

# 間隙水の流入流出に着目した砂地盤の地震後流動メカニズムの解明

著者	風間 基樹
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/41387">http://hdl.handle.net/10097/41387</a>

間隙水の流入流出に着目した  
砂地盤の地震後流動メカニズムの解明

研究課題番号 (13450190)

平成13～15年度 科学研究費補助金 (基盤研究(B)(1))  
研究成果報告書

平成16年4月

研究代表者 風間 基樹  
(東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 教授)

平成 13 ～ 15 年度 科学研究費補助金 (基盤研究(B)(1))

研究成果報告書

1. 課題番号 : 13450190

2. 研究課題名 : 間隙水の流入流出に着目した砂地盤の地震後流動メカニズムの解明

3. 研究組織

研究代表者 風間 基樹 (東北大学大学院工学研究科)

研究分担者 飛田 善雄 (東北学院大学工学部)

中村 晋 (日本大学工学部)

北詰 昌樹 (独立行政法人 港湾空港技術研究所地盤構造部)

渦岡 良介 (東北大学大学院工学研究科)

仙頭 紀明 (東北大学大学院工学研究科)

田地 陽一 (株清水建設技術研究所)

4. 研究経費 (交付決定配分額)

平成 13 年度 5,200 千円

平成 14 年度 2,400 千円

平成 15 年度 1,100 千円

合計 8,700 千円

5. 関連研究発表

(1) 論文 (学会誌・国際会議投稿論文など)

アンダーラインの原稿は本文中に許可を頂いて転載した。

- 1) Mechanism and prediction of flow deformation due to seepage after earthquake, N. Sento, M. Kazama, K. Akahori and H. Ohmura, Lessons learned from recent strong earthquakes, 15<sup>th</sup> International Conf. on Soil Mechanics & Geotechnical Engrg., Earthquake Geotech. Engrg Satellite Conf., 369-374, Turkey, (2001).
- 2) 層マトリックス法による盛土・支持地盤系の 1 次元震動解析法, 応用力学論文集, Vol.5, 501-508, (2002), 中村晋, 風間基樹.
- 3) 高速ウェーブレット変換を用いた地盤の非定常地震応答解析, 土木学会論文集, No.722/III-61, 207-217, (2002), 風間基樹, 岡田直仁, 中村 晋.
- 4) 地震後の浸透破壊を考慮した新しい流動変形予測法, 土と基礎, Vol. 50, No.2, 13-15, (2002), 仙頭紀明, 大村洋史, 赤堀一彦, 風間基樹
- 5) 微動を用いた工学基盤の Vs の推定の可能性について, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, Paper No.76, CD-ROM, (2002), 福元俊一, 中村 晋, 風間基樹, 入江紀嘉
- 6) 過圧密履歴を受けた地盤の液状化抵抗, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, Paper No.137, CD-ROM, (2002), 風間基樹, 仙頭紀明, 森 友宏, 大村洋史, 福島英晃, 篠崎友利
- 7) 原位置試料を用いた埋立人工島のハイブリッド地震応答実験, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, Paper No.151, CD-ROM, (2002), 山口 晶, 仙頭紀明, 風間基樹, 飛田善雄
- 8) 非排水繰返しせん断履歴後の間隙水流入時せん断変形発達特性, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, Paper No.154, CD-ROM, (2002), 仙頭紀明, 山口晶, 君島芳友, 風間基樹, 渦岡良介

- 9) 液状化地盤中の杭の地盤反力評価に対する3次元有効応力解析の適用性, 第11回日本地震工学シンポジウム, Paper No.198, CD-ROM, (2002), 渦岡良介, 芝崎水無子, 風間基樹, 八嶋 厚, 張 鋒.
- 10) Numerical analysis on liquefaction-induced progressive deformation with a pore water migration, US-Japan seminar on seismic disaster mitigation in urban area by geotechnical engineering, CD-ROM, (2002), R. Uzuoka, M. Kazama and N. Sento
- 11) Geotechnical hybrid simulation of ground evaluated to be liquefiable by current conventional design method, US-Japan seminar on seismic disaster mitigation in urban area by geotechnical engineering, CD-ROM, (2002), N., Sento, M. Kazama, S. Fukumoto and K. Saito
- 12) 間隙水の流入量を制御した砂質土の浸透破壊実験, 地盤の浸透破壊のメカニズムと評価手法に関するシンポジウム発表論文集, 191-196, (2002), 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介, 大村洋史, 松谷明洋
- 13) 地盤耐震工学におけるオンライン実験手法の適用, 土と基礎, Vol. 51, No.2, 19-22, (2003), 風間基樹, 仙頭紀明, 山口 晶, 渦岡良介
- 14) Liquefaction and settlement of reclaimed ground with gravelly decomposed granite soil, Kazama, M., Sento, N., Ohmura, H., Toyota H., and Kitazume M., *Soils and Foundations*, Vol.43, No.3, 57-72, (2003).
- 15) 液状化過程における砂の体積弾性係数の拘束圧依存性, 地震工学論文集, 土木学会, No.27, 論文番号 256, CD-ROM, (2003), 権 永哲, 浅野隆司, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 16) Numerical analysis on liquefaction-induced progressive deformation with a pore water migration, Proc. of 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Lyon, 1095-1101, (2003), R. Uzuoka, N. Sento & M. Kazama.
- 17) Application of Hybrid-Online Testing Method to Geotechnical Engineering Problem. *Geoenvironmental Engineering*, No.3, 80-89, (2003), Kon Young Choul and M. Kazama
- 18) 側方地盤との動的相互作用を考慮した盛土-支持地盤系の1次元震動解析法, 応用力学論文集, Vol.6, 723-730, (2003), 中村晋, 風間基樹,
- 19) 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, レベル2地震動による液状化に関するシンポジウム, 2049-2050, (2003), 仙頭紀明, 石丸真, 浅野隆司, 風間基樹
- 20) Liquefaction-induced volumetric change of soil subjected to cyclic strain histories, Sento N., Kazama M., Uzuoka, R., Matsuya A. and Ishimaru M., *Cyclic behaviour of soil and liquefaction phenomena*, Edited by Th. Triantafyllidis, Balkema, 199-206, (2004).
- 21) Geotechnical hybrid simulation for predicting earthquake deformation both during and after, Kazama M., Sento N., Uzuoka, R., Kwon Y.C. and Sakamoto K., *Cyclic behaviour of soil and liquefaction phenomena*, Edited by Th. Triantafyllidis, Balkema, 479-488, (2004).
- 22) Possibility of post-liquefaction flow failure due to seepage, *J. of Geotechnical and Geo-environmental engineering*, Sento N., Kazama M., Uzuoka R., Ohmura H. and Ishimaru M., ASCE, Vol.130, No.7, (2004.7).
- 23) 非排水繰り返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化, 土木学会論文集III部門掲載予定, (2004.6), 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介
- 24) Seepage shear failure of a sandy soils by pore water injection test, International workshop on the geotechnical hazard in the area of collapsible soils, Beijing, (2004.7), Kazama, M., Uzuoka, R., Sento, N. and Unno, T.
- 25) Proposal of One-dimensional Response Analysis Method of Embankment and Support Ground System Considering Dynamic Interaction with the Side Ground, 13th WCEE, (2004.8), S.Nakamura, M.Kazama
- 26) Geotechnical Hybrid Simulation of Liquefiable Inclined Ground Considering Pore Water Migration, 13th WCEE, (2004.8), M.Kazama, N. Sento, Y.C. Kwon and A. Yamaguchi.

## (2) 口頭発表

- 1) 有効応力解析に基づく飽和砂の繰り返しせん断挙動のエネルギー的考察, 第36回地盤工学研究発表会, (2001), 527-528, 佐藤賢一, 仙頭紀明, 風間基樹
- 2) 過圧密・除荷・圧密履歴を受けた砂質土の液状化抵抗, 第36回地盤工学研究発表会, (2001), 2205-2206, 森友宏, 風間基樹, 北詰昌樹, 福島英晃, 峯敏雄
- 3) ウェーブレット変換を用いた地盤の非定常地震応答解析, 第36回地盤工学研究発表会, (2001), 2359-2360, 岡田直仁, 風間基樹, 中村 晋
- 4) 地震後の浸透破壊による流動変形メカニズム, 第36回地盤工学研究発表会, (2001), 2415-2416, 風間基樹, 仙頭紀明, 赤堀一彦, 大村洋史
- 5) 地震後の浸透破壊による流動変形予測法, 第36回地盤工学研究発表会, (2001), 2417-2418, 赤堀一彦, 大村洋史, 風間基樹, 仙頭紀明
- 6) オンライン実験による沖積粘土層のせん断強度・変形特性が埋立層の液状化に与えた影響, 第36回地盤工学研究発表会, (2001), 2255-2256, 山口 晶, 風間基樹, 君島芳友
- 7) 間隙水圧入試験によるまさ土の流動特性, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, III -A140, (2001), CD-ROM, 大村洋史, 風間基樹, 仙頭紀明
- 8) オンライン実験を用いた埋立人工島の地震時挙動の検討, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, III -A100, (2001), CD-ROM, 山口 晶, 風間基樹, 君島芳友
- 9) ウェーブレット変換を用いた地盤の非定常地震応答解析, 第1回日本地震工学研究学術講演会, (2001), p.35, 風間基樹, 岡田直仁, 中村 晋
- 10) 地震後の沈下に関する一考察, 第1回日本地震工学研究学術講演会, (2001), p.49, 仙頭紀明, 大村洋史, 風間基樹
- 11) 凍結サンプリング試料を用いた洪積砂地盤の液状化強度特性(その2, 有効応力解析とオンライン実験結果を用いた地震応答特性の比較), 日本建築学会大会学術講演会概要集, (2002), 423-424, 福元俊一, 斉藤賢二, 牛垣和正, 風間基樹, 仙頭紀明, 山田悦子
- 12) 流動地盤中の単杭の非線形挙動解析有効応力解析, 第57回土木学会年次学術講演会 (2002), CD-ROM, 石丸 真, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 13) 間隙水の移動を制御した流動破壊実験手法の開発, 第37回地盤工学研究発表会 (2002), 369 -370, 君島芳友, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹, 山口 晶
- 14) 間隙水の浸透に伴う液状化地盤の変形に関する数値解析, 第37回地盤工学研究発表会 (2002), 371-372, 渦岡良介, 風間基樹, 仙頭紀明
- 15) DEMによる細粒分の混じった砂ときれいな砂の巨視的, 微視的挙動の検討, 第37回地盤工学研究発表会 (2002), 491-492, 星 悠紀, 森本大志, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 16) 過圧密履歴を受けた粒状集合体の非排水せん断抵抗に関する解析的研究, 第37回地盤工学研究発表会 (2002), 535-536, 森本大志, 星 悠紀, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 17) 液状化後の消散過程における透水係数について, 第37回地盤工学研究発表会 (2002), 1225-1226, 大村洋史, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 18) 沖積粘土層のせん断強度と埋立柱材が埋立人工島の液状化被害に与えた影響, 第37回地盤工学研究発表会 (2002), 1969-1970, 山口 晶, 新田秀雄, 飛田善雄, 仁藤浩司, 仙頭紀明, 風間基樹
- 19) 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 (2002), 1993-1994, 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介, 松谷明洋
- 20) 過圧密砂質飽和地盤の遠心振動実験, 第37回地盤工学研究発表会 (2002), 2049 - 2050, 風間基樹, 仙頭紀明, 大村洋史, 北詰昌樹, 福島英晃, 篠崎友利
- 21) 流線網の視覚的理解に役立つ実験教材の試作, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 28-28, 佐々木静男, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹

- 22) 1983年日本海中部地震における液状化被災地盤の地層抜き取り調査, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 85-86, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明, 佐々木静男
- 23) 液状化過程における砂のせん断および体積弾性係数の変化, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 457-458, 浅野隆司, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明
- 24) 地盤の繰返しせん断挙動に及ぼす透水性の影響に着目した二相系オンライン実験, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 459-460, 坂本克洋, 大村洋史, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 25) 土-水連成ハイブリッドオンライン実験システムの開発, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 577-578, 大村洋史, 坂本克洋, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 26) ハイブリッドオンライン圧密実験システムの開発に関する基礎的研究, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 949-95, 権 永哲, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明
- 27) 杭に作用する地盤反力の載荷速度依存性に関する有効応力解析, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 1953-1954, 芝崎水無子, 渦岡良介, 仙頭紀明, 風間基樹
- 28) 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), 2007-2008, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹
- 29) 初期せん断を有する地盤の振動中及び振動後に発生する地盤変形挙動, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 2009 - 2010, 山口 晶, 飛田善雄, 新田秀雄, 風間基樹
- 30) 地盤中の水圧変動モニタリングのための光干渉型差圧マイクロセンサーの試作と評価, 第38回地盤工学研究発表会 (2003), 2283 - 2284, 石丸 真, 風間基樹, 仙頭紀明, 新妻弘明, 浅沼宏, 橋本智
- 31) 地盤の地震動ハイブリッドのオンライン実験における実現象の再現性について, 日本地震工学会大会, 2003 梗概集, 396-397, (2003), 山口 晶, 飛田善雄, 風間基樹
- 32) 液状化地盤の非線形震動のための二相系オンライン実験手法の開発, 日本地震工学会大会, 2003 梗概集, 398-399, (2003), 風間基樹, 仙頭紀明, 渦岡良介
- 33) 2003年7月26日宮城県北部の地震における土木構造物の被害—河川堤防・橋梁—, 120-121, (2003), 風間基樹, 中村晋, 神山真
- 34) 宮城県北部地震による河川堤防の被害と振動性状, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, (社)地盤工学会, (2004), 中村晋
- 35) 2003年宮城県北部地震による河川堤防の震動性状, 第59回年次学術講演会講演概要集, (社)土木学会, (2004), 中村晋
- 36) 非排水繰返しせん断後の体積収縮特性に及ぼす初期せん断の影響, 第39回地盤工学研究発表会発表予定 (2004.7), 松谷明洋, 風間基樹, 仙頭紀明, 渦岡良介
- 37) 砂質土の浸透によるせん断破壊時のダイレイタンス特性のモデル化, 第39回地盤工学研究発表会発表予定 (2004.7), 石丸 真, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹

# 目次

## 1. 研究の背景と目的

関連論文

- 1) 地震後の浸透破壊を考慮した新しい流動変形予測法, 土と基礎, Vol. 50, No.2, 13-15, (2002), 仙頭紀明, 大村洋史, 赤堀一彦, 風間基樹

## 2. 非排水繰返しせん断後の飽和砂の体積収縮特性

関連論文

- 1) 非排水繰返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化, 土木学会論文集Ⅲ部門掲載予定, (2004.6), 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介
- 2) 非排水繰返しせん断後の体積収縮特性に及ぼす初期せん断の影響, 第39回地盤工学研究発表会発表予定 (2004.7), 松谷明洋, 風間基樹, 仙頭紀明, 渦岡良介

## 3. 間隙水の流入を受ける砂のせん断ひずみの発達特性とそのモデル化

### 3.1 非排水非排水繰返しせん断履歴後に間隙水の流入を受ける土のせん断変形特性

山口 晶・飛田善雄

### 3.2 密度・拘束圧依存性を考慮した砂の構成モデルの開発と間隙水注入時の挙動への応用

飛田 善雄・山口 晶・藤井 伸晃・西村 修

関連論文

- 1) 間隙水の流入量を制御した砂質土の浸透破壊実験, 地盤の浸透破壊のメカニズムと評価手法に関するシンポジウム発表論文集, 191-196, (2002), 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介, 大村洋史, 松谷明洋
- 2) 砂質土の浸透によるせん断破壊時のダイレイタンスー特性のモデル化, 第39回地盤工学研究発表会発表予定 (2004.6), 石丸 真, 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹

## 4. 地震後の浸透による流動破壊変形量の予測手法とその適用

### 4.1 1964年新潟地震における昭和大橋の事例解析

関連論文

- 1) Numerical analysis on liquefaction-induced progressive deformation with a pore water migration, US-Japan seminar on seismic disaster mitigation in urban area by geotechnical engineering, CD-ROM, (2002), R. Uzuoka, M. Kazama and N. Sento

注) なお, ここに示した収録文献は, 本研究に関連して発表されたものを学会の許可を頂いて転載したものである. 転載を許可して頂いた地盤工学会および土木学会に感謝いたします.





## 1. 研究の背景と目的

今まで、砂地盤の液状化は土が非排水条件下で繰返しせん断を受けることによって生じる現象であると限定的に理解されてきた。また、液状化後に生じる流動変形も、砂が液状化して流体的に振舞うものとして理解されてきた。このため、今までの液状化・流動化に対する研究は、もっぱら繰返しせん断を受けた土の非排水繰返しせん断変形に多くの注意が払われてきた経緯がある。しかしながら、実際の被害事例を省みれば、振動が終わってから橋脚が徐々に変形したり、家が傾斜しだした例が報告されていることから、液状化による変形は振動中にのみ起こるものではないと解釈の方が自然と思われる。すなわち、液状化による流動変形は非排水状態における変形ではなく、むしろ振動時に繰返しせん断によって発生した過剰間隙水圧が消散していく過程において、地盤破壊が進行して生じていることを示唆するものである。

一般に、土の要素試験は、完全な排水条件（排水を許して過剰間隙水圧の発生を許さない）かあるいは非排水条件を持って行われるのが常であり、水圧や間隙水の流入流出をコントロールすることは通常行われない。と言うのは、現場の水圧変動や流入量の変化は、個々の土要素の透水性だけで決まるものではなく、周辺地盤との関係が決まらない限り決定できないものだからである。すなわち、その土要素に間隙水が流入するのか、それともその土要素から間隙水が流出するかは、周辺地盤との圧力差（動水勾配の正負）によって決まる。また、その量は透水係数と動水勾配によって決まる。したがって、このような視点での土要素の変形機構を検討するためには、振動を受ける表層地盤全体を境界値問題としてとらえる必要がある。

次に、飽和した砂地盤が強震動を受けて過剰間隙水圧が徐々に蓄積し、過剰間隙水圧が初期の有効上載荷重に等しくなった状態を考えてみる。すなわち、地盤が完全液状化した状態である。このとき、地盤中に発生した過剰間隙水圧分布は、初期有効上載圧の分布とほぼ等しくなるから、地中ほど大きい三角形分布に近くなる。仮にこの状態を初期状態とすれば、次の瞬間から地中の間隙水は上方に向かって流れることになる。大局的に見れば、深い層からは水が搾り出され、浅い層は下から水が流入してくると同時にさらに上の層に水を流出させることになる。また、体積変化が生じた次の瞬間には、過剰間隙水圧の変化（土粒子骨格の構造に応じて有効応力の回復や上昇）が生じ、更新されたその圧力勾配に応じて、また次の瞬間の流入流出量が決まるという過程を続けることになる。以上は、一般的な圧密現象とまったく同じである。

さて、仮に地盤中に透水性の悪い層が介在するとどんな現象が生じるであろうか。下部から上昇してきた間隙水は低透水層で捕捉され、その直下の層の体積膨張をもたらすと考えられる。なお、Kokusho(1999)は、透水性の低い層が存在した場合、その直下に水膜が形成され、せん断応力を伝えなくなることを指摘し、地盤が不安定化する原因であることを示している。水膜が形成されるか、入ってきた水がダイレイタンスーによって吸収されるかについては、別途の論文にて述べることとして、Kokushoが指摘しているように、地盤中にこのような透水性の悪い層が存在することは、むしろ一般的なことで考えられる。沖積の地盤の層構造を見れば、均質な層が連続していることはまれであるし、一見均質に見える層でも細かな葉理が観察される。また、地下水位が地盤中に存在する場合には、地下水位より上の不飽和層の存在によって、そこに透水性の低い層が常に存在すると考えてもよい（渦岡ら、2001）。

以上述べたように、強震動を受けて、発生した過剰間隙水圧が間隙水の流入流出によって再配分する過程において、土の有効応力が減少した場合、ある初期せん断応力を負担していた土要素はせん断破壊する可能性がある。著者は、液状化に伴う地震後の流動変形のメカニズムの根本はここにあると考えて研究を実施している。

ここに述べたメカニズムが実際に生じるものか否かを明らかにするためには、

- (1) 繰返しせん断を受けた飽和砂質土が、どの位の間隙水を搾り出す可能性があるのか
  - (2) 間隙水の流入を受けて有効応力を減少させた土のせん断破壊がどのように進行するのかを明らかにする必要がある。
- また、
- (3) このようなメカニズムの流動変形予測を可能にするための手法の開発が必要となる。

本研究の着想に関わる概略説明に代えて、下記の関連論文を転載した。なお、この論文は研究初期の論文であるため、現時点での知見を十分には反映していない点は注意して頂きたい。

#### 関連論文

- 1) 地震後の浸透破壊を考慮した新しい流動変形予測法，土と基礎，Vol. 50, No.2, 13-15, (2002), 仙頭紀明，大村洋史，赤堀一彦，風間基樹

#### 参考文献

- 1) Kokusho, T. (1999): "Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread," J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, Vol.125, No.10, pp.817-826.
- 2) 渦岡良介，久保哲夫，八嶋厚，張鋒：不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析，土木学会論文集，III -57, 549-574, 2001.

## 2. 非排水繰返しせん断後の飽和砂の体積収縮特性

## 2. 非排水繰返しせん断後の飽和砂の体積収縮特性

本章の研究成果の概要は以下のとおりである。

非排水繰返しせん断後の砂の体積収縮特性を明らかにするため、初期等方応力状態および初期異方応力状態から、種々の非排水繰返しせん断履歴を与え、その後に排水を行って初期の応力状態に戻す要素試験を実施した。要素試験上、特筆すべき点は、

①間隙水の流入流出量を制御できる制御装置を作成し、高精度に排水量を計測できるようにしたこと

②不規則な地震動履歴を与える実験において、オンライン実験を採用したことである。実験の結果としての体積収縮特性は、初期有効応力に回復するまでの体積収縮量（最終体積ひずみ）、および有効応力ー排水量（体積ひずみ）の関係の二つである。前者は、地震後の地盤の沈下量そのものに密接に関係する。また、後者は、間隙水の流入流出速度に関係するため沈下経過や浸透によるせん断破壊の時間遅れに密接に関係する。

まず、最終体積収縮量に関する知見としては、

- ①当然のことながら、同じ繰返しせん断履歴を受けた場合、緩い砂ほど大きな体積収縮量を示す。その値は、体積ひずみにして数%オーダーである。
- ②繰返しせん断の履歴が激しいほど、最終体積ひずみ量は大きくなる。ここでせん断の履歴が激しいとは、同じ応力振幅あるいは同じひずみ振幅で繰返し回数が多い場合や、同じ繰返し回数でも応力振幅やひずみ振幅が大きい場合を意味している。簡単に言えば、より強い地震動を受ける場合を意味する。
- ③体積収縮量をうまく説明できる繰返しせん断履歴の激しさを表す指標としては、検討した中では、累加ひずみが最も適切な量と判断された。いわゆる応力・ひずみ・過剰間隙水圧比などの最大値指標は、繰返し回数の多い場合に不適切である。特に、繰返しせん断によって過剰間隙水圧比が1になった場合でも、その後の繰返しせん断履歴によって、より大きな体積ひずみが生じることは、同じ過剰間隙水圧比1の状態であっても砂の土粒子骨格構造の擾乱の程度が全く異なることを意味しており、重要な知見である。

次に、有効応力ー体積ひずみ関係に関する知見としては、

- ①体積ひずみ量は、初期の有効応力回復過程において著しく大きくなる特性を示し、体積収縮量は有効応力比の対数とほぼ比例する関係が認められた。このことは、初期有効応力の大きさが10倍異なっても（地中の深さが10倍違っても）、繰返しせん断によって発生した過剰間隙水圧比が同じであれば、体積収縮量が同じであることを意味する。したがって、体積収縮係数としては、低い拘束圧から出発するほど、大きな値となることを意味する。
- ②初期せん断応力が作用している状態から非排水繰返しせん断を行って、初期せん断応力を保った状態から排水試験を行うと、平均有効応力の変化による体積収縮に加えて、せん断応力比の除荷に伴う負のダイレイタンスーに起因する収縮による体積ひずみが発生する。その量は、砂の種類によって異なる。
- ③上記の関係は、2章 関連文献2)に示すようにモデル化できる。

### 3. 間隙水の流入を受ける砂のせん断ひずみの発達特性とそのモデル化

### 3. 間隙水の流入を受ける砂のせん断ひずみの発達特性とそのモデル化

過剰間隙水圧の再配分に伴う浸透によって間隙水が流入する砂のせん断変形機構を要素試験から実験的に検討した。実験では、初期せん断を与えた状態から間隙水を流入させる場合に加えて、非排水繰返しせん断後に間隙水を流入させる実験を行った。要素試験上特筆すべき点は、

- ①間隙水の流入流出量を制御できる制御装置を用いて、注水量を制御しながら、間隙水圧とせん断変形量を計測する実験を行ったこと
- ②中空ねじり試験機を用いて、せん断ひずみにして80%程度までの体積ひずみ-せん断ひずみ関係を求めていること（詳しくは関連論文22を参照されたい）

である。このうち①に関しての初期の実験では、バックプレッシャーの圧力をレギュレータで制御しながらの実験を行っていたため、応力状態点が破壊線に到達した後の制御が難しかった点を克服している。また、体積ひずみの計測精度が著しく向上した点も大きなメリットである。また、②の点に関しては、あるせん断応力を発揮している状態のまま間隙体積が膨張する過程において、体積膨張限界までを見通す実験ができたと考えている。

実験の結果、得られた知見は以下のとおりである。

- ①初期せん断応力を保った状態から、間隙水圧が流入して有効応力が減少することによって、応力の状態点が破壊線に達し、せん断破壊を起こす。この過程までに必要な間隙水の流入量は体積ひずみにして0.5%~1%程度である。したがって、液状化によって搾り出される排水量の大きさを考えれば、このような浸透によるせん断破壊は、十分発生の可能性の高い破壊形態であることがわかった。
- ②応力の状態点が破壊線に到達すると、土試料は流入した体積ひずみ量に比例してせん断変形が発達する。このとき、緩い砂ほど小さな体積ひずみ量で大きなせん断変形を示す。このような機構は、あるせん断応力を保持するために、砂が体積膨張して間隙に余分な水を溜め込むことによって生じるものである。この特性は、砂の種類や密度に依存する。
- ③上記の体積ひずみ-せん断ひずみ関係は、基本的に排水せん断時のダイレイタンス特性とほぼ同じである。
- ④破壊線に到達した直後の体積ひずみ-せん断ひずみ関係はほぼ線形な関係を示すが、さらに間隙の体積が膨張すると、砂の骨格構造が緩くなるため、少ない体積ひずみでより大きなせん断変形が生じるように変化してゆく。さらに、体積膨張が進むと最終的に所定のせん断応力を発揮できない限界の間隙比の状態に達する。実験では、このような限界の間隙比までせん断ひずみ一様に保ったまません断ひずみを発達させることはできなかった。（詳しくは関連論文22を参照されたい）
- ⑤非排水繰返しせん断履歴の体積ひずみ-せん断ひずみ関係に対する影響については、3.1.を参照されたい。
- ⑥上記に示したような間隙水圧流入時（体積膨張時）のせん断破壊のモデル化に関しては、砂の液状化を取り扱う研究分野ではこれまでほとんど研究の対象とされていない。というのは、多くの研究ではせん断中の体積変化を考慮していないからである。これに対するアプローチとして本研究の成果としては、3.2および3章の関連論文2)のなかで述べられているので、そちらを参照願いたい。

せん断中に体積変化を受ける場合のせん断変形の発達過程における砂の基本的な挙動については、本研究によってある程度明らかにされたと考えられる。しかし、今回の研究内容だけでは、十分に網羅されていないため、今後も引き続き検討を加える予定である。

#### 4. 地震後の浸透による流動破壊変形量の予測手法とその適用

#### 4. 地震後の浸透による流動破壊変形量の予測手法とその適用

過剰間隙水圧の再配分に伴う砂の体積収縮特性および体積膨張時のせん断破壊およびその後のせん断ひずみ発達特性を境界値問題に適用し、地震後の流動変形量を予測するための解析手法を提案した。ここでは、地震後の流動変形メカニズムの概要を広く理解してもらうために、地震動が終息した後の過剰間隙水圧分布を初期状態として、初期せん断を受けた一次元緩傾斜地盤に対する圧密浸透解析から、地震後に液状化地盤が大きく変形する最もシンプルな問題を対象としたものである。このようなメカニズムを対象とする境界値問題には、2次元3次元のものを含め種々のものが考えられるが、それについては今後の課題としたい。

主な適用事例としては

- ①理想化した多層成層構造を持つ緩傾斜地盤の数値解析（関連研究発表論文22）
- ②理想化した多層成層構造を持つ緩傾斜地盤のハイブリッドオンライン解析（同8）
- ③1964年新潟地震における昭和大橋の橋脚変形のシミュレーション  
本文中に英文にて記載
- ④1995年兵庫県南部地震の事例解析（4章 関連論文1）  
である。

これらのシミュレーション結果は、以下のような特性にかかっている。

- ①地震動によってどの位の過剰間隙水圧が発生するか（地震動作用中の挙動）  
これは、既存の非排水の有効応力解析でもある程度可能である。しかし、実際のサイトを対象とする場合には、そのサイトにどのような地震動が作用したのかや、変形の経過の真のところは確かめようがない。その場合、妥当性そのものを精緻に議論することは不可能である。
- ②地盤を構成する地層構造や地盤物性のモデル化  
この解析では、先に述べたように繰返しせん断後の体積収縮特性や間隙水流入時のせん断ひずみ発達特性のモデル化のほか、地盤の透水係数も重要なパラメータとなる。しかし、あるサイトにおけるこれら特性を十分な精度でモデル化することも現状では困難である。

したがって、シミュレーション結果の妥当性を個々の事例ごとに云々することは本研究の視点ではない。むしろ、このようなメカニズムを想定することによって、地震後に変形が進行することがシミュレーションできること、その変形や時間経過が無理な仮定をしなくてもオーダー的にほぼ受け入れられる結果となることが重要であると考えている。



本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。