

# 第 11 回日本地震工学シンポジウム

## 3次元液状化解析による深層混合処理格子状改良地盤の安定性評価

岡二三生（京都大学大学院工学研究科土木工学専攻, foka@nakisuna.kuciv.kyoto-u.ac.jp）  
 小高猛司（京都大学大学院工学研究科土木工学専攻, kodaka@nakisuna.kuciv.kyoto-u.ac.jp）  
 田中克実（不動産建設ジオエンジニアリング本部, katsumi@fudo.co.jp）

既設河川堤防の液状化対策として法尻に深層混合処理による格子状固化改良体を施工する場合がある。現行設計法では格子間隔  $L$  と改良深さ  $H$  との比  $L/H$  は概ね 0.8 以下が適当とされているが、 $L/H$  を基準に格子間隔を設計する場合、液状化層厚が薄いほど格子間隔を密にせざるを得ないという不合理性が生じることも指摘されている。本論文では、3次元有効応力解析法（LIQCA-3D）を用いて格子状改良された水平地盤モデルの解析を行い、格子壁および格子壁に囲まれた砂地盤の加震時の応力状態を詳細に検討しつつ、格子壁の間隔と液状化層厚が液状化抑制にどのように寄与するのかについて系統的に調査した結果を示す。

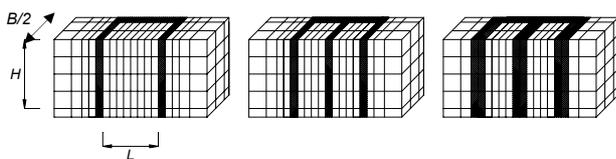
図 1 は格子状改良の 3 種のパターンであり、改良体を線形弾性体でモデル化して解析を行った。地盤深さは 9m であり、最下層 1m は非液状化砂層、その上部 8m が液状化砂層である。表 1 に設定した 8 種の解析ケースを示す。

液状化解析の結果、未改良地盤では、載荷後に地震動が増幅した後に急激に減衰する典型的な液状化地盤の加速度応答を示したが、改良地盤では応答加速度は増幅も減衰もせず、地盤全体が剛体的に挙動することが明らかになった。また、改良により過剰間隙水圧の発生が抑制されることが確かめられた。しかしながら、液状化の度合いを表す平均有効応力減少比を見ると、改良により 1 に近づく割合は若干抑えられが、過剰間隙水圧の抑制から予想されるほどに改良効果は顕著に表れておらず、格子内の砂地盤が液状化に近い状態にあることが確かめられた。図 2 および 3 はそれぞれ、全解析ケースにおける過剰間隙水圧比および平均有効応力減少比と  $L/H$  との関係である。最下層は非液状化層の影響を受けているために、浅いモデルでは深度 3m と 5m、深いモデルでは深度 5m と 9m の解析結果を用いて整理した。結果に幅があるものの  $L/H$  が 0.8 以下においては過剰間隙水圧比の上限は概ね 0.8 以下で一定となっており、模型実験による既往の研究結果の傾向と一致している。しかしながら、液状化度を示す平均有効応力減少比では  $L/H$  が小さくても有効応力の減少量は大きい場合もあり、格子内の砂地盤が液状化に近い状態にあることがわかる。

また、格子状改良壁やその内外の砂の有効応力状態を詳細に検討した結果、加震方向に平行に打設した改良壁に地震荷重は集中し、改良壁内の砂地盤を保護することが確認できた。しかし、改良壁で囲まれた砂自体は液状化に近い状態に達しており、砂自身の液状化抵抗力が著しく向上しているわけではないことには注意が必要である。また、加震中に集中するせん断力により改良壁が破壊する可能性は低いことも確かめられた。

表 1. 解析ケース一覧

ケース	パターン	L(m)	H(m)	L/H	B(m)	改良率
未改良	—	—	8	—	4	0%
A	I	6.4	8	0.8	4	35%
B	II	3.2	8	0.4	4	42%
C	III	3.2	8	0.4	4	54%
D	I	12.8	16	0.8	4	29%
E	II	6.4	16	0.4	4	33%
F	III	6.4	16	0.4	4	42%
G	I	9.6	8	1.2	4	31%



(a) パターン I (b) パターン II (c) パターン III

図 1. 格子状改良の 3 種のパターン

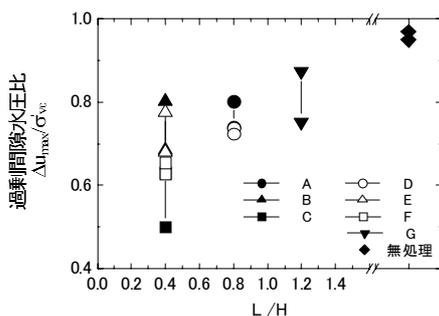


図 2. 過剰間隙水圧比～ $L/H$  関係

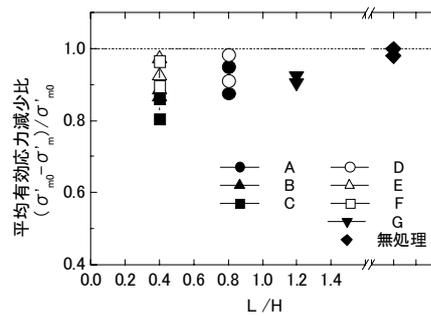


図 3. 平均有効応力減少比～ $L/H$  関係

# 第 11 回日本地震工学シンポウム

## 3次元液状化解析による深層混合処理格子状改良地盤の安定性評価 3-D LIQUEFACTION ANALYSIS TO EVALUATE THE STABILITY OF GRID-SHAPED STABILIZED GROUND BY DEEP MIXING METHOD

岡二三生<sup>1</sup>，小高猛司<sup>2</sup>，田中克実<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻，教授 工博

Fusao Oka, Dept. of Civil Engineering, Kyoto University, foka@nakisuna.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻，助教授 博(工)

Takeshi Kodaka, Dept. of Civil Engineering, Kyoto University, kodaka@nakisuna.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup> 不動産建設 ジオ・エンジニアリング本部，工修

Katsumi Tanaka, Fudo Construction Co. Ltd, katsumi@fudo.co.jp

### SUMMARY

The present study shows the effects of the countermeasure against liquefaction using the grid-shaped stabilization by deep mixing method. The horizontal ground improved by 3 patterns of grid-shape stabilization is computed to evaluate the stability of the improved ground using a 3-D effective stress based liquefaction analysis code (LIQCA-3D). The grid-shaped improved walls receive the most of earthquake force and the sand surrounded with the walls behaves like a rigid body with the walls. The excess pore water pressure occurring in the sands surrounded with the grid-shaped improved walls during shaking becomes less than that in the unimproved ground. The mean effective stress, however, decreases to the very small stress level near by liquefaction region.

キーワード: 格子状改良地盤, 深層混合処理, 液状化, 有限要素法, 3次元解析

Key words: Grid-shaped stabilized ground, Deep mixing method, Liquefaction, Finite element method, 3-D analysis

## 1 はじめに

既設河川堤防の液状化対策として法尻に深層混合処理による格子状固化工改良体を施工する場合がある。現行設計法では格子間隔  $L$  と改良深さ  $H$  との比  $L/H$  は概ね 0.8 以下が適当とされているが,  $L/H$  を基準に格子間隔を設計する場合, 液状化層厚が薄いほど格子間隔を密にせざるを得ないという不合理性が生じることも指摘されている。本論文では 3次元有効応力解析法 (LIQCA-3D)<sup>1)</sup> を用いて格子状改良された水平地盤モデルの解析を行い, 格子壁および格子壁に囲まれた砂地盤の加震時の応力状態を詳細に検討しつつ, 格子壁の間隔と液状化層厚が液状化抑制にどのように寄与するのかについて系統的に解析した結果を示す。

## 2 解析モデルと条件

Fig. 1 は解析に用いた水平地盤モデル( $H=8\text{m}$ )の有限要素

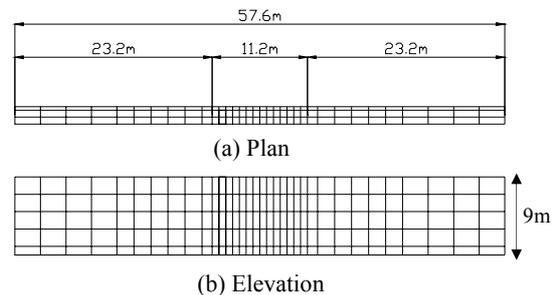
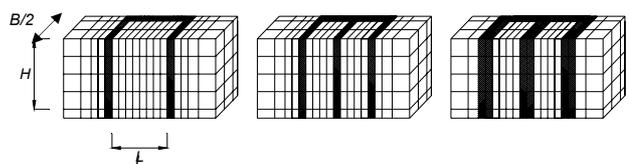


Fig. 1. Finite element array used in this



(a) Pattern I (b) Pattern II (c) Pattern III  
Fig. 2. 3 patterns of grid-shaped stabilized ground

Table 1. Soil parameters

	液状化砂層	非液状化砂層
初期間隙比 ( $e_0$ )	0.856	0.673
単位体積重量 ( $\rho$ ) (t/m <sup>3</sup> )	1.91	1.98
圧縮指数 ( $\lambda$ )	0.018	0.025
膨張指数 ( $\kappa$ )	0.0055	0.0025
初期せん断剛性比 ( $G_0/\sigma_{m0}$ )	873	908
変相角 ( $\phi_m$ ) (deg)	28	28
破壊角 ( $\phi_f$ ) (deg)	34	45
変相応力比 ( $M_m$ )	0.909	0.909
破壊応力比 ( $M_f$ )	1.122	1.511
硬化関数中のパラメータ ( $B_0$ )	2200	1500
硬化関数中のパラメータ ( $B_1$ )	30	20
硬化関数中のパラメータ ( $C_f$ )	0	0
Fading memory ( $C_d$ )	2000	2000
ダイレイタンス係数 ( $D_0$ )	5	1
ダイレイタンス係数 ( $n$ )	1.5	9
塑性基準ひずみ ( $\gamma_{ref}^P$ )	0.0050	0.015
塑性基準ひずみ ( $\gamma_{ref}^E$ )	0.01	0.1
透水係数 (m/sec)	8.50E-04	1.30E-03

Table 2. List of computational cases

ケース	パターン	L(m)	H(m)	L/H	B(m)	改良率
未改良	—	—	8	—	4	0%
A	I	6.4	8	0.8	4	35%
B	II	3.2	8	0.4	4	42%
C	III	3.2	8	0.4	4	54%
D	I	12.8	16	0.8	4	29%
E	II	6.4	16	0.4	4	33%
F	III	6.4	16	0.4	4	42%
G	I	9.6	8	1.2	4	31%

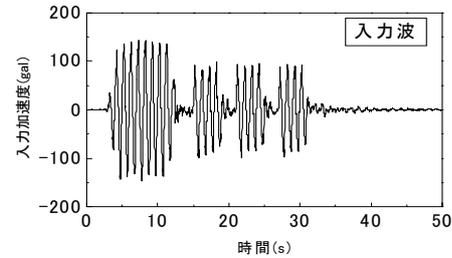
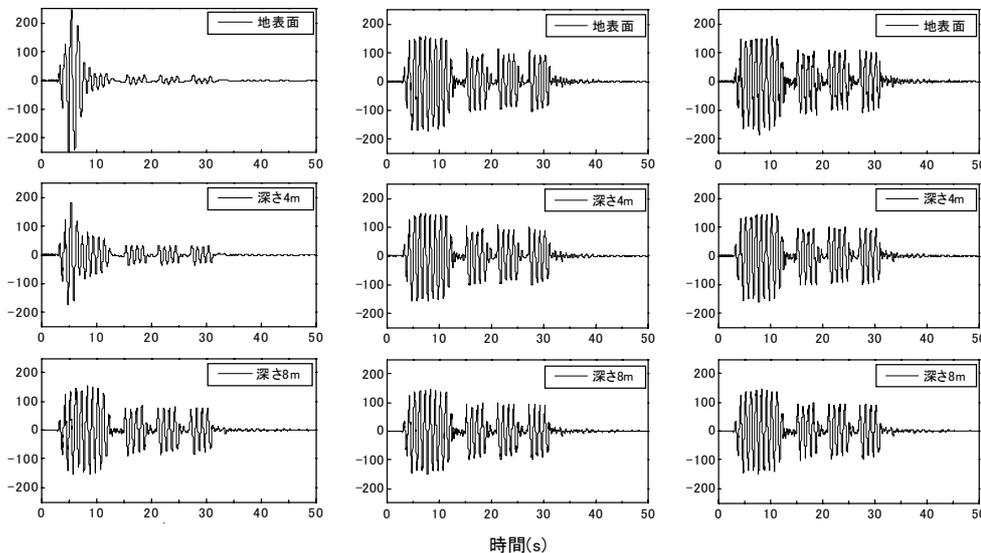


Fig. 3. Input seismic acceleration



(a) Unimproved ground (b) Case A (c) Case C

Fig. 4. Time history of absolute response acceleration (unit: gal)

素メッシュ図であり、上側に平面図、下側に立面図を示す。地盤深さは9mであり、最下層1mは非液状化砂層、その上部8mが液状化砂層である。Table 1は解析に用いた土質パラメータである。液状化砂層の液状化強度 $R_{l20}$ は0.15程度である。Fig. 2に解析に用いた格子状改良の3種のパターンを示す。Fig. 1中央部のメッシュの細かい部分にFig. 2のように改良体要素を組み入れ、線形弾性体で改良体(厚さ0.8m)をモデル化(Lameの定数、 $\lambda=1.9 \times 10^6$  kPa、 $\mu=2.11 \times 10^5$  kPa、透水係数 $k=9.8 \times 10^{-9}$  m/s)して解析を行った。解析は別途、深い地盤モデル(液状化層厚 $H=16$  m、非液状化層厚1m)でも行っており、Fig. 2の改良パターンを組み合わせ、Table 2に示す8つの解析ケースを設定した。液状化解析にあたり、地盤底部の節点は全方向拘束し、前面(および裏側の面)では奥行方向のみを拘束し、解析領域の対称性から奥行方向に格子状改良体が無限に並んだ断面を想定している。また、地盤表面のみ排水境界

とし、それ以外では非排水境界としている。Fig. 3に解析に用いた入力地震動を示す。

### 3 解析結果

#### 3.1 過剰間隙水圧と平均有効応力の推移

Fig. 4は未改良地盤および解析ケースAとCで得られた格子内液状化砂層での各地盤深度における応答加速度である。未改良地盤では、载荷後に地震動が増幅した後に急激に減衰する典型的な液状化地盤の加速度応答を示している。しかし、改良地盤では応答加速度は増幅も減衰もせず、地盤全体が剛体的に挙動していることがわかる。Fig. 5は過剰間隙水圧の時刻歴である。改良により過剰間隙水圧の発生が抑制されている。特に解析ケースCの下層で過剰間隙水圧の発生が少ないのは、厚い改良壁による強い拘束により、最下層の非液状化層に発生する負圧の影響を

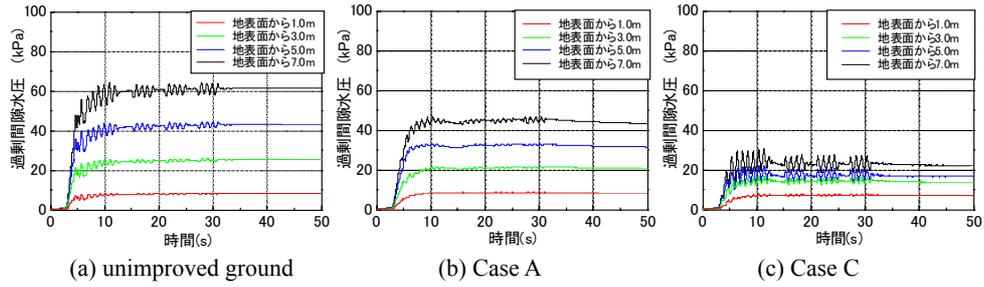


Fig. 5. Time history of excess pore water pressure

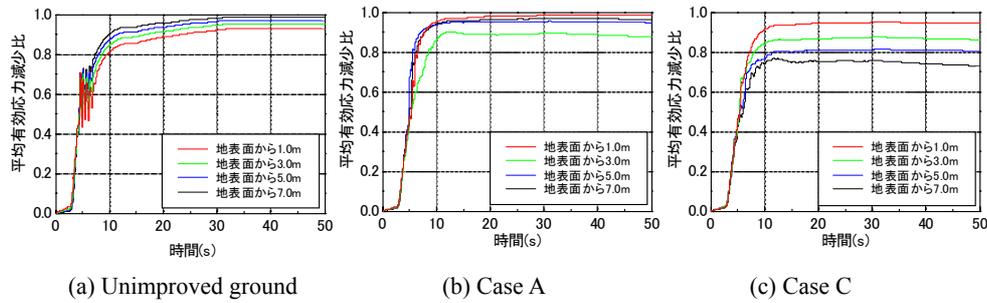


Fig. 6. Time history of mean effective stress decrease ratio

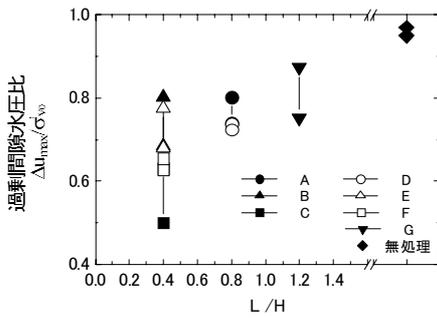


Fig. 7. Excess pore water pressure ratio – L/H Relationship

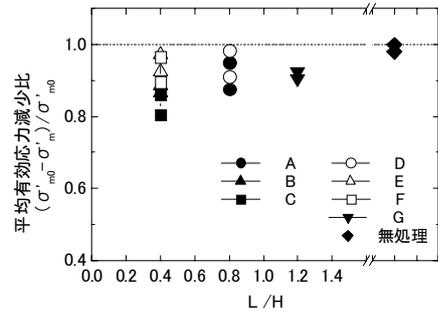


Fig. 8. Mean effective stress decrease ratio – L/H Relationship

受けているためである。Fig. 6 は同様に平均有効応力減少比の時刻歴である。平均有効応力減少比とは、初期有効応力から現在の平均有効応力までの減少量を初期有効応力で無次元化した指標であり、1 に近づくほど有効応力はゼロに近く液状化していることを示す。改良により 1 に近づく割合は若干抑えられることがわかるが、過剰間隙水圧で見ると改良効果は顕著に表れていない。Fig. 7 および 8 はそれぞれ、全解析ケースにおける過剰間隙水圧比および平均有効応力減少比と L/H との関係である。最下層の影響を除くため浅いモデルでは深度 3m と 5m、深いモデルでは深度 5m と 9m の解析結果を用いて 2 点を結んで整理した。結果に幅があるものの L/H が 0.8 以下においては過剰間隙水圧比の上限は概ね 0.8 以下で一定となっており、模型実験による既往の研究結果<sup>2)</sup>の傾向と一致している。しかしながら、液状化度を示す平均有効応力減少比では L/H が小さくても有効応力の減少量は大きい場合もあり、格子内の砂地盤が液状化に近い状態にあることがわかる。

### 3.2 改良地盤内部の有効応力状態について

Fig. 9 は解析ケース A における加震 10 秒後の水平方向

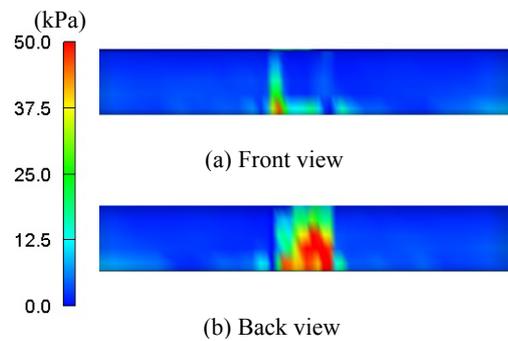


Fig. 9. Distributions of horizontal effective stress (after 10 sec.)

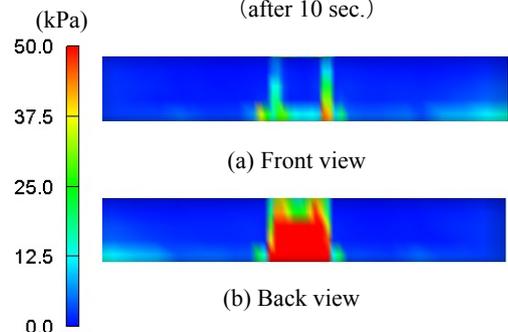


Fig. 10. Distributions of  $\sqrt{2J_2}$  (after 10 sec.)

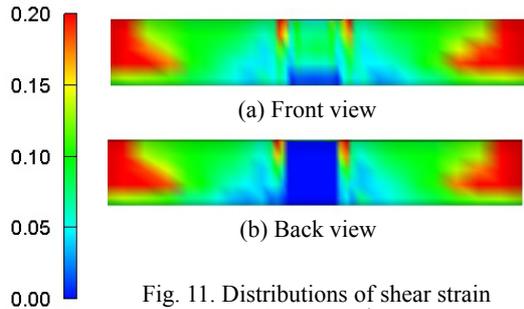


Fig. 11. Distributions of shear strain (after 40 sec.)

の有効応力分布である。Fig. 9(a)はFig. 2(a)に表したパターン I の改良地盤を手前側の面から見た有効応力の分布図であり、Fig. 9(b)は裏側の面から見た分布図である。したがって、Fig. 9(a)では改良体は 2 本の細い柱のように見えるが、(b)では(a)の柱間も改良体であるため全体が 1 本の太い帯に見える。Fig. 9(a)に示すように、加震による水平方向の力はほとんど改良壁が受け止めており、改良体内の砂地盤の有効応力は底面部付近を除き、改良体の外側の砂地盤と同様にほとんどゼロ近くになっている。加震 10 秒後はFig. 3の入力地震動に示すように主要動が加わる最終段階であり、(a)の場合には左側の改良壁が地震荷重を主に支えている段階である。また、Fig. 9(b)を見ると加震方向に平行に打設された改良壁に水平方向の力が大きく加わっていることがわかり、この方向の改良壁の重要性を示唆している。Fig. 10 は偏差応力の第 2 不偏量  $\sqrt{2J_2}$  について Fig. 9 と同様に加震 10 秒後の分布を手前側と裏側を示したものである。 $\sqrt{2J_2}$  はせん断応力に対応するものであり、一軸条件では概ね 1.2 倍したものが一軸圧縮強度と等しくなる。図より、特に加震方向に平行に打設された改良壁の  $\sqrt{2J_2}$  はほとんど 50kPa 以上に達しており、詳細にデータを調べると局所的には 150kPa に達している部分もあった。しかし、改良壁の設計一軸強度は概ね 1Mpa 程度であり、加震時に改良壁がせん断破壊する可能性は低いと考えられる。Fig. 11 は加震 40 秒後のせん断ひずみの分布を示したものである。格子壁間の砂地盤は格子壁外の砂地盤と同程度か若干小さめのせん断ひずみが発生している。一方 Fig. 11(b)の裏側に示す改良壁は全くせん断ひずみが発生しておらず、加震中に変形が発生していないことがわかる。Fig. 4 で格子壁内の砂は、その加速度応答から壁に囲まれて加震中は剛体的に挙動することを示したが、微視的には塑性変形が発生しておりせん断ひずみが蓄積されていることがわかる。

Fig. 12 は解析ケース A ( $L/H=0.8$ ) と C ( $L/H=0.4$ ) において、格子壁内の中央部、深度 5m の位置での砂地盤で観察された正規化した有効応力径路図である。初期状態は  $K_0=0.5$  の異方応力状態である。主要動の加震時には Fig. 9 に示したように、改良壁がその力を受け止めてしまうために、内部の砂には極端に大きなせん断応力は伝わらないが、繰返しせん断応力が加わるのに伴い、平均有効応力、せん断応力ともに減少し、最終的には若干せん断応力を残したまま、有効応力レベルの小さい破壊線上で停留する。解析ケース C の場合、最終的に有効応力状態が破壊線上で停

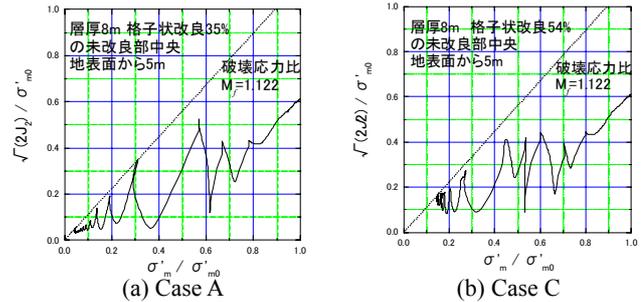


Fig. 12. Effective stress path during the shake

留するのは解析ケース A と同じであるが、その有効応力レベルはわずかに大きくなっている。図示していないが、無処理地盤の場合には主要動が加わると同時に大きなせん断応力が加わり、砂のせん断応力は急激に減少し等方応力状態に近い状態で液状化に至る。Fig. 5 において格子状改良により過剰間隙水圧が無処理地盤に比べて減少することを示したが、Fig. 12 に示すように、加震中もせん断応力が若干残っているために過剰間隙水圧の発生量が少なくなったと考えられる。しかしながら、平均有効応力は液状化に近いレベルまで大きく減少している。

#### 4 まとめ

格子内の砂地盤は、格子改良体の挙動に依存して剛体的に動くために過剰間隙水圧の発生量は抑えられるが、実状は液状化に近い状態にある。また、その度合いは過剰間隙水圧比で見ると  $L/H$  の影響は小さく、 $L/H$  が小さくても液状化に近い状態にあると考えられる。格子状改良の効果を格子壁内砂の見かけ上の液状化抑止で判断せず、実質的に本来期待すべき地盤全体の変位抑制等で考えるならば、 $L/H < 0.8$  にこだわる必要は無いかもしれない。

また、格子状改良壁やその内外の砂の有効応力状態を詳細に検討した結果、加震方向に平行に打設した改良壁に地震荷重は集中し、改良壁内の砂地盤を保護することが確認できた。別途、加震方向に平行な改良壁が無い場合の解析も行ったが、その場合には改良効果が見られず、過剰間隙水圧、平均有効応力の時刻歴等は無処理地盤と同じ結果となり、加震に平行方向の改良壁の重要性が確認されている。しかし、前述のように改良壁で囲まれた砂自体は液状化に近い状態に達しており、 $L/H$  が小さければ未改良砂部分の液状化防止効果が必ずしも高まるとは言い切れず、注意が必要である。また、加震中に集中するせん断力により改良壁が破壊する可能性は低いことも確かめられた。

#### 参考文献

- 1) Taguchi, Tateishi, Oka and Yashima: Three-dimensional liquefaction analysis method and array record simulation in Great Hanshin earthquake, Proc.11th World Conf. on Earthquake Engg., Acapulco, Paper No.1042, 1997.
- 2) 鈴木, 奥村, 馬場崎, 入江, 並河, 阿久根: 格子状改良地盤の液状化抑制効果に関する遠心模型振動実験, 第 33 回地盤工学研究発表会, 1, 845-846, 1998.