

レベル2地震動を入力した密な砂の 地震応答ハイブリッドオンライン実験

東北大学大学院工学研究科 仙頭紀明 石丸真 浅野隆司 風間基樹

1. はじめに

レベル2地震動を想定した耐震設計において地盤の液状化判定を行うと、比較的密な砂においてもしばしば液状化すると判定される場合がある。密な砂の液状化特性に関しては比較的高い応力比における液状化試験の他に、不規則波に対する液状化抵抗や振動型・衝撃型¹⁾などの地震動のタイプが液状化に及ぼす影響について研究がなされてきた^{2),3),4),5)}。一方、近年の耐震設計では、各サイトにおいて工学基盤で定めたレベル2地震動を直接工学基盤に入力し、その際に生じる表層地盤の増幅応答特性をもとに基礎構造物や地下構造物を設計するようになってきた。これに対し、これまでの不規則波に関する液状化実験では、地表面で得られた加速度記録の時刻歴をせん断応力時刻歴とみなし、砂供試体に与えるものがほとんどであったが、本来は、レベル2地震動を直接工学基盤に入力し、増幅応答過程において生じる液状化現象について研究する必要がある。

そこで、本論文では、レベル2地震動作用時における密な砂の変形挙動を明らかにするため、不規則波を作用させた室内要素実験を行った。その際、不規則繰返しせん断載荷の方法としては、従来用いられる加速度時刻歴をせん断応力とみだてた応力制御試験に代わって、工学基盤に直接レベル2地震動を入力可能なハイブリッドオンライン実験を行うこととした。実験では、1要素試験（中空ねじり試験）、9数値モデル（双曲線モデル）からなる10層の仮想地盤を想定し、基盤位置には直下型地震、海洋型地震を想定した2つのタイプの地震波について加速度振幅を変化させて入力した。その結果得られる密な砂の変形強度特性や液状化後の再圧密特性、および、従来の実験手法との違いについて考察を行った。

2. 試験方法

(a) 実験条件

実験は中空ねじりせん断試験機を用いて行った。供試体の寸法は外径10cm、内径6cm、高さ10cmである。実験に用いる砂試料は豊浦砂とした。供試体は空中落下法により目標相対密度90%として作成した。供試体を有効拘束圧20kPaで予備圧密した後、CO₂および脱気水を流し、さらに背圧（100kPa）を載荷して飽和させ後、有効拘束圧100kPaにて等方圧密した。圧密終了時の相対密度は86~89%の範囲にあった。繰返しせん断履歴は後述する不規則波を非排水条件にて作用させた。繰返しせん断が終了したら、発生した過剰間隙水圧を消散させて再圧密させる。再圧密過程は文献6に示した間隙水流量制御装置と同じ構造で最大制御量が約60cm³のタイプを用いて実験を行った。再圧密中は等方状態を保ちながら、体積ひずみ速度を一定(0.05%/min)で排水させた。

(b) 繰返しせん断履歴

非排水繰返しせん断履歴の与え方について述べる。従来の研究^{1)~5)}では、地表で観測された加速度時刻歴をせん断応力とみだて、供試体にせん断応力を制御して履歴を与える方法が行われてきた。しかしながら、地表面で得られた加速度は、例えばポートアイランドアレー観測記録を例にとっても、表層地盤の埋土層や沖積粘土層が強震動により大きく非線形化し、その影響を受けて長周期化した波形となっている。本来ならば、(工学)基盤で規定した地震波を基盤より入力し、その増幅の過程において地盤内でおこる非線形化過程の挙動に着目する方が望ましいと考えられる。なお、地表面加速度時刻歴をせん断応力とみだてた試験の問題点に関しては文献7に詳しい記述があるので参照されたい。従って、ここでは密な砂への不規則地震履歴の与え方として、一般に広く用いられている逐次地震応答解析手法に基づいて、復元力を室内要素実験および構成モデルの両者から得るハイブリッドオンライン実験手法を採用することとした。ハイブリッドオンライン実験手法の詳細に関しては文献8,9を参照されたい。

(c) 想定地盤モデル

図-1に想定地盤モデルを示す。モデルは弾性基盤上の10層の水平成層地盤を想定した。地盤は地表面より深度20mまでとし、各層厚は2mとした。中空ねじりせん断試験より復元力を参照する要素試験層は8層目とした。要素試験層では運動方程式を逐次解いて得られるせん断ひずみ増分を制御して砂試料に与え、応答値として復元力（せん断応力）を計測する。地盤の K_0 値を0.5と仮定した場合、8層目中心位置の平均有効応力は100kPaとなるため、上述した有効拘束圧100kPaと対応している。本来ならば、 K_0 圧密をして、平面ひずみ状態をたもった状態で繰返しせん断を与える方が望ましいが、 K_0 の違いによらず、平均有効応力が等しければ液状化強度は等しい¹⁾ことから、ここでは等方圧密状態にて繰返しせん断を行った。要素試験以外の層は図中に示すパラメーターを設定した双曲線モデルとした。なお、設定した

キーワード：液状化，オンライン実験，地震応答解析

連絡先：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL:022-217-7438

パラメーターは双曲線モデル層にて顕著な非線形化が発生しないように規準ひずみを0.1%と設定した。

(d)実験ケース

基盤に入力する地震波の時刻歴を図-2に示す。入力地震波は建設省告示(第1461号)に基づき、下記に示す観測地震波の位相特性を与え作成された人工地震波である。一方、両波の振幅特性は、図-3の速度応答スペクトル(減衰5%)結果にあるように、スペクトル強度がほぼ等しくなるように与えた。人工地震波を用いた理由は、入力地震波の強さをスペクトル強度で統一するためである。実験ケースを表-1に示す。地震動のタイプとしては、直下型地震波としては神戸ポートアイランドアレー記録GL-83.4mのEW成分波の位相で継続時間60秒(ケースPI)、海洋型地震波としては八戸波NS成分の位相、継続時間120秒(ケースHA)である。これらの入力波は建築分野においては、高層建築物や免震建築物のレベル2地震時の設計において実際に使用されることがある地震波である。上記2つの地震波を原波として加速度振幅を調整した6ケースの実験を行った。振幅調整の倍率は原波に対して0.5、0.75、1.0倍として、これらの地震動レベルを仮に、L1、L1.5、L2と定義した。ここでL1はレベル1地震動、L2はレベル2地震動、L1.5はその中間の強さの地震動と考えた。なお比較のため通常の応力制御非排水繰返し試験についても実験を実施した。実験では繰返し応力比0.4(SR04)および0.5(SR05)の三角波を与えた。

ハイブリッドオンライン実験では、時間積分は中央差分法(第1ステップのみ線形加速度法)⁸⁾とし、積分時間間隔は0.005秒とした。レーリー減衰は剛性比例型とし、1次モードで減衰定数 $h=0.01$ を設定した。実験の制御を精度良く行うために実験の時間スケールは地震の実時間スケールの約30倍にて実験を行った。装置の駆動制御(せん断ひずみ増分の載荷、体積ひずみ速度制御)および応答値の計測、時間積分は1台のパーソナルコンピューターを用いて行った。

3. 実験結果と考察

(a)要素実験層の応答結果

図-4に応力ひずみ関係および有効応力経路を示す。有効応力に着目するとL1のケースを除いて有効応力がゼロに達している。有効応力がゼロに達しているL1.5、L2、SRのケースでは、初期液化以降は、密な砂でも剛性がほとんどゼロに近い領域が存在し、その領域を越えると応力点は変相線(変相角約26度)を越えて、破壊線上(内部摩擦角約38度)を上昇し、剛性が大きく回復する、いわゆる、Cyclic Mobility現象が顕著に見られる。また、L2のケースでは初期液化に至るまでに、1%を超えるせん断ひずみが発生し、初期有効上載圧よりも大きな有効応力状態となり、結果として、大きなせん断応力(約80kPa:せん断応力比0.8)が発生した。

図-5にはL2のケースにおけるせん断応力、せん断ひずみ、過剰間隙水圧の時刻歴を示す。せん断応力の時刻歴は地表面の加速度とほぼ同様の傾向を示したため、ここではせん断応力時刻歴を加速度時刻歴とみなせば、20秒を過ぎて過剰間隙水圧がほぼ1に達してからは、長周期化しながらもスパイク状の応答が頻繁に発生している。この傾向は、釧路沖地震¹⁰⁾や兵庫県南部地震¹¹⁾で観測された加速度記録に見られたCyclic Mobilityに起因したスパイク状の応答と対応しているものと考えられる。また、このスパイク状の応答が発生した時には、過剰間隙水圧が減少し、有効応力が回復していることもわかる。このようなCyclic mobilityに起因する応答は、従来の地表面加速度をせん断応力とみただけの不規則波の実験では、スパイク状の応答を示した加速度時刻歴を入力しない限り、生じない。図-6には、入力レベルと最大せん断ひずみの関係を示す。入力した地震波は応答スペクトルでみればほぼ同程度であるが、発生する最大せん断ひずみは八戸波位相をもつ継続時間の長い海洋型地震のほうが大きい値を示した。限られた地震波入力の結果ではあるが、地震動の入力レベルが等しくにもかかわらず、発生する最大せん断ひずみに差異が生じたことは、地震動継続時間の違いが影響しているものと考えられる。また、どちらの地震波においても入力レベルL1.5で有効応力ゼロを経験しており、今回の設定地盤条件のように、基盤と対象砂層の間に大きく非線形化し、地震エネルギーを吸収する層⁹⁾が存在しない場合は、密な砂においてもレベル2よりも小さい地震動レベルでも有効応力がゼロになることがわかった。

図-7には最大せん断ひずみと最大せん断応力比の関係を示す。比較のため、中空ねじり試験を用いた豊浦砂90%の不規則地震波実験結果⁵⁾も図中に示した。図より振動型(海洋型)地震の比較では、本論文と既往の研究では、ほぼ似た傾向を示したが、衝撃型(直下型)地震では、異なる傾向となった。この違いが生じた理由には、せん断応力制御による既往の実験とハイブリッドオンライン実験という手法の違いもあるが、最も大きな違いは入力地震波の特性によるものと考えられる。既往の研究では神戸ポートアイランドアレー観測記録の地表面における加速度を入力しているのに対し、本研究では同じポートアイランドでもGL-83.4mにおける記録の位相を持つ人工地震波を入力したため、比較的周期の短い波も含み、繰返し回数が多かったため、振動型に近い応答を示したものと考えられる。また、図-5の時刻歴を見ても最大せん断応力発生時点は、有効応力減少過程の過剰間隙水圧比が0.5付近で発生していることから、さらに過剰間隙水圧比が小さい時点で、大きなせん断ひずみ増分が作用し、それ以降の継続時間が短い波であれば、図中における既往の研究結果にある衝撃型の傾向と近くなるものと思われる。なお、SR04、SR05のケースから求めた図-8の液化化強度と図-7の関係をもとに地震動の不規則性に関する補正係数($1/C_2$)を求めれば、片振幅せん断ひずみ3.5%で直下型(PI)のケースでは0.5、海洋型(HA)のケースでは0.58となり、文献5や累積損傷理論に基づいて補正係数を求めた既往の研究¹²⁾にあるような衝撃型と振動型の差があまり見られなかった。これらの傾向は入力波の選定によって大きく変化する

ることが推測されるため、今後、繰返し回数の少ない地震波についても検討を行う必要があると思われる。

(b)再圧密特性

ハイブリッドオンライン実験後の再圧密過程における体積ひずみ-有効応力関係を図-9に示す。有効応力がゼロに達しなかったL1以外のケースにおいては、有効応力がゼロに近い領域で体積ひずみの多くが集中して発生し、有効応力が回復した領域では体積ひずみ-有効応力関係はケースによる差はなく各曲線はほぼ平行となっている。これらの傾向は緩い砂の実験結果¹³⁾とほぼ対応しているものの、有効応力が小さい領域における体積ひずみの発生傾向が異なり、密な砂は緩い砂に比べて大幅に小さい結果となった。図-10には再圧密過程に生じた体積ひずみと震動中に生じた最大せん断ひずみ γ_{max} の関係を示す。図中には比較のために既往の研究における clean sand の結果¹⁴⁾も示した。今回の実験結果は既往の研究結果と比べて若干小さい最大せん断ひずみで大きな体積ひずみが発達したが、体積ひずみの上限値は1.4%程度と既往の研究結果とほぼ整合している。また、地震波の違いを見ると継続時間が長い八戸波位相のケースの方では入力レベルがほぼ等しいにも拘らず体積ひずみが大きめに発生することがわかった。つまり、体積ひずみの大小は有効応力がゼロに達してからさらにどれだけ繰返しせん断履歴を受けるかにより決定されるものと考えられる。この考えを基本として有効応力解析モデル¹⁵⁾で内部変数として用いられることが多い累加せん断ひずみ γ_{acc} (せん断ひずみ増分(厳密には解析モデル¹⁵⁾では偏差塑性せん断ひずみ増分)の絶対値の積分値)と体積ひずみの関係を図-11に示す。体積ひずみは累加せん断ひずみの増加とともに増加していくものの、累加せん断ひずみがおおよそ1~2を越えたあたりからは頭打ちとなり、ある有限の値に収束していることがみてとれる。図-10、図-11より液状化後の再圧密過程において発生する体積ひずみは、震動中の最大せん断ひずみのみならず累加せん断ひずみとよい相関が見られた。最大せん断ひずみと体積ひずみの関係はすでに文献14に相対密度ごとにまとめてられているが、地震動の継続時間の影響や、最大応答せん断ひずみの解析的な予測の精度を考えた場合、累加せん断ひずみに関しても同様の関係をまとめておくことは、有効応力解析などの詳細解析と組み合わせれば、地震中および地震後の再圧密過程の変形予測が可能となり、有用であると思われる。

4. まとめ

従来の不規則地震波入力の要素実験と異なるハイブリッドオンライン実験手法により密な砂に直下型、海洋型のレベル2地震動を入力し、液状化時の挙動について以下のことがわかった。

- 1)強震動により密な砂は、初期液状化に至る前に1%を越えるせん断変形が発生し、それに伴いダイレタンスーにより初期平均有効応力よりも大きな平均有効応力となり、その結果、最大せん断応力比が0.8程度の応答を示した。
- 2)密な砂の強震記録に見られるようなCyclic mobilityに起因するスパイク状のせん断応力応答が確認できた。
- 3)今回入力した直下型、海洋型地震波は、最大せん断ひずみ-最大せん断応力比関係に関しては、既往の研究結果の振動型に近い特性を示した。
- 4)震動後の再圧密過程に発生する体積ひずみは、震動中の最大せん断ひずみのみならず、累加せん断ひずみとも良い相関が認められた。

今回用いたハイブリッドオンライン実験は、工学基盤で規定された地震波による表層地盤の増幅過程や有効応力減少過程の挙動が追跡できることから、今後は、異なるタイプの入力地震波や入力レベルについても検討を行う予定である。さらに、密な砂のパラメーターを設定した有効応力解析結果とハイブリッドオンライン実験結果を比較・検討することで、有効応力解析の精度向上にも寄与できるものとする。

謝辞 本研究の入力地震波の選定にあたっては、株式会社東京ソイルリサーチ 福元俊一氏に御助言をいただきました。記して、感謝いたします。

参考文献

- 1)石原研而, 安田 進: 液状化に及ぼす地震波の不規則性と初期拘束圧の影響, 土と基礎, Vol. 23, No. 6, pp. 29-35, 1975.
- 2)Ishihara K. and Yasuda S.: Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, Soils and Foundations, Vol.15, No.1, pp.45-59, 1975.
- 3)前田幸男, 龍岡文夫, 山田真一, 藤井信二: 飽和砂の不規則荷重に対する液状化強度, 第18回土質工学研究発表会, pp.549-552, 1983.
- 4)国生剛治, 嶋田光明, 加藤 進: 密な砂の非排水繰返しせん断特性, 第16回土質工学研究発表会, pp.609-612, 1981.
- 5)時松孝次, 岸本道太, 若井修一: 密度および規準せん断ひずみが不規則荷重下の砂の液状化強度に与える影響, 第33回地盤工学研究発表会, pp.93-94, 1998.

- 6) 仙頭紀明, 松谷明洋, 風間基樹, 渦岡良介: 体積ひずみを制御した液状化した砂の再圧密試験, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.1993-1994, 2002.
- 7) 風間基樹, 李基豪, 山口晶, 赤堀一彦, 日野杉喬之, 福元俊一, 大きなせん断応力荷重を受ける飽和砂の繰返しせん断変形挙動, レベル 2 地震動に対する土構造物の耐震設計シンポジウム発表論文集, pp.361-366, 2000.
- 8) 日下部 伸, 森尾 敏, 有本勝二: オンライン地震応答実験による 2 層系砂地盤の液状化挙動, Soils and Foundations, Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.
- 9) 山口 晶, 風間基樹, 日下部 伸: 神戸人工島地盤のオンライン地震応答解析, 土木学会論文集, No.701, pp.181-195, 2002.
- 10) Iai S., Morita T. Miyata M. and Sakurai S.: Earthquake response of saturated sandy soil, First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp.599-604, 1995.
- 11) Kokusho T. and Igarashi S.: Summary of discussions in Session 3: Nonlinear and equivalent linear analysis, First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp.1457-1462, 1995.
- 12) 東 拓生, 田村敬一, 二宮嘉朗: 地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化判定法に関する研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会, III, pp.93-94, 1998.
- 13) 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹: 不規則地震履歴を受けた液状化砂の再圧密特性に関する一考察, 第 38 回地盤工学研究発表会, 2003 (投稿中).
- 14) Ishihara K. and Yoshimine M.: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp173-188, 1992.
- 15) 金谷 守, 西 好一, 当麻純一, 大波正行: 有効応力に基づく地盤の非線形手法の開発とその検証, 土木学会論文集, No.505/111, pp.49-58, 1994.

Layer	Thickness (m)	ρ (ton)	V_s (m/s)	γ_{ref} (%)	σ'_m (kPa)	Type
1	2	2	200	0.1	-	Hyperbolic
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9			240	0.1	-	Hyperbolic
10			400	-	-	Elastic

図-1 地盤モデル

表-1 実験ケース

Case	Phase	A_{max} (Gal)	Factor	Stress Ratio	D_{rc} (%)
PI-L1	Port Island	194.1	0.5	-	89
PI-L1.5	EW Comp.	291.2	0.75	-	86
PI-L2	GL-83.4m	388.3	1	-	88
HA-L1	Hachinohe NS Comp.	196.1	0.5	-	89
HA-L1.5		294.1	0.75	-	87
HA-L2		392.2	1	-	87
SR04	Triangle	-	-	0.4	89
SR05	Wave	-	-	0.5	87

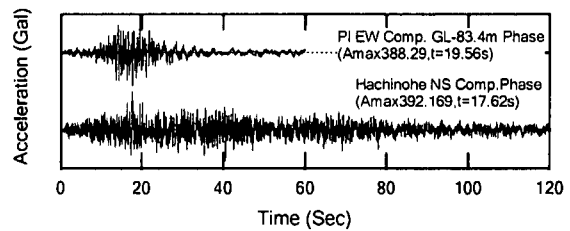


図-2 入力地震波

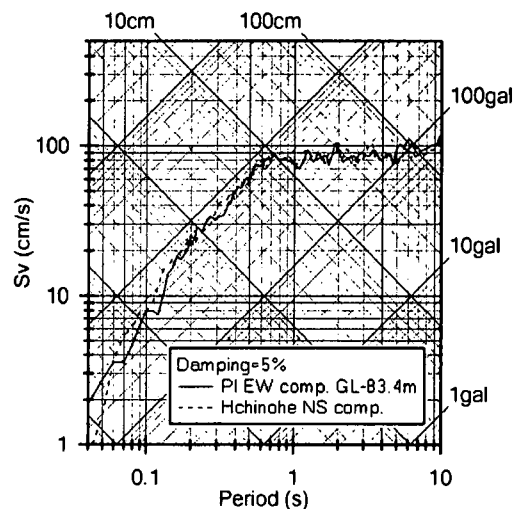


図-3 入力地震波の速度応答スペクトル

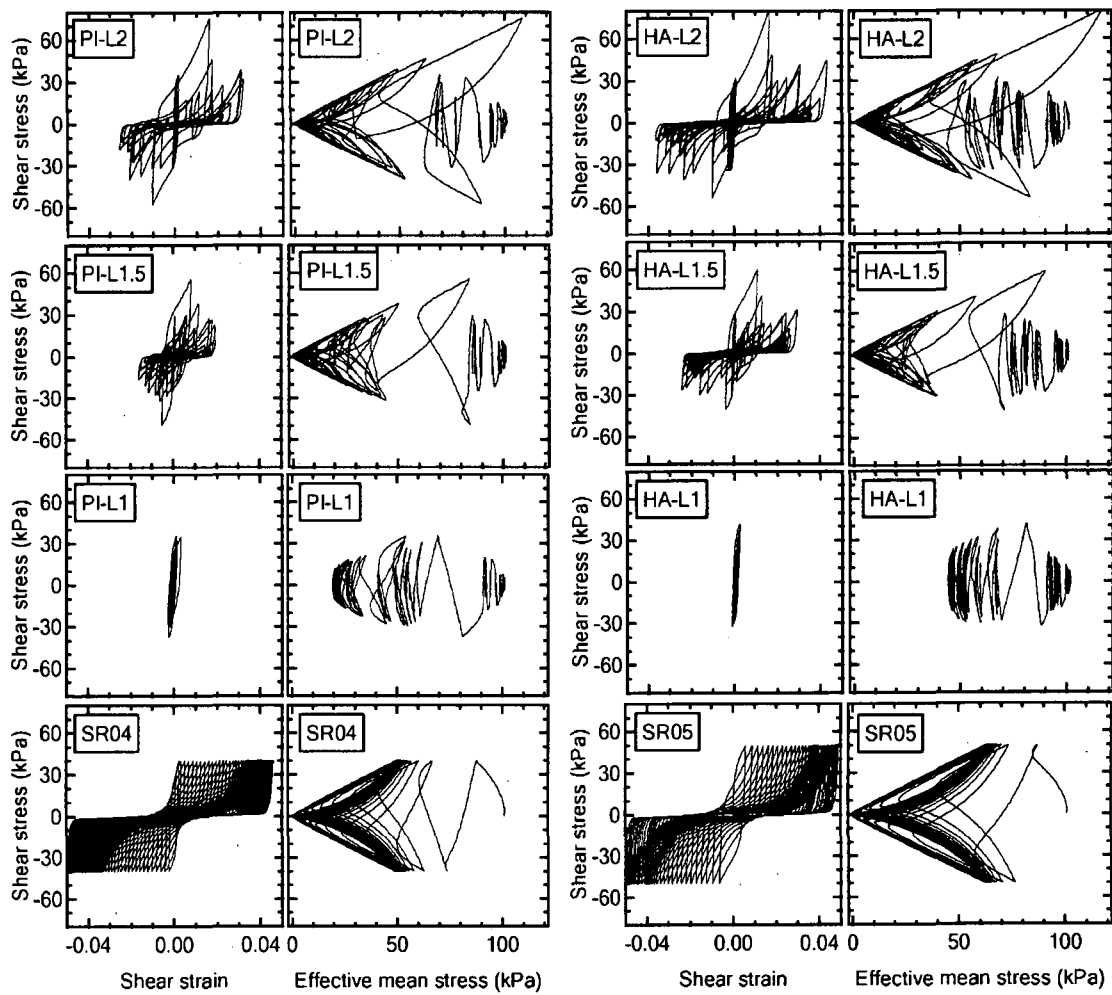


図-4 せん断応力—せん断ひずみ関係および有効応力経路

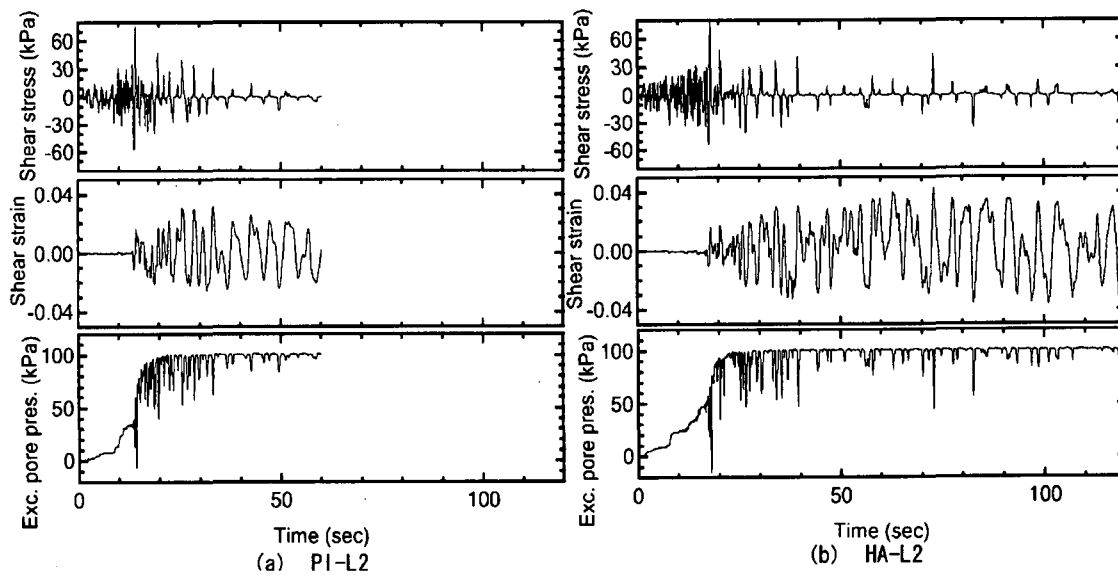


図-5 せん断応力、せん断ひずみおよび過剰間隙水圧の時刻歴

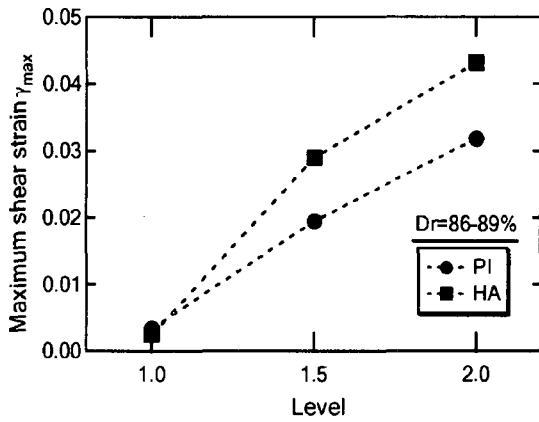


図-6 最大せん断ひずみと地震動レベルの関係

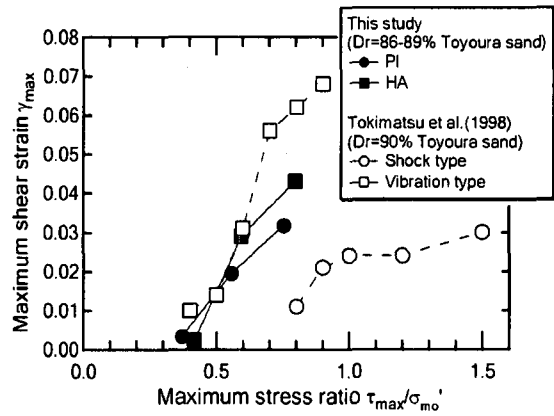


図-7 最大せん断ひずみと最大せん断応力比の関係

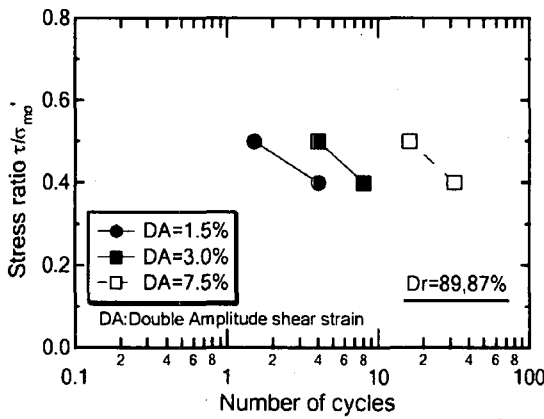


図-8 液状化強度曲線 (SR04, SR05)

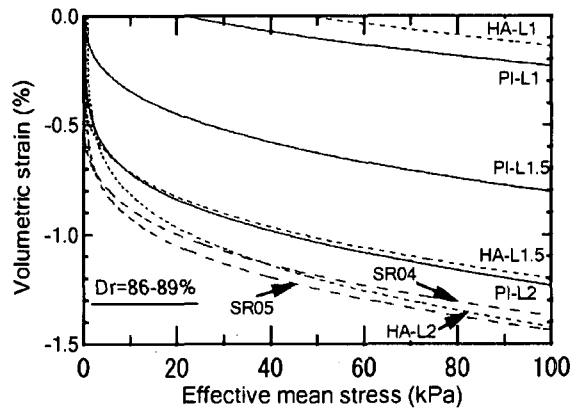


図-9 体積ひずみと平均有効応力との関係

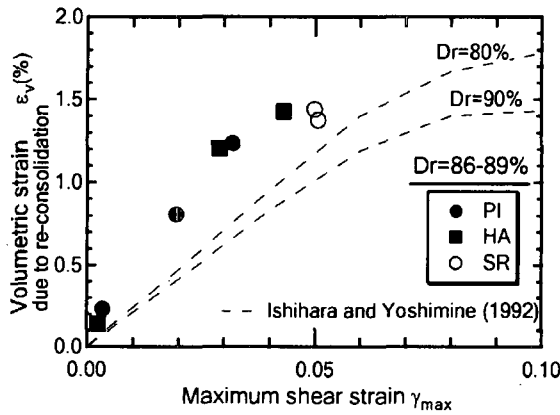


図-10 再圧密により生じた体積ひずみと最大せん断ひずみの関係

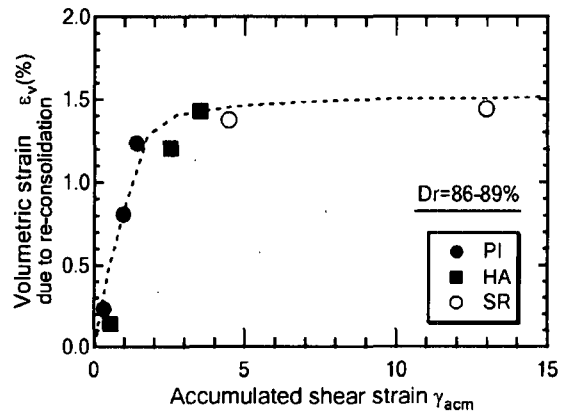


図-11 再圧密により生じた体積ひずみと累加せん断ひずみの関係