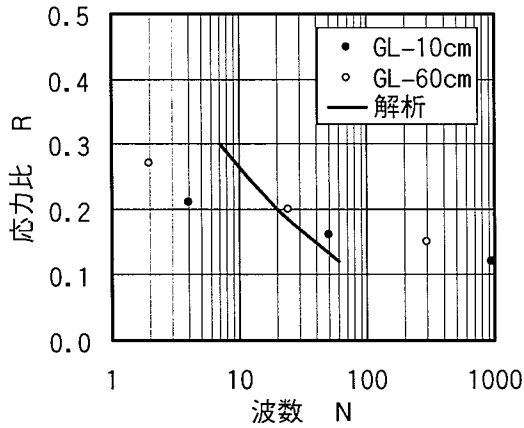


Fig.7 液状化強度曲線  
Stress Ratio of Liquefaction

っているが、解析では一般に液状化強度と呼ばれる  $R_{20}$  (20波で液状化する応力比)が試験結果と一致するようにパラメータを設定している。

### 3.2 解析結果

Fig.8に75gal加振時における過剰間隙水圧比の実験結果と解析結果の時刻歴を示す。未改良地盤の実験結果と解析結果を比較すると、加振初期の水圧上昇過程で解析結果の方がやや小さくなっているが、過剰間隙水圧比が1.0になって液状化に至っている様子など、全体的にはほとんど一致している。円柱状ドレーン、壁状ドレーンを設置したケースの解析でも、過剰間隙水圧比の最大値が0.8程度で、液状化には至っていない実験結果がよく再現できている。全面改良地盤の解析では、未改良地盤のケースとは逆に加振初期の水圧上昇が解析の方がやや速くなっているが、過剰間隙水圧比の最大値や水圧消散過程など全体的な傾向はよく一致している。

Fig.9はFig.8と同様な実験における加速度の時刻歴である。液状化に至った未改良地盤では、その他のケースに比べて加速度が大きく低下している様子が解析でも再現できている。加振初期の解析結果が実験に比べてやや大きくなっているのは、Fig.8に示したように過剰間隙水圧の上昇が実験と比較してやや遅れているからである。

Fig.10は未改良地盤、壁状ドレーン設置地盤(円柱状ドレーン設置地盤)、全面改良地盤における加振終了直後の過剰間隙水圧分布の解析結果を示したものである。未改良地盤は全層が液状化しているため、加振終了後も地表面近傍をのぞいて一様に過剰間隙水圧比が高くなっている。それに対して、グラベルドレーンを設置した他のケースでは、ドレーン近傍の水圧が明らかに低下しており、グラベルドレーンの間隙水圧消散効果が明瞭である。

Fig.11は最大過剰間隙水圧の深度分布を実験結果と解析結果で対比したものである。全層が液状化した未改良地盤と、グラベルドレーンを設置したため液状化には至らなかった他のケースともに、解析結果は実験結果とおおむね対応していることが明らかである。

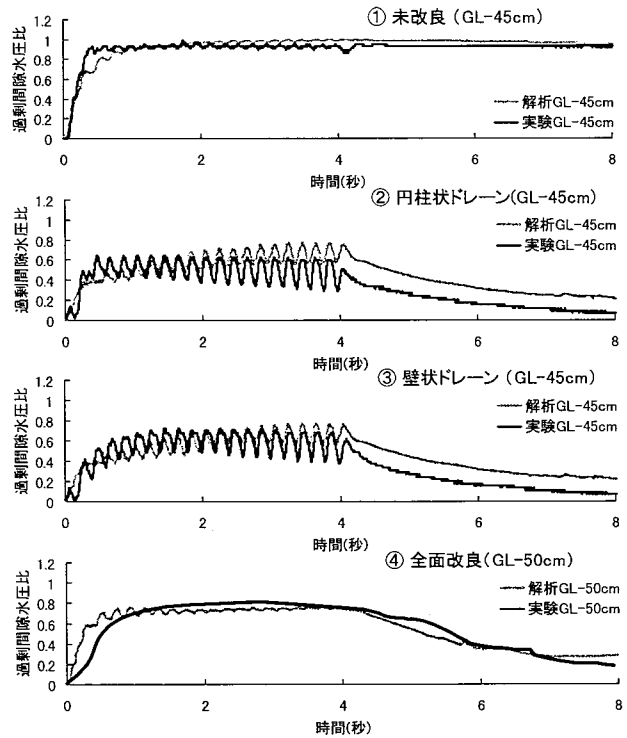


Fig.8 過剰間隙水圧比の時刻歴  
Excess Pore Water Pressure Ratio Time Histories

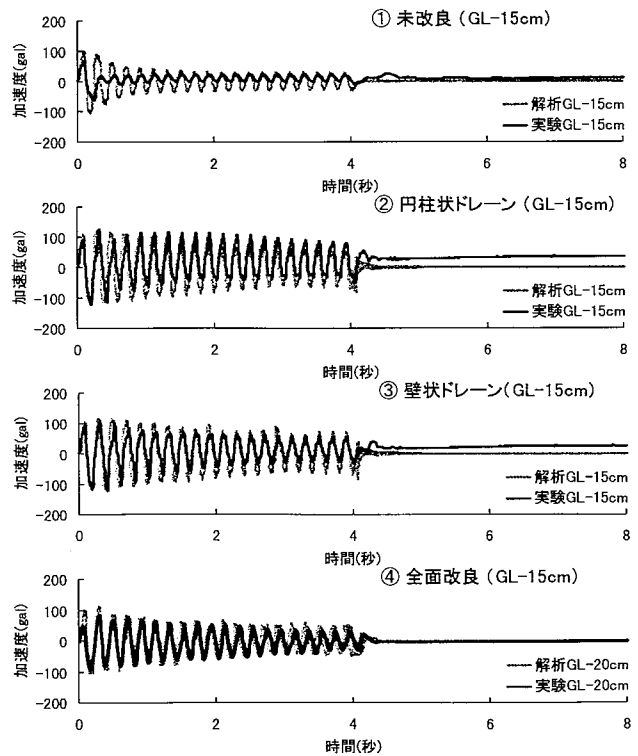


Fig.9 加速度の時刻歴  
Acceleration Time Histories

### 4. おわりに

液状化対策としてのグラベルドレーン工法の効果を、定量的に評価することを目的として実施した今回の研究で明らかとなったことを要約すると以下ようになる。

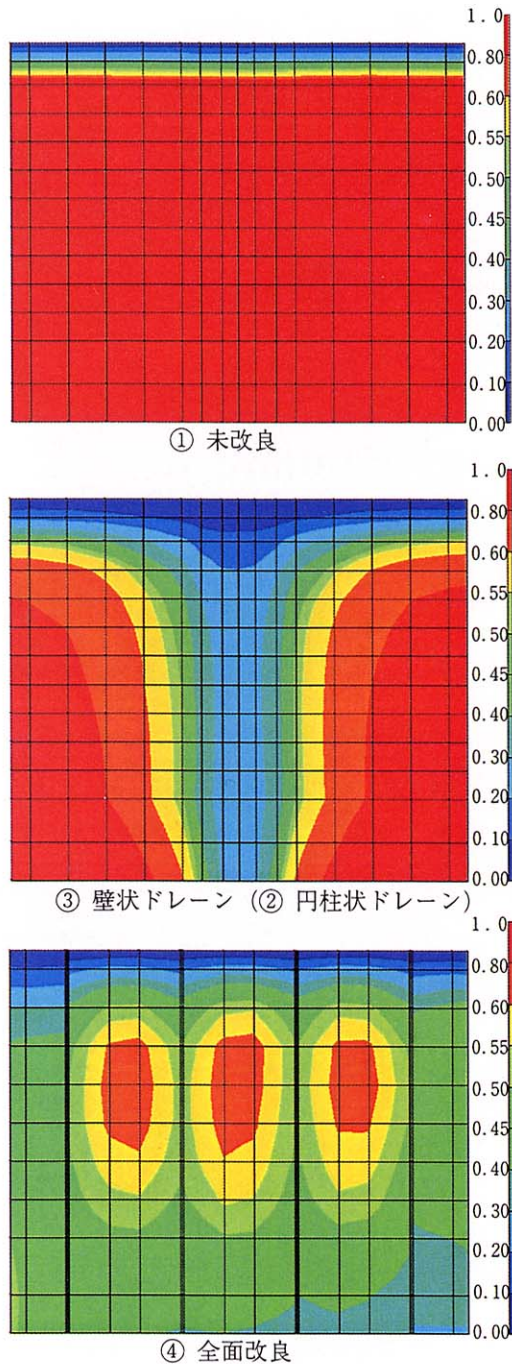


Fig.10 過剰間隙水圧比の分布

Distribution of Excess Pore Water Pressure Ratio

- 1) 振動台実験によってグラベルドレーン工法の有効性を確認するとともに、円柱状ドレーンと壁状ドレーンを比較することによって、グラベルドレーン改良地盤を2次元モデルに置き換えて解析することの妥当性を検証することができた。
- 2) 有効応力法地震応答解析によって、未改良地盤および改良地盤の過剰間隙水圧分布などを精度よく再現することができた。

以上のことから、今回の手法が実際の地盤におけるグラベルドレーン工法の設計にも大いに有用であることが明らかとなった。

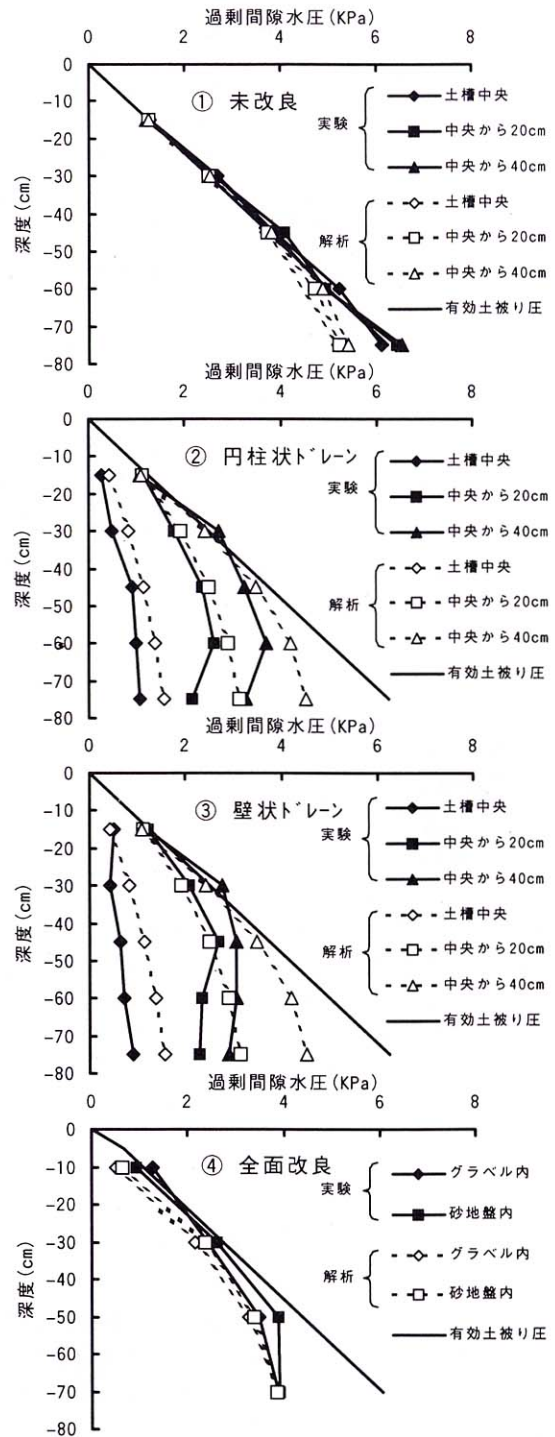


Fig.11 最大過剰間隙水圧の深度分布  
Vertical Distribution of Maximum Excess Pore Water Pressure

参考文献

- 1) 伊藤 浩二：動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その1) -基礎理論と地盤構成モデル-, 大林組技術研究所報, No. 51, p7~14, (1995)
- 2) 鳥井原 誠, 伊藤 浩二：兵庫県南部地震で被災した埋立地の地盤特性と液状化, 大林組技術研究所報特別号, p25~34, (1996)