

液状化地盤の側方流動に及ぼす 水膜現象(WFE)の影響

國生 剛治¹ ・ 渡邊 一洋²

¹正会員 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 中央大学技術員 同上

砂地盤は堆積構造を反映した透水性の異なる多くの層から構成されている。地盤が液状化をおこすと間隙水の上昇流が発生するが、透水性が違う層の直下に条件によっては水膜が形成される可能性がある。この水膜現象は側方流動の生じ方に影響を与えるのではないかと考えられる。

本研究では、表面が傾斜したゆる詰め飽和砂層の間に意図的に透水性の低い円弧状の薄いシルト層を挟み込み、水膜現象が生じやすい条件の模型地盤を作成し、液状化に伴って発生する側方流動を観察する。それを均一な模型地盤の結果と比較することで水膜現象が側方流動の生じ方に及ぼす影響を定性的に明らかにすることを目指している。

Key Words : *Liquefaction, Vibration, Sand, Permeability, Dynamic, Model Test*

1. まえがき

兵庫県南部地震(1995年)では護岸の背後地盤が側方流動をおこし、橋梁やタンク、建物の基礎などに多大の被害を与えた。類似の被害は新潟地震(1964年)、日本海中部地震(1983年)などの地表面傾斜や段差のある液状化地盤でも顕著であり、また諸外国でも多くの例が指摘されている。これらの被害のいくつかでは、側方流動が地震継続中だけでなく、終了後にも発生したケースが報告されている。また、側方流動が非常にわずかな地表の傾斜でも生じることも報告されている¹⁾。

Seed²⁾は成層状態の砂層の振動台による液状化実験で砂層の中の低透水層の直下に水膜の形成が観察できることから、低透水層の直下に間隙の再配分により、滑りやすい層ができる可能性を推論している。実際、飽和砂層を液状化させると、利根川砂で均質に作成したはずの砂層でもわずかな粒径の違いによる透水性の差により境界部に容易に水膜が形成されることが観察できる。この現象の重要性を強調するために、水膜現象(WFE: Water Film Effect)と呼ぶことにする。

本研究は、液状化後の砂層中に水膜が形成されや

すいことに着目し、それが地盤の側方流動の時間遅れや流動モードなどに大きな影響を与えるのではないかと第一著者の以前からの考えに基づいている。そして、水膜現象とその影響による側方流動が生じやすい条件を意図的に導入した模型地盤の液状化実験を行い、水膜現象の有無による側方流動のメカニズムの差違を定性的に明らかにすることを目指している。

2. 実験方法

図-1に示すように、内寸法800×500×150mmの透明アクリル製の矩形土槽に水を満たし、その中に細砂を落下させ、所定の傾斜角の飽和したゆる詰め飽和の模型砂層を作成する。このとき、途中で円弧状の薄い非塑性(NP)のシルト層を間に挟み込むようにする。これに用いるシルトの重量は約400gである。一方、これと比較するため、シルト層をつくらず、その重量分のシルトを砂の中になるべく均一に混合させる均一混合砂層(シルト含有率約1%)も作成する。また、いずれの場合も完成後の傾斜地盤表面は約400gのシルトで覆われている。図-2に細砂、

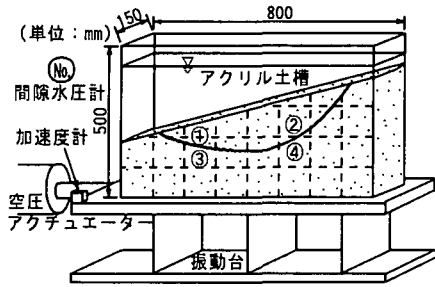


図-1 実験装置の概要

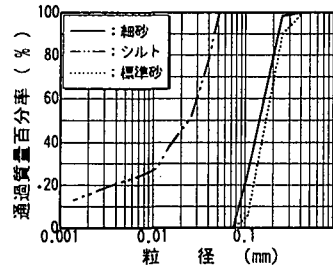


図-2 試料の粒径加積曲線

表-1 試料の物理特性

土粒子密度 (g/cm^3)	2.723
最大密度 (g/cm^3)	1.559
最小密度 (g/cm^3)	1.227
最大間隙比	1.219
最小間隙比	0.747

表-2 実験条件

CASE	模型地盤					振動台		
	シルト層	平均勾配 (%)	乾燥密度 (g/cm^3)	間隙比	相対密度	振幅 (mm)	周波数 (Hz)	振動波数
1	無し	30.1	1.272	1.141	0.165	16	3	3
2	有り	33.9	1.280	1.127	0.194	16	3	3
3	有り	22.9	1.282	1.124	0.202	16	3	3

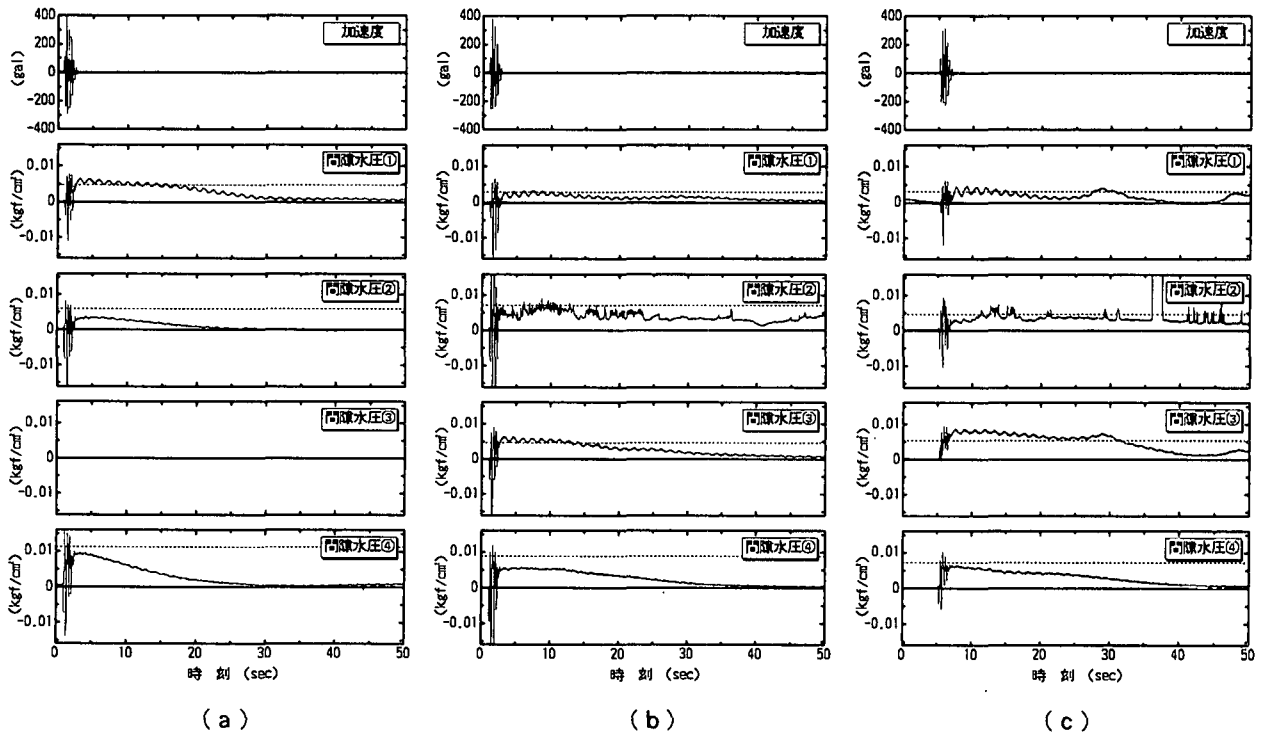


図-3 加速度と間隙水圧の時刻歴

及びシルトの粒度分布を、表-1に細砂の物理特性を示す。また、細砂及び均一混合砂の定水位透水試験を行い、各々、 $k=2.5 \times 10^{-2}$ 、 $2.7 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ の透水係数を得ている。水面位置は斜面の最上部が完全に水面下になるように設定する。

振動は空圧アクチュエーターにより板バネ振動台を加振する。また、流動量を定量的に測るため、土槽内壁に100mm×100mmの格子状にマーカーを配置し、その変形をビデオにより撮影する。さらに、台加速度を測定するとともに、図-1に示すように高感度の間隙水圧計を土槽内壁に設置し、シルト層の上下に当たる4点で過剰間隙水圧の測定を行う。

3. 実験結果

ここではシルト層の有無の影響が明瞭に現れた3ケースについての実験結果を述べるが、それらの実験条件は表-2に示されている。作成した砂層の相対密度は細砂単独層で約20%、シルトとの均一混合砂層では約17%である。図-3のa、b、cはそれぞれ地表面傾斜約30%でシルト層を挟まない均一混合砂層についてのCASE 1と、地表面傾斜約30%と20%の円弧状シルト層を挟んだCASE 2、3の振動台加速度と間隙水圧の時刻歴を示している。間隙水圧計の番号は図-1に示したものに対応している。いずれの実験

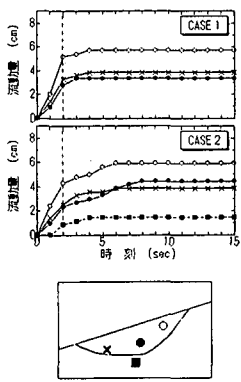


図-4 代表点の流動量
(CASE 1・CASE 2)

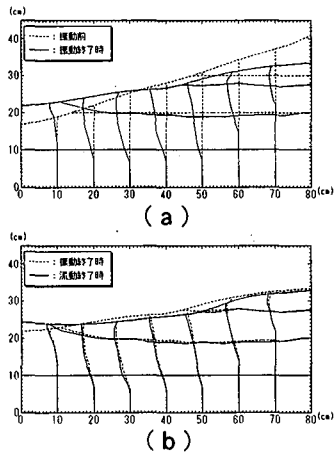


図-5 流動の様子(CASE 1)

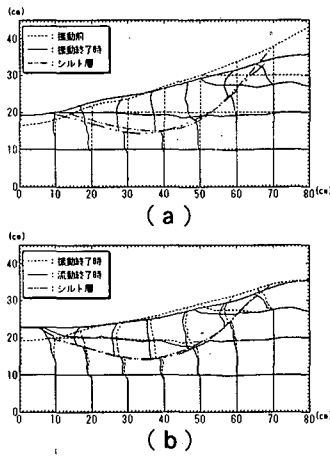


図-6 流動の様子(CASE 2)

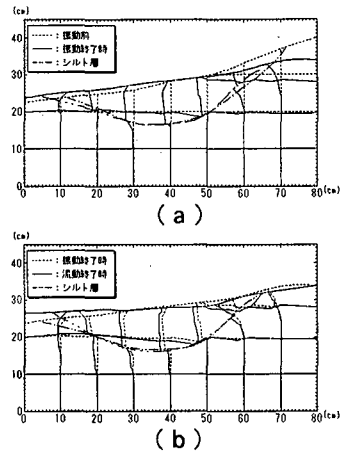


図-7 流動の様子(CASE 3)

でも振動台加速度の波形は正弦波からだぶ変形を受けているが、各実験相互間での再現性はデータのサンプリング時間が0.02secである点を考慮すると比較的に良好であることがわかる。間隙水圧については調子の悪いチャンネルもあるが、振動中の急激な水圧上昇とその後のゆっくりした逸散が捉えられている。図中の水平な破線は、初期の地盤形状から算定した完全液状化時の過剰間隙水圧上昇量であり、地盤形状の流動による変化を考慮にいと、砂層の各部は振動直後にほぼ液状化しているといえる。CASE 2、3ではシルト層の下部の水圧が上部に比べて高い値で持続する時間がCASE 1より長く、間隙水圧の逸散が抑制されていることがわかる。図-4にはCASE 1、2での砂層断面の代表点の流動量の時間的変化を示している。振動をはじめた時刻を0とし、加速度が消散した時刻を図中の破線で示す。どちらも振動中は短時間に大きな流動を生じている。明瞭な差が現れるのは振動終了後で、CASE 1では流動がほとんど停止してしまうのに、シルト層のあるCASE 2では振動中ほどではないが徐々に流動が継続することが読みとれる。図-5、6、7はそれぞれCASE 1、2、3について透明アクリル壁内面に設置したマーカーの変形状況を示している。各図の(a)は振動開始から振動終了時点までの変形、(b)は振動終了時点から後の変形である。これより、シルト層の無い場合には、振動中には特定の滑り面を伴わずにほぼ等ひずみ的に流動が生じ、振動終了後には流動はほぼ停止してしまうことが読みとれる。一方、シルト層のある場合は、振動中にはシルト層に沿っての不連続な流動と、さらに深い位置からの流動との二つが発生し、振動終了後にはそのうちおもにシルト層に沿った不連続な流動が生じることがわかる。これは、斜面勾配が急なCASE 2の場合だけでなく、

斜面勾配が緩いCASE 3の場合も同様であり、図-7から斜面勾配が小さくても振動後の流動が継続しうることがわかる。

4. 考察

上述の実験でCASE 1、2は用いている細砂、シルトの重量が同じで、斜面勾配も30~33%の範囲で作成されている。両者の大きな違いは、CASE 1が細砂とシルトを極力均一に混ぜて作成しているのに対し、CASE 2では両者を分離しシルトが一層に集中するように作成している。その結果、両者での側方流動の起こり方に大きな差が現れた。すなわち、シルト層の無い場合には不連続面の無い流動がおもに振動継続中に生じるのに対し、シルト層のある場合にはそれを不連続面とする流動が振動継続中だけでなく振動終了後も生じる。このときの観察によると、液状化するとほぼ同時に下方からの間隙水の上昇流が起き、それがシルト層直下に溜まって薄い水膜ができる。この水膜の水は円弧に沿って流れ、地表から激しく吹き出すが、ある時間のあいだ水膜は持続的に存在しう。このような状況は間隙水圧の測定値の変化傾向とも整合している。

水膜が円弧の全延長で連続すればせん断抵抗はゼロとなり、振動終了後でも傾斜角が残っていれば、シルト層下面に沿った流動が生じうることができる。一方、シルト層の無い場合では当然このような水膜現象は起きず、振動終了後の間隙水圧は図-3(a)に見られるように数秒間は完全液状化状態に保たれるにもかかわらず、流動はほぼ振動中にしか生じない。

すなわち、同じ量の砂とシルトを均一混合するか

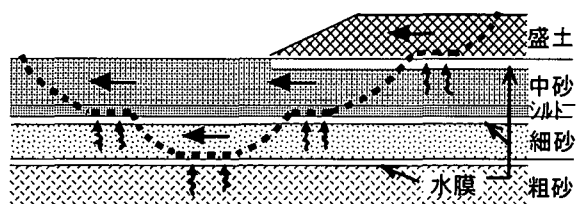


図-8 地盤の簡略図

分離するかで、側方流動のモードや発生時間に大きな違いをもたらすことが以上の実験で定性的ながら示されたといえる。自然の砂層の成層構造はCASE 1とCASE 2のどちらが近いかといえ、それはCASE 2であることは疑いの余地がない。すなわち、砂とシルトが河口から静穏な堆積環境の水域に供給されて砂層が形成された場合、両者は必ず分離して堆積しCASE 2のような層構造を形成し、CASE 1のように均等に混合はされない。

つまり、砂層の側方流動を考える場合、砂層の成層構造を考慮することの重要性が本実験で実証されたといえよう。勿論、本実験のように円弧状のシルト層を斜面に挟んだ自然の砂層はまれであろう。これは、あくまでシルト層の効果を際立たせて示すための実験的工夫であった。自然地盤では、むしろ通常均一として扱われている砂層が、実は細かく見るとシルト質から礫質までの種々の薄い水平層の重層構造からなっているのが通例である。このような砂層が全面的に液状化した場合、砂層全体の上に不透水層がある時はその直下に水膜が形成されるのは当然考えられるが、砂層の内部にも透水係数が相対的に小さいシルト質砂や細砂の直下に水膜が形成される可能性がある。この地盤に地表面傾斜や段差などの誘因によって側方流動が生じるとすれば、滑り面は図-8に概念的に示すように滑り抵抗ゼロの水膜を最大限通過する安全率の最も小さな面が選ばれることになる。勿論、水膜と水膜の間は液状化砂の中を通過し、その抵抗は非排水せん断強度で決まることになるであろう。

5. あとがき

このような考え方によれば、水膜の発達液状化後の間隙水圧の逸散の時間的経過によって支配されるので、液状化地盤での水膜のつながり具合が滑り安全率を最小にする時点で、最大の側方流動が生じることになる。また、何らかの条件によって水膜がほぼ連続して形成された場合には、非排水せん断強度では説明のつかないようなわずかな傾斜角の地盤でも流動が生じることありうる。

勿論、間隙の再配分を伴わない均質な砂の非排水せん断による流動メカニズムの考え方は現象解明の出発点であり、その重要性を否定することはできない。ただし、Seed²⁾が1987年の論文で推論したように、自然地盤の側方流動を取り扱う場合、不均質な成層構造の各薄層中での間隙の再配分の影響は無視し得ないと思われる。その結果、低透水性の薄層の直下に水膜が形成される場合、流動メカニズムに与える影響が非常に大きいことが本実験により定性的に示されたといえる。今後は、実際の地盤条件における水膜生成の定量的条件、及び現実的水膜条件下での側方流動のメカニズムについて研究を進める予定である。

謝辞：本研究は中央大学の原壮一、山本菜穂子、関田匡延の3氏の1996年度卒業研究として行われた。実験に用いた大量の砂は不動建設(株)安藤裕氏に御提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 浜田政則、安田進、磯山龍二、恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文報告集、No. 376、Ⅲ-6、pp. 211-220、1986.
- 2) Seed, H. B. : Design problems in soil liquefaction, Journal of GE, ASCE vol. 113, No. 8, 1987.