

遠心模型実験による断層の地盤破壊挙動に 対する基礎的検討

中村 邦彦^{1*}・日高 功裕¹・澤田 昌孝¹・石丸 真¹・岡田 哲実¹

¹電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646番地）

*E-mail: kunihiko@criepi.denken.or.jp

粘着力のない豊浦砂と粘着力のあるステンレスと砂鉄を混合した混合材で地盤を作製し、重力場と遠心加速度50G場で、断層の傾斜角度60度および75度で断層を発生させる実験を実施した。その結果、以下のことが示された。

(1) 粘着力のない豊浦砂よりも粘着力のある混合材の方が拘束圧の影響を受け、拘束圧が大きい場合にせん断帯の幅がせまくなることが明らかとなった。また、砂で見られた雁行状の破壊は不明瞭になった。(2) 適切に引張り破壊および引張り破壊後のせん断強度をモデル化することにより、FEMでも地震時に発生する地表付近の断層の挙動・形態を再現できるものと考えられる。

Key Words : centrifugal model test, reverse dip-slip fault, fracture morphology, finite element method

1. はじめに

大規模な内陸地震が発生すると、地震動だけでなく、地表に生じる断層変位によっても土木構造物が被害を受ける場合がある。

地震時に発生する地表付近の断層の挙動・形態に関しては、地表地震断層の地表踏査、トレンチ調査やリモートセンシングを用いた断層調査（航空レーザー測量、干渉合成開口レーダー）等、現地調査委による研究が主体である。また、数値解析手法による検討も実施されており数値解析手法の信頼性を示すには、数値解と理論解の比較による検証、模型実験や実地震における地表断層等の観測結果との比較による妥当性確認が重要であり、妥当性確認用のデータとして室内実験結果を活用することが重要である。

2. 実験概要

(1) 断層模型装置

断層模型装置を図-1に示す。土槽内の地盤の大きさは幅32.8cm×奥行き約20.5cm×高さ10.0cmであり、地盤底部には、断層（地盤のずれ）を模擬するための可動底盤が設置されている。

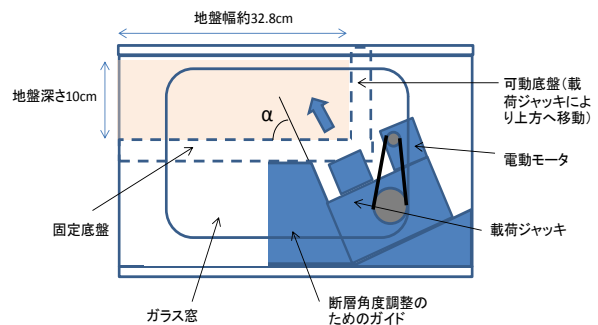


図-1 断層模型装置概要図（断層の傾斜角度 75 度）

可動底盤により模擬される断層の角度 α は75度と60度の2種類となっており逆断層の断層が発生する。断層を発生させるための可動底盤は、電動モータを用いた载荷ジャッキにより、载荷ガイドに沿って上下方向への移動が可能となっている。可動底盤による断層発生位置は、75度の場合小さい地盤の右端から8.0cmの位置に、60度の場合、7.9cmの位置に位置する（図-2、図-3）。

(2) 計測項目

地盤の変位を計測するため接触型変位計を図-2、図-3に示すように土槽の左端から 6.0cm, 12.7cm, 19.4cm, 26.1cm の位置に設置した。設置位置は、断層破壊開始位置の载荷盤の分割位置の直上を挟むようにした。また、左側は断層の影響範囲と範囲外の差が捉えられるように考えて断層破壊開始位置直上から離れた場所にも設置し

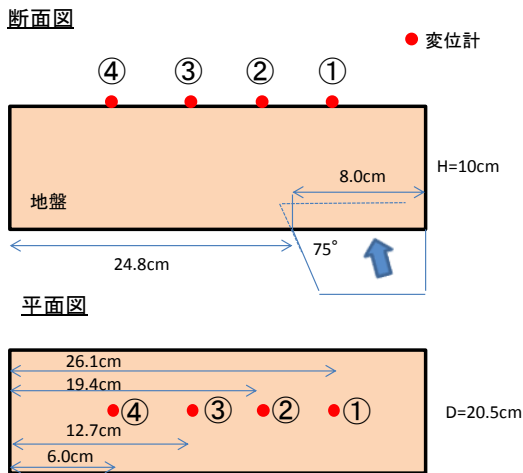


図-2 地盤のサイズと接触型変位計の設置位置（断層の傾斜角度 75 度）

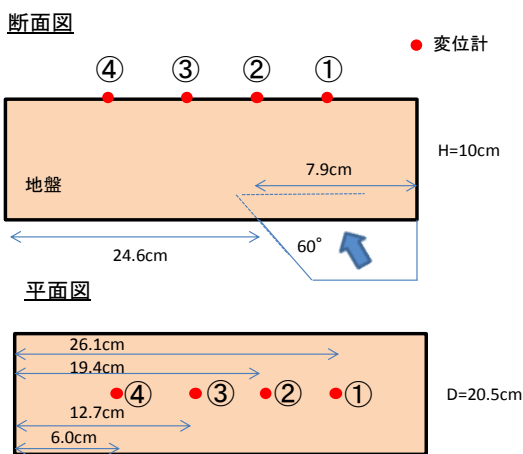


図-3 地盤のサイズと接触型変位計の設置位置（断層の傾斜角度 60 度）

た．併せて底面での断層の移動量として载荷盤の上昇量を 1 点測定した．

土槽の片側はアクリルで作製されており，土槽の一部を観察することが可能となっている．ただし，既存の土槽を流用したため地盤表面部についてはアクリル面（側面）から観察することが出来ない．実験終了後に，地表面の壁面での高さを測定し，地表面付近の形状とした．

(3) 地盤材料

地盤は，粘着力の有無の違いおよび密度の違いを把握するため，粘着力のない地盤材料として豊浦砂を用いた．また，粘着力を有する地盤材料としては，ステンレス粒子と砂鉄に水を加えて混合した材料を使用した．ステンレス粒子は，形状が円筒状で直径が 2mm 程度，高さも 2mm 程度のものを使用した．砂鉄はニュージーランドのタハロア産を使用した．

ステンレス粒子と砂鉄の混合材については，森本ら¹⁾が使用しており，物性が得られていること，密度が大き

く拘束圧の影響を可能な限り大きめの値で検討するためを使用した．ステンレス粒子と砂鉄の混合体は，重量比でステンレス粒子：砂鉄：水を 40:30:1 で混合し密度を 4.16Mg/m^3 とした．豊浦砂については，相対密度を中密な 60%と密の 85%を使用した．

(4) 実験条件

実験条件を表-1 に示す．断層の角度は 75 度と 60 度の 2 つのケースを設定した．また拘束圧の影響を把握するため，重力場での実験と遠心加速度 50G 場での実験を行った．

表-1 実験ケース

実験 ケース	材料	断層 角度	遠心 加速度比
1	豊浦砂	75	1
2	(相対密度 60%)		50
3	豊浦砂 (相対密度 85%)		50
4	ステンレス砂鉄	75	1
5		60	50
6			1
7	豊浦砂 (相対密度 85%)	60	50
8			1
9			50
10	豊浦砂	60	1
11	(相対密度 60%)		50

(5) 実験方法

a) 地盤作製

豊浦砂の地盤は，自然乾燥した豊浦砂で作製した．地盤の変位を視覚でとらえやすくするため，地盤の厚さ約 9mm 毎に着色剤により染色した豊浦砂で約 1mm 毎の厚さの地盤を相互に作製した．

一方，ステンレス粒子と砂鉄の混合体は，3 層に分けて締め固めて作製した．締め固めて作製した後，土槽のアクリル面側を外して，メッシュを切った板状のものを設置し，スプレーを吹き付けることにより地盤にメッシュを描いた．

b) 遠心加速度の付与

地盤作製後，遠心加速度場で载荷を行うケースについては，遠心载荷実験装置により遠心加速度を付与した．

c) 断層変位の発生

重力場での実験では地盤作製後，50G 場での実験では，遠心加速度を付与した後，電動ジャッキにより载荷盤を上昇させ断層を発生させた．载荷盤の上昇は約 2.6mm/min の速度で鉛直上方に移動させた．载荷は，10cm の地盤に対して 1.49cm 上昇させた．

d) 実験終了後のスケッチ

実験終了後に、土槽側面のアクリル面側と上面の観察を実施した。豊浦砂の場合にはアクリル面をつけたまま観察し、ステンレス砂鉄混合土の場合には、アクリル面を外して観察した。

3. 実験結果

(1) 豊浦砂の代表的な断層生成過程

実験終了後のスケッチの一例を図-4に示す。スケッチを見ると幾つかの雁行状の破壊線が生じている様子が分かる。これらの破壊線は実験の進行とともに増加した。破壊線は基本的に左側から順に破壊が進展した。このような傾向は、乾燥砂を用いた既往の研究で既に指摘されており²⁾、本研究でも同様な傾向が確認された。

また断層の傾斜角度が60度のケースでは、滑り線が地表面に到達する前に、滑り線が地盤内で微妙になったりし判別が難しいケースが見られた。そのような場合は、地表面での明確な破壊線も確認しにくい状況であった。

(2) 混合土の代表的な断層生成過程

図-5に実験終了後の破壊形態をスケッチしたものの一例を示す。混合土の場合には豊浦砂と比較して地中内では、明確な破壊線は少なく2本程度であった。その2本の間は幾つかの破壊線が生じるような形状ではなく連続して変化した。一方地表面では、明確に破壊線が生じた場合と生じていない場合があった。また、破壊線は左が先に発生した。一番左側の破壊線は明瞭に出る傾向があるが可動底盤側の破壊線は地表面まで現れていないケースも見られた。可動底盤側の破壊線は重力場では明確に出た一方で、遠心加速度50G場では明確に出なかった。

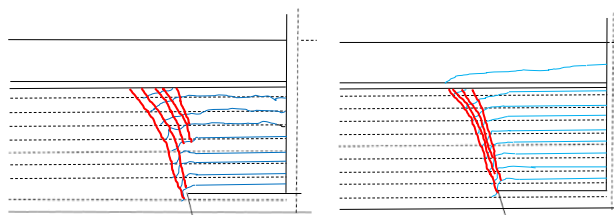


図-4 豊浦砂の代表的な断層の様子 (左1G, 右50G, 断層の傾斜角度75度, $D_r=60\%$)

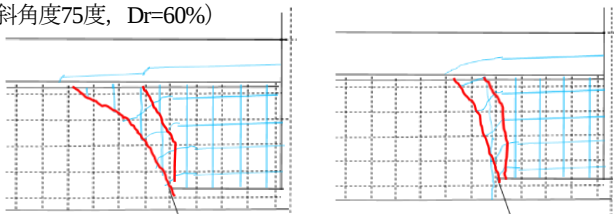


図-5 混合土の代表的な断層の様子 (左:1G, 右50G, 断層の傾斜角度75度)

4. 考察

(1) 破壊形態に関して

粘着力のない豊浦砂および粘着力のある混合土ともに可動底盤の際から最初に破壊線が形成された（アクリル面側からみて左端の破壊線）。その後、徐々にアクリル面側からみて右の方（可動底盤が上昇する方向側の方）へ破壊線が雁行状に形成された。

ただし、粘着力の有無により左端の次に発生する破壊線は異なる形状をとった。

粘着力のない砂の場合は、図-6に示すように、左端の破壊線が地表面に到達した後に次にその右側の方の破壊線が進展するが、この原因は左端の破壊線で破壊した右側の土塊の自重により斜面崩壊のような形で次々に破壊進展したものと考えられる。

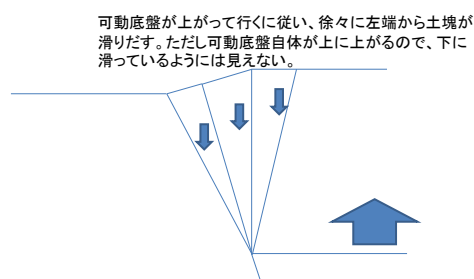


図-6 粘着力のない砂の場合の破壊の概念図

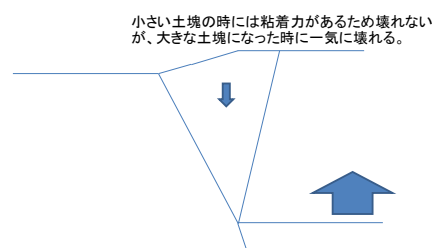


図-7 粘着力のある混合土の場合の破壊の概念図

一方、粘着力のある混合土の場合も基本的には粘着力のない砂の場合と同様に、左端の破壊線が地表面に到達した後に、土塊の自重により次の破壊線が右側に進展するが、土塊の大きさが小さい場合には、粘着力の影響により明確な破壊線は形成されずに連続的に変化する、土塊が大きく自重に粘着成分（粘着力）が耐えきれなくなった場合に大きく破壊が生じたと考えられる（図-7）。このように、粘着力の有無により最初の破壊の次からの自重による破壊は異なるが、強制的な断層の動きによる左端の破壊は両者で似通った挙動を示したものと考えられる。

(2) 拘束圧の影響

1G 場（重力加速度場）と遠心加速度場 50G 場との最初に生じる破壊線の位置（以降左端位置）の違いを検討した。

図-8 と図-9 に破壊線の左端の位置を図でまとめたものを示す。なお、これらの位置は図-10 に示すように、断層発生初期位置を基準として、地表面に現れた亀裂の左端の位置までの距離を W とするとともに、地盤厚さを H 、可動底盤の鉛直上方への移動距離を V とした。層厚 $H10\text{cm}$ の土槽に対して、可動底盤の上昇量は $V=1.49\text{cm}$ 程度である。

豊浦砂の場合、断層の傾斜角度が 60 度の場合でも 75 度の場合でも、相対密度の変化にもよらず拘束圧の違いによる左端位置の変化はあまりなかった。

一方、混合土の場合、左端の位置は拘束圧が大きくなると断層発生位置に近づく方へ移動した。この傾向は断層の傾斜角度が 75 度で顕著である。

このように、材料の違いにより左端の位置に及ぼす拘束圧の影響は異なる結果が得られた。

このような材料による左端位置の拘束圧による違いが生じる原因は両者の粘着力の有無が考えられる。豊浦砂の場合の左端の破壊は断層発生を模擬した強制的な変位により破壊が生じた結果であり、強制的なせん断破壊が主要因となっている。そのため、強制的なせん断方向に対して摩擦角 ϕ が支配的となり破壊が生じるが摩擦角自体は拘束圧にあまり影響されないため同等の角度で破壊が生じたものと考えられる。

一方、粘着力がある混合土の場合には粘着力があるため拘束圧が小さい範囲と拘束圧が大きい範囲で破壊面の角度が異なることが原因となり拘束圧により異なる角度の破壊面で壊れると考えられる(図-11)。特に粘着力の成分に大きく影響をうける拘束圧の小さい範囲(地表面付近)で破壊形態が大きく異なると考えられる。

5. 解析

(1) 解析手法

本研究で用いる解析手法は、2次元平面ひずみ状態において、多重せん断ばねモデル³⁾に基づいて導出された応力-ひずみ関係に、ひずみ依存性や破壊の影響を考慮した材料非線形モデルである。なお、多重せん断ばねモデルはばね毎に異なる硬さや強さを与えれば異方性を考慮することも可能であるが、ここでは等方モデルとして扱った。

a) 材料非線形モデル(破壊前)

破壊前の骨格曲線は、微小ひずみからピーク強度に至るまでの幅広いひずみ領域で実験値にフィッティング可能なモデルとして、以下のGHEモデル⁴⁾を用いた。

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{\frac{1}{C_1(\gamma)} + \frac{1}{C_2(\gamma)} \cdot \frac{|\gamma|}{\gamma_r}} \quad (1)$$

ここに、 γ_r : 規準ひずみで、 $\gamma_r = \tau_{a0}/G_0$ であり、 G_0 : 初期せん断弾性係数、 τ_{a0} : 初期規準せん断強度である。また、 $C_1(\gamma)$ と $C_2(\gamma)$ は補正係数である。ここに、 $C_1(0)$ 、 $C_2(0)$ 、 $C_1(\infty)$ 、 $C_2(\infty)$ 、 α 、 β は非線形性を規定するパラメータである。

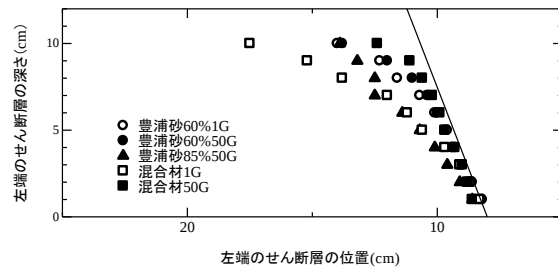


図-8 左端のせん断層の位置 (断層の傾斜角度 75 度)

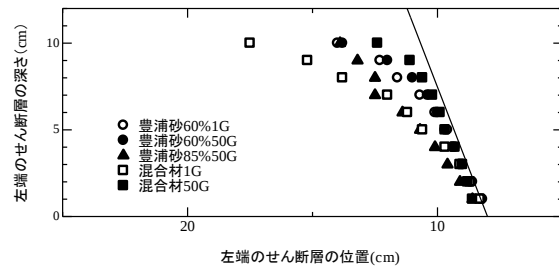


図-9 左端のせん断層の位置 (断層の傾斜角度 75 度)

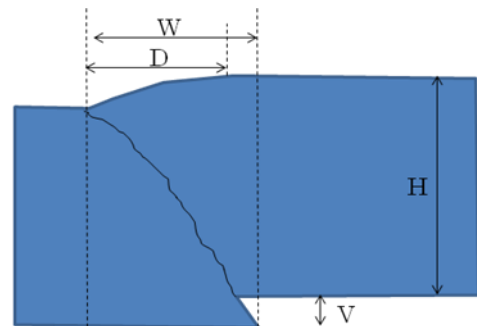


図-10 破壊に伴う位置の概念図

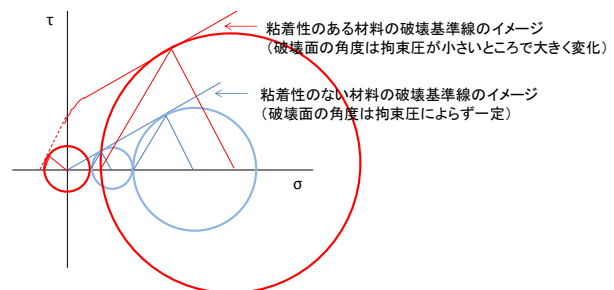
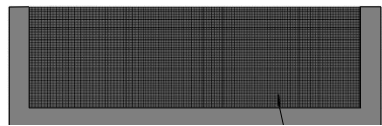


図-11 拘束圧の違いによる破壊面のイメージ



断層の傾斜角度 75 度
図-12 解析モデル

表-2 解析物性値

密度	Mg/m ³	4.2
静・動ポアソン比	—	0.09
静弾性係数	MPa	1.360 $\sigma^{1.03}$
初期動せん断弾性係数	MPa	34.44 $\sigma^{0.32}$
引張り強度	kPa	0.00
せん断強度（健全）	kPa	7.0+ $\sigma \tan 40.9^\circ$
せん断強度（残留）	kPa	2.05 $\sigma^{0.69}$

表-3 解析ケース

	case1	case2	case3	case4
断層の傾斜角度	75 度	75 度	60 度	60 度
遠心加速度	1G	50G	1G	50G

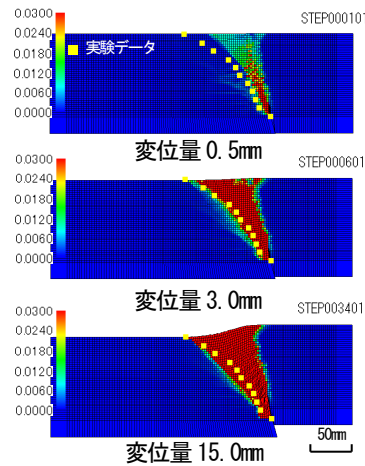


図-13 解析結果（case1）

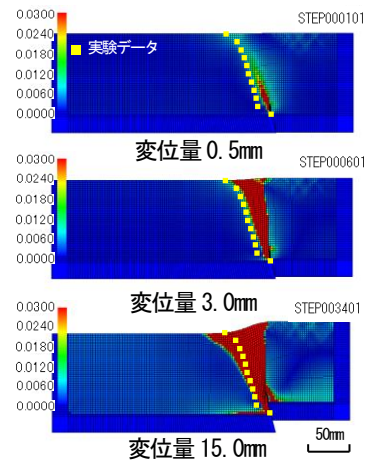


図-14 解析結果（case2）

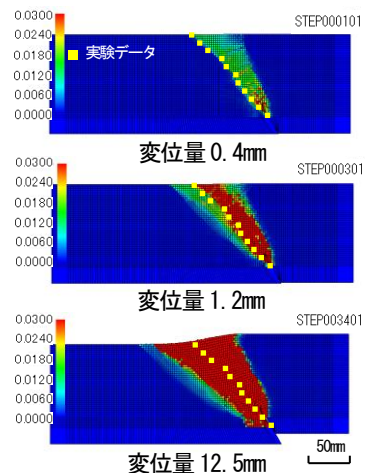


図-15 解析結果（case3）

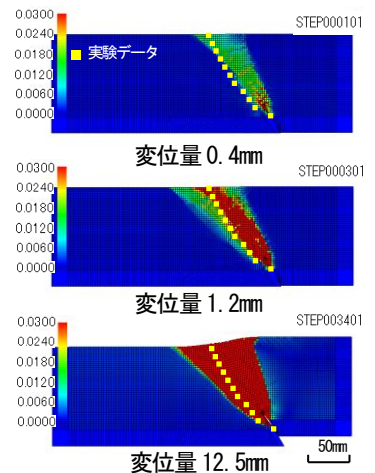


図-16 解析結果（case4）

b) 材料非線形モデル（破壊後）

せん断破壊後の骨格曲線は式(2)に示す双曲線モデルを用いる。なお、破壊後の減衰特性については式(3)と同じ扱いとした。

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{1 + \frac{G_0 \cdot |\gamma|}{\tau_a}} \quad (2)$$

ここに、 τ_a ：規準せん断強度（初期値 τ_{a0} ）である。

せん断破壊後は、双曲線モデルにおける規準せん断強度 τ_a が残留強度 τ_r まで低下する。その際、ひずみ軟化速度を考慮し、せん断ひずみの発生量に応じて、以下の式により徐々に低下する。

$$\tau_a = \tau_r + \frac{(\tau_{a0} - \tau_r)}{A \cdot \gamma^p + 1} \quad (3)$$

ここに、 γ^p ：破壊後の $|\gamma|$ の最大値（破壊ひずみ γ からの増分量）、 A ：ひずみ軟化係数である。ひずみ軟化係数 A は規準せん断強度 τ_a の低下の傾きを決めるパラメータであり、値が大きいほど τ_a が早く低下する。

一方、引張り破壊後は、元々引張り強度がゼロの材料であるため、骨格曲線は変わらない（せん断強度は低下

しない）条件とした。ただし、引張り強度を超える引張り応力については、最小主応力がゼロとなるまでモールの応力円を平行移動し、それに伴う残差力を周囲の要素に配分した。

(2) 解析条件

解析モデルを図-12に示す。境界条件は底面及び側面に土槽との接触条件を考慮してジョイント要素を設置した。

図中の地盤に一部直線で示してあるのは、可動底盤が動くまでの位置である。解析用物性値を表-2、解析ケースを表-3に示す。

(3) 解析結果と考察

図-13～図-16に各ケースにおける強制変位ステップ毎の最大せん断ひずみ分布（変形倍率：1倍）を示す。図には併せて実験終了後に観察したアクリル面側からみた左端の破壊線をプロットで示した。なお、本材料の破壊せん断ひずみは0.03程度である。ここでは、最大せん断ひずみ分布と実験結果の破壊形状の比較を実施した。

解析でも実験結果と同様に初期の最大せん断ひずみに

については、断層破壊位置から進展し、アクリル面側から見た場合に、左側から破壊が生じて、徐々にその右側が破壊した。

また、解析結果を実験結果のプロットと比較したところ、実験終了時の解析結果に比べて試験初期の解析結果の方が実験結果と一致する傾向となった。この原因は、地盤の破壊線が地表面に達するまで（最大せん断ひずみ分布の0.03となる領域が地表面まで繋がるまで）は解析が実験結果を表現しているが、その後は、FEMの適用限界で表現が困難となっていることを示唆する結果である。破壊後にも破壊領域が進展していく結果となった可能性が高い。

せん断ひずみに至るまでの現象はFEM解析により再現された。しかしながら、せん断ひずみに達した後の挙動の再現解析に関しては、今後、FEMと個別要素法をカップリングしたような手法の開発が望ましいと思われる。

一方、せん断破壊ひずみに達するまでの挙動に対する拘束圧の影響を見ると、遠心加速度比を増加させた場合には、破壊領域がせまくなる傾向が解析でも表された。このように解析においても拘束圧の影響によりせん断帯の幅が小さくなったのは、拘束圧が大きくなると破壊された要素の持つ応力の周囲への再分配がせまくなることが原因と思われる。

以上のように、適切な設定を行えば、FEMでも地震時に発生する地表付近の断層の挙動・形態を再現できるものと考えられる。

6. まとめ

本検討では、粘着力のない豊浦砂と粘着力のあるステンレスと砂鉄を混合した混合材を用いて地盤を作製し、重力場と遠心加速度 50G 場で、断層の傾斜角度 60 度および 75 度で断層を発生させる実験を実施した。その結果、以下のことが示された。

(1) 粘着力のない豊浦砂よりも粘着力のある混合材の方が拘束圧の影響を受け、拘束圧が大きい場合にせん断帯の幅がせまくなることが明らかとなった。また、砂で見られた雁行状の破壊は不明瞭になった。

(2) 適切に引張り破壊および引張り破壊後のせん断強度をモデル化することにより、FEM でも地震時に発生する地表付近の断層の挙動・形態を再現できるものと考えられる。ただし、せん断ひずみに達した後の挙動の再現解析に関しては、今後、FEM と個別要素法をカップリングしたような手法の開発が望ましいと思われる。

参考文献

- 1 森本拓也，清水啓之，大津正志：切土斜面における地震時崩壊挙動の評価手法に関する考察，電力土木，No.382，pp9-14，2016
- 2 上田圭一，谷和夫：基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討（その2），電力中央研究所研究報告，U98048，1999
- 3 Towhata,I. and Ishihara,K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.1, pp.523-530, 1985
4. Tatsuoka,F. and Shibuya,S.: Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, Proc. 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pp.101-170, 1992

FUNDAMENTAL STUDY ON GROUND FRACTURE BEHAVIOR OF FAULT BY CENTRIFUGE MODEL EXPERIMENTS

Kunihiko NAKAMURA, Kosuke HIDAKA, Masataka SAWADA, Makoto ISHIMARU and Tetsuji OKADA

Centrifugal fault model experiment using Toyoura sand with no adhesiveness and mixed soil with adhesiveness was carried out. Experiments were conducted to generate faults at fault angles of 60 degrees and 75 degrees at gravity field and centrifugal acceleration 50 G field. The following was shown.

- (1) It was revealed that the mixed material was affected by the restraint pressure more than Toyoura sand and the shear band width narrowed when the restraint pressure was large.
- (2) By appropriately modeling the shear strength after tensile fracture, it is considered that it can be reproduced the behavior and form of the fault near the ground surface by FEM.