水膜現象が液状化砂層の側方流動へ与える影響

Water Film Effect on Lateral Spreading of Liquefied Sand

図 生 剛 治 (こくしょう たかじ) 中央大学教授 理工学部土木工学科

1. まえがき

地震時の砂層の液状化による側方流動は、1964年の 新潟地震,1983年の日本海中部地震,1995年の兵庫県 南部地震などで、構造物や基礎に大きな被害をもたらし てきた。また, Seed (シード)¹⁾はアースダム, 盛土な どにおける地震時の側方流動による多くの被害例を収集 した。これらの被害例のいくつかにおいては、側方流動 が、地震時ばかりでなく、地震終了後に生じたことが明 らかにされている。新潟地震においては、信濃川への地 盤の大規模な流動が主に震動終了後に生じたとの証言が 得られている。また、1%以下の非常に緩い勾配の地盤 でも大きな流動変位を生じている2)。米国サンフェルナ ンド下部ダムの滑り破壊は地震動終了1分後に生じて いる¹⁾。また最近では、ニュージーランドの橋が地震か ら1時間後に側方流動による地盤変状で通行不能とな ったケースも紹介されている3)。これらの例は、流動破 壊の駆動力として、地震の慣性力よりむしろ地盤の高低 差によるせん断力の方が本質的であることを示唆してい る。しかしながら、既往の1G場あるいは遠心場での 均一な砂層を対象とした模型実験では振動が終了すると, 液状化が継続していても多くの場合側方流動は止まって しまうことが示されている。

実際の砂層を細かく観察すると、それが一般には決し て均質ではなく、シルト質の薄層や礫質砂層を含む多く の重層構造から成り立っていることが分かる。このよう な砂層が液状化すると余剰間隙水は地表に向かって上昇 するが、その途中にある低透水層で捕捉され、その直下 に水膜を形成することが考えられる。これは低透水薄層 直下での間隙の再配分が生じる現象とも解釈できる。こ のように水膜現象の流動破壊への関与の可能性について は、既に Seed¹⁾により water interlayer(ウォーターイ ンターレイヤー)と言う用語を用いて概念的に指摘され ていたにもかかわらず、現在までのほとんどの研究の流 れはむしろ均質な砂層の流動メカニズムの解明に向けら れてきた。

本稿では筆者らの最近の系統的研究に基づき⁴⁾,まず 一次元地盤の模型実験⁵⁾により水膜が透水性の異なる薄 層を挟む液状化砂層中において生成するメカニズムを検 討する。さらに、二次元の飽和砂地盤を用いた模型振動 実験⁶⁾により、水膜現象が流動破壊のモード、タイミン グなどに与える影響を定性的に明らかにする。

2. 水膜の生成メカニズムに関する一次元砂層 模型実験

図-1に示すように、内径13.0 cm、高さ21.15 cmの アクリル透明円筒土槽に水を満たし、上から乾燥した豊 浦砂を降らせて厚さ200 cm の緩い砂層を作製した。そ の途中で、底から96 cm の位置に、非塑性シルトで厚さ 4 mmのシルトの薄層を挟み込んだ。砂層とシルト層の 透水係数はそれぞれ2~5×10⁻² cm/s,1×10⁻⁴ cm/s 程度である。この砂層に土槽底部よりばねの力を用いた 打撃機による一定打撃力を加えて液状化を発生させた。 強い衝撃力により砂層は全深度で瞬時に液状化し、最終 的な沈下量は層厚の3%程度生じた。これは新潟地震で の沈下ひずみと同程度と思われる。この時の砂層の沈下 やシルト薄層直下の水膜の厚さの時間変化をビデオ映像 により、また間隙水圧を5箇所の間隙水圧計により計 測した。また、比較のため、シルト層のない均質な砂層 の試験も行った。

図-2にはシルト層がある場合のその上下に位置する 上部砂層と下部砂層の表面の沈下量およびシルト層直下 に形成される水膜厚さの時間変化を示す。図には沈下カ ーブの明りょうな変化点をp1からp5までの符号で示 している。このうちp2は下部砂層の液状化終息時点,p3 は上部砂層の液状化終息時点である。シルト層が無い場 合は,p3で沈下はすべて終了する。それに対し、シルト 層がある場合は、水膜は打撃の瞬間p1の直後から下部



図-1 透明円筒土槽中に作製したシルト薄層を含んだ飽 和砂層と打撃装置

報文—2574



図-2 シルト薄層を挟んだ飽和砂層の沈下量と水膜厚さ の時間変化

砂層表面の沈下量とほぼ同じペースで成長し, p2 で1 cm 程度の最大厚さになる(口絵写真-9 参照)。すな わち,シルト層を難透水層として下部層から出てきた余 剰間隙水のほぼすべてが水膜となる。それ以降,水膜は 徐々に厚さを減じ, p4 で消滅するが,その間 p5 の時点 まで上部砂層全体の長期的沈下が継続している。

図-3は同じ実験で得られた過剰間隙水圧分布の時間 変化を示している。シルト層を挟むそれぞれの砂層で並 行的に液状化が下方から終息にむかい,下部砂層の終息 部分では動水勾配はゼロに近いが,上部砂層の終息部分 では下の水膜からシルト層を通って上部に向かう浸透流 の影響を受けて,動水勾配が明らかに傾斜していること が分かる。また,上部と下部の水圧分布をシルト層の位 置まで外挿すると,明らかに食い違うことが分かる。こ の水圧差がシルトの薄層に大きな動水勾配として加わる ことが理解できる。

液状化終息後の下部砂層の過剰間隙水圧は,水膜の影響により本来は水膜より上部の層の有効応力の値に保た れるはずであることは容易に理解されるところである。 ところが図-3に示すように,この間,水膜は存続して いるにもかかわらず,水圧は本来とるべきシルト層の位 置での有効応力の約8.5 kPaよりもはるかに低い2 kPa



図-3 シルト薄層を挟んだ飽和砂層中の過剰間隙水圧の 時間変化

くらいまで低下している。これは、円筒土槽の内壁と砂 の間の摩擦が大きな影響を及ぼしているためと考えられ る。自然地盤では摩擦が働かないため、下部砂層の水圧 は p2 時点の値を保持し、その間、上部層の水圧は液状 化の終息とともに低下する。このため、シルト層に加わ る動水勾配は摩擦のある今回の実験よりもはるかに大き くなり、それがある限界を上回るとシルト層の浸透破断 が生ずるものと考えられる。シルト層の破断により当然 ながら水膜の存続時間は短縮されるが、それでも水膜が 存在する間はその影響は継続する。また、破断に伴い既 に液状化が沈静化した上部砂層の一部が限界動水勾配に さらされ、再び部分的に液状化することも考えられる。

同じ実験条件の下で、下部砂層の初期相対密度を広い 範囲で変化させた時の、水膜の最大厚さと水膜存続時間 は相対密度に対しほぼ反比例の関係にあり⁵⁾、密度が緩 くなるに従い水膜現象が側方流動に及ぼす影響は急激に 大きくなる傾向があることが示唆される。

また,以上では砂層中のシルト層は1枚のみの単純 な条件の実験であったが,シルト層が複数枚挟まれた実 地盤においては各シルト層直下に水膜が水平方向にある 程度連続性をもって生成されると考えられる。その場合, 液状化終息後も水膜が存続する間は砂層中の過剰間隙水 圧は高いレベルに保持されることになり,不安定な状態 が継続することとなる。

3. 水膜が側方流動に及ぼす影響に関する二次 元砂層模型実験

高さ500 mm,幅800 mm,奥行き400 mmのアクリ ル透明矩形土槽に水を満たし、そこに豊浦砂とほぼ同じ 粒度の細砂を降らせて、密度の緩い砂層斜面を作製した。 その途中で、図-4に示すように斜面中に前の実験と同 じ無塑性シルトからなる平均厚さ6 mmの円弧状のシ ルト層を挟み込んだ。比較のために、シルト円弧の無い 均質の砂層斜面の実験も行った。空圧式振動台により 3 Hzの正弦波振動を断面と直交する方向に約1秒間加 えて砂層を液状化させ、振動中と振動後の斜面の流動を 土槽側壁に張り付けた麺の動きのビデオ映像で測定し、 砂層断面の数箇所で過剰間隙水圧も測定した。

図-5(a)(b)にシルト円弧の有無の2ケースについての流動モードの比較を示す。これよりシルト層のない



図-4 透明矩形土槽中に作製したシルト円弧を含んだ飽 和砂層斜面と振動台

土と基礎,47—4(495)

NII-Electronic Library Service



場合は斜面の流動により断面の連続的な変形のみが生じ るが、シルト層のある場合は連続的な変形のみでなく、 シルト層に沿った不連続的な変形が明りょうに現れるこ とが分かる(口絵写真—10参照)。また、図—6(a)(b) には砂層斜面の2~3箇所(同図(c)に表す)の流動量 (流動増分ベクトルの長さの総和)の時間変化を示す。 シルト層のない場合は振動終了後も間隙水圧は100%上 昇しているにもかかわらず⁴⁾、流動がほぼ振動継続中の みに限られているのに対し、シルト層がある場合はその 後も流動が継続していることが分かる。口絵写真—10の 最下段に示されるように、この時期にシルト層の直下に 満い水膜が連続的に生じていることが観察でき、これに 沿って振動終了後も不連続な流動が継続的に生じること が分かった。

上記のモデル実験では問題を単純化し水膜の影響が明 りょうに現れるように、斜面中に円弧状のシルト層を導 入したが、実際の砂層では低透水層は通常水平方向に連 統性を持って分布していることが多い。そのような地盤 条件を想定して、斜面上部に2枚の水平シルト層を入 れた実験を行った。その他の条件はすべて前述のとおり である。図―7はシルト層の有無による振動中および振 動終了後の断面の流動量の対比を示している。この実験 結果より、シルト層がない場合は同図(b)のように流動 はやはりほぼ振動中に限られるのに対し、シルト層直下 に水膜が生じる場合には同図(a)のように振動終了後に も二つのモードにより流動が生じていることがわかる (口絵写真-11参照)。その一つは、同図(a)の2番目の 流動図に示すように水膜を通る不連続な滑りであり、こ れはこの実験の場合,振動終了後約3秒間継続してい る。もう一つは3番目の流動図に示すように、それ以 降,過剰な動水勾配によるシルト層の浸透破断が生じ, 上部層に水膜の余剰水が急激に上昇し再液状化したため, 上部の砂が泥水状となり斜面下部に流れ下っている。

さらに一般的に、水平成層砂地盤に盛土などの地盤の



ーの シルトロ弧の有無による認和砂虐 斜面の流動量の時間変化の対比

高低差による流動破壊が生じる場合には,滑り面は水平 な水膜だけでなく砂層部分も通過することとなり,現象 はより複雑となることが観察されている⁶⁾。しかしこの 場合でも,せん断抵抗がゼロである水膜部分を通過する 滑り面が生じやすいこと,水膜が生じる条件では均一な 砂層に比べて流動変位量が大きくなる傾向があることが 明らかになっており,水膜現象の重要性には変わりはな いと言えよう。

4. まとめ

2 種類の模型実験により,透水性の低いシルト質薄層 を挟んだ砂層の液状化時の流動破壊のメカニズムについ て,定性的ではあるが以下の主な知見が得られた。

- 緩い飽和砂が液状化した場合、砂層に含まれる シルト質の低透水層の直下に水膜が形成される。
 水膜の厚さや存続時間は砂層の相対密度が小さく なるほど反比例的に増大する。
- 2) 均一砂層の流動破壊はほぼ振動中にのみ生じ、 連続的なモードで生ずる。これに対し、シルト薄層 直下で水膜が発生すると、地盤の流動破壊は振動 終了後も継続し、水膜に沿って不連続的に生じる。
- 3) 水膜が存続する限り、その厚さにかかわらず水 膜下の砂層の過剰間隙水圧は初期上載有効応力に 等しいレベルに保持されるため、砂質部分の液状 化がいったん終息した後もある程度の時間にわた り地盤の安定性に影響を及ぼす可能性がある。
- 4) 液状化終息過程でのシルト層の上下の砂層の水 圧変化により、シルト層には過剰な動水勾配が加 わる。その破断のタイミングはシルト層の厚さや 塑性的性質、さらに流動変形に依存すると思われ

13

報文—2574



図-7 水平シルト薄層の有無による飽和砂層斜面の流動モードの対比

るが,破断によって上部砂層には水膜に貯えられ た余剰水が一気に流入するため,ボイリングある いは再液状化による不安定化を引き起こす可能性 がある。

以上のように,緩く堆積した砂層においては液状化時 に低透水層の直下に水膜が形成され,それが流動破壊の モード,タイミング,残留強度,流動量などの評価に大 きな影響を及ぼす可能性が明らかになった。すなわち, 緩い液状化砂層の側方流動現象とは,均質な砂層が非排 水状態で整然と流動すると言うイメージよりも,実際は 不均質性に富んだ砂層がローカルな間隙の再配分を行い ながら,多数の水膜を伴い,ダイナミックかつ複雑に流 動する現象と考えるべきであろう。

これらはあくまで小型模型実験による定性的結果と, それに基づく実地盤への拡張である。この際,最も問題 となるのは両者での拘束圧の違いであろう。しかし,有 効拘束圧が大きな実地盤においては,せん断変形に伴う 体積収縮が模型地盤より生じやすく水膜現象による側方 流動はさらに顕著となると考えられるため,模型実験の 結果は定性的には適用性を有していると言えよう。今後, 数値解析や大型模型実験により,実地盤に対応した現象 を定量的にも明らかにすると共に,側方流動の設計法で の水膜現象の考慮の仕方について具体的提案を行ってい く必要がある。

参考文献

- Seed, H. B.: Design problems in soil liquefaction, Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 113, No. 8, 1987.
- Hamada, M.: Large ground deformations and their effects on lifelines: 1964 Niigata earthquake, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance during Past Earthquakes, Vol. 1, Japanese Case studies, pp. 3.1~3.123, 1992.
- Berrill, J. B., Christensen, R. J., Keenan, R. J., Okada, W. and Pettinga, J. R.: Lateral spreading loads on a piled bridge foundation, Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures, Proc. of Special Technical Session on Earthquake Geotechnical Engineering in ICSMGE in Hamburg, pp. 153~183, 1997.
- 國生剛治・渡辺一洋:液状化地盤の側方流動におよぼす 水膜現象(WFE)の影響,第24回土木学会地震工学シンポジウム(神戸), pp. 545~548, 1997.
- 5) 國生剛治・澤野珠輝・川合理恵・杉山賢介:砂質地盤の 側方流動に関わる水膜の生成に関する研究,地震時の地 盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム 発表論文集, pp. 317~320,地盤工学会, 1998.
- 6) 國生剛治・故島哲朗・中野孝威・野中のぞみ・渡辺一 洋:液状化地盤の流動メカニズムに与える水膜現象 (WFE)の影響に関する模型実験:地震時の地盤・土構 造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文 集,pp.313~316,地盤工学会,1998.

(原稿受理 1998.7.15)