

断層変位による構造物への影響評価のための実験および解析

室山拓生^{*1}・船津貴弘^{*1}・塩崎 功^{*2}

重要構造物の直下において想定していなかった副断層による変位が生じた場合に、構造物にどの程度の影響が生じるかを事前に把握し、必要に応じて対策を検討しておくことは、断層変位に対する工学的な対策を検討するための重要である。筆者らは、構造物直下において副断層を想定した断層変位による構造物への影響について、模型実験と数値解析から影響評価を試み、模型実験結果を個別要素法により再現することにより、断層変位が構造物に与える種々の影響の傾向を把握し、定性的に評価することができた。

キーワード： 模型実験, 断層変位, 土圧, 地表面変位, 個別要素法

1. はじめに

地震時に主断層の周辺に副次的に発生する副断層の発生位置を事前に特定することは困難である。したがって、重要構造物の直下において想定していなかった副断層による変位が生じた場合に、構造物にどの程度の影響が生じるかを事前に把握し、必要に応じて対策を検討しておくことは、断層変位に対する工学的な対策を検討するための重要事項となる^{1),2),3)}。

筆者らは、構造物直下において副断層を想定した断層変位による構造物への影響について、模型実験と数値解析から定量的に評価することを目指している^{4),5)}。本論では、重力場の模型実験および個別要素法を用いた再現解析の結果について報告する。

2. 模型実験概要

模型の縮尺は、想定する重要構造物の実スケールの1/500とした。相似則は土構造物の模型実験に適用可能な力の比と用いる方法⁶⁾を適用し、本実験では1G場で

密度比は1、応力比は1/500となる。模型地盤に設置した副断層を模擬した弱層に強制変位を与えて周辺地盤や直上に設置した模擬構造物の変位や作用する土圧を計測した。図-1に実験模型の断面図を、表-1に実験模型に使用した地盤材料の強度特性値および変形特性値を示す。本実験では、断層面(弱層)を基盤層内にあらかじめ配置し、電動ジャッキにより一定速度(1cm/s)で強制的に断層変位を発生させた。図-2に断層変位実験の例(標準ケース:8K-10-G-C)を示す。

実験における最大変位量は43mmである。基盤層・断層(弱層)表層および構造物の位置の組合せを変えて、表-2に示す全12ケースの断層変位実験を実施した。

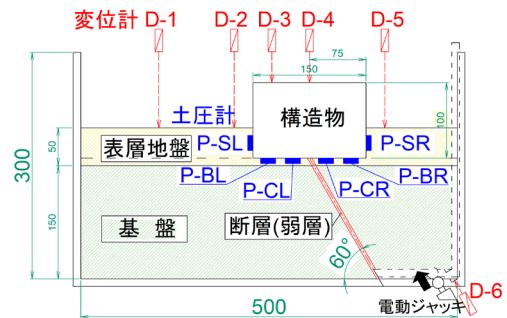


図-1 実験模型断面図および測定器の構成

表-1 実験模型に使用した地盤材料の強度・変形特性

材料名称	記号	強度特性					せん断試験	対象箇所
		粘着力	内部摩擦角	一軸圧縮強度	変形係数	ベーン		
		c (kN/m ²)	Φ(°)	qu (kN/m ²)	E ₅₀ (MN/m ²)	τv (kN/m ²)		
8号珪砂	8K	13.38	30.3	-	-	-	表層	
4号珪砂	4K	11.08	37.2	-	-			
グリス	Gre	0.37	0.0	-	-	0.52	断層(弱層)	
珪砂7号+石膏5%	Gy05	-	-	26.19	2.04	-	基盤層	
珪砂7号+石膏10%	Gy10	-	-	101.96	41.1	-		

*1 土木研究部 *2 一般財団法人 エンジニアリング協会

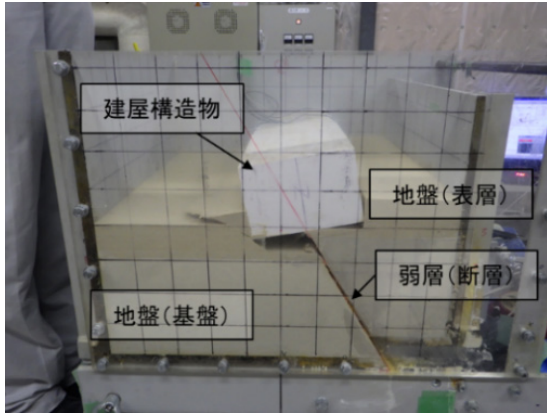


図-2 断層変位実験の例 (標準ケース: 8K-10-G-C)

3. 模型実験結果

図-2に示した標準ケース(8K-10-G-C)では、あらかじめ弱層として設置した断層面で変位し、最大変位時には構造物を点で支えるような状況となった。図-3、図-4は実験ケース8K-10-G-Cの計測結果である。それぞれ断層変位量と地表面および構造物上面変位量の関係、断層変位量と土圧の関係を整頓している。

図-3より、不動側では変位はほとんどなく、移動側で断層変位に対して直線的に変位する傾向が確認できた。また、構造物に取り付けた土圧計の結果(図-4)から断層が1~2mm(実変位量換算で50~100cm)変位する間に、底面の断層直近かつ移動側のセンサー(P-CR)で比較的大きな土圧が観測され、側面(P-SL・P-SR)においても土圧が上昇し、その後側面土圧は低下傾向を示した。

断層変位に伴う地表面変位は、図-5に示すように、構造物の右(移動側)で断層変位に相当する1mmの変位が生じ、左(不動側)に向かって傾斜し、変位量が減少

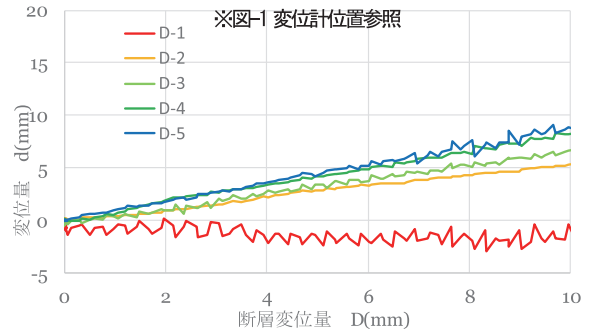


図-3 断層変位と地表面変位量の関係 (8K-10-G-C)

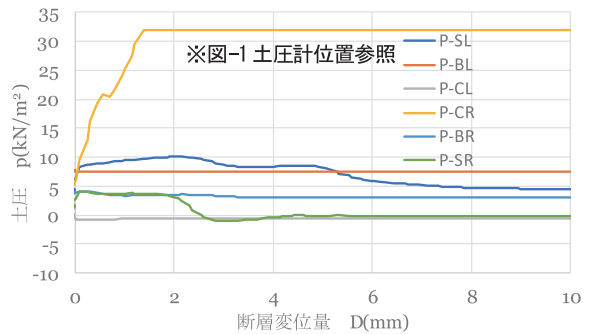


図-4 断層変位と土圧の関係 (8K-10-G-C)

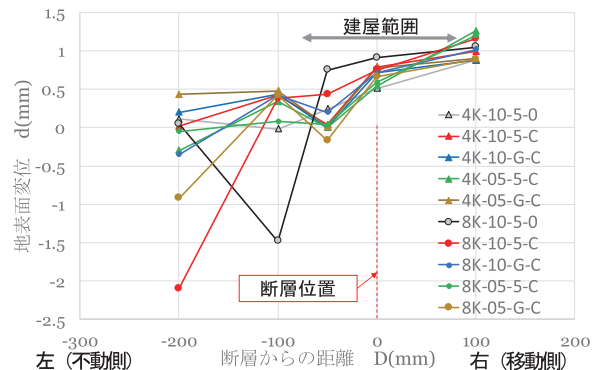


図-5 各ケースにおける地表面変位(断層変位1mm)

表-2 断層模型実験実施ケース一覧表

ケース名	表層	基盤	断層(弱層)	構造物	実験目的
	8号:自立(30%) 4号:非自立(w=0%)	Gy10:100 kN/m ² Gy05:20 kN/m ²	Gy05:20 kN/m ² グリス:0.5kN/m ²	石膏 (Gy100)	
8K-10-5-0	8号珪砂	Gy10	Gy05	なし	断層変位時の地表面変位 (基本データ)の取得
4K-10-5-0	4号珪砂	Gy10	Gy05	なし	
8K-10-5-C	8号珪砂	Gy10	Gy05	中央	断層変位時に 地盤特性が構造物に与える影響 を検討
8K-10-G-C	8号珪砂	Gy10	グリス	中央	
8K-05-5-C	8号珪砂	Gy05	Gy05	中央	
8K-05-G-C	8号珪砂	Gy05	グリス	中央	<検討する「地盤特性」> ・表層の強度・剛性 ・基盤層の強度・剛性 ・断層(弱層)の強度・剛性
4K-10-5-C	4号珪砂	Gy10	Gy05	中央	
4K-10-G-C	4号珪砂	Gy10	グリス	中央	
4K-05-5-C	4号珪砂	Gy05	Gy05	中央	
4K-05-G-C	4号珪砂	Gy05	グリス	中央	構造物と断層(弱層)の 位置関係による影響検討
8K-10-5-R	8号珪砂	Gy10	Gy05	右寄せ	
8K-10-5-L	8号珪砂	Gy10	Gy05	左寄せ	

表-3 模型実験および解析結果（後述）における土圧値の比較

項目	実験・解析結果	実物大での応力 1/λ=模型/実物 λ=500	コンクリート躯体の 設計基準強度	地盤の限界支持力度 (想定)
	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²
模型実験	44.6(変位1mm)	22300(変位50cm)	29400	20400
DEM解析	36.6(変位1mm)	18300(変位50cm)		

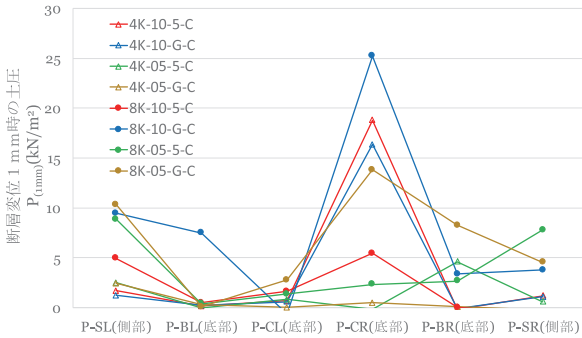


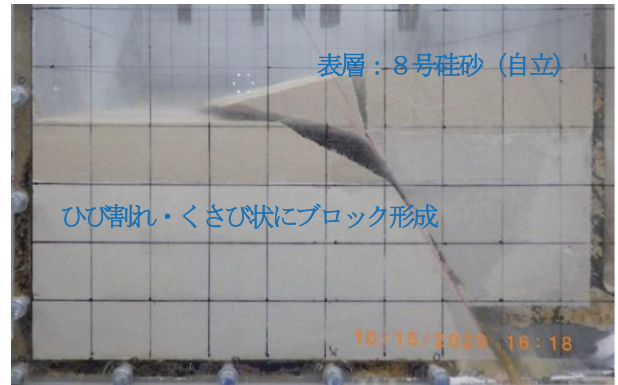
図-6 断層変位1mm時の土圧計測結果

する傾向が確認できた。構造物の左(移動側)では、-100mmで5mm程度の上方向への変位が確認されたケースが多く、これらのケースではくさび状のブロックが形成されるか、構造物に押されて隆起しており、範囲は表層地盤の地盤特性(受働崩壊角)によって決定されるものと推察される。

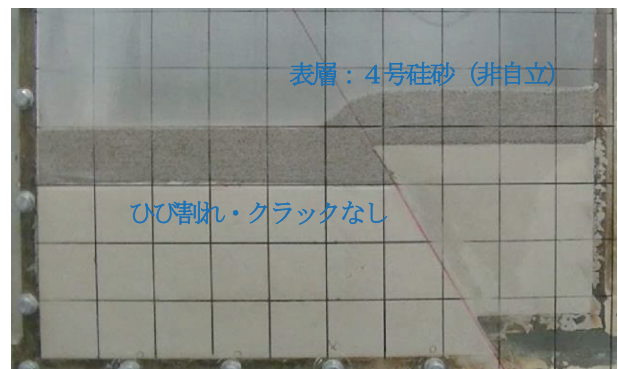
また、断層変位を受ける構造物では、底面の一部に局所的な土圧の増加が見られた。想定される副断層の実スケールにおける変位量は50cm程度であり、模型実験で相当する変位は1mmである。この変位が生じた時点の土圧データを、相似則⁶⁾に基づいて、想定する重要構造物に作用する土圧に換算した(表-3)。その結果、地盤構成や断層の強度等によらず、断層変位により発生した土圧荷重の増加量は、底盤コンクリートの設計基準強度に比べるとやや小さく、断層変位によって受ける荷重の影響は、基礎が破壊されるほど大きなものではないと推察される。現在曲げの影響は考慮していないため、今後構造計算等で荷重による影響の詳細を明らかにする予定である。

断層変位時の地表面変位状況を確認するための構造物のない実験ケース(8K-10-5-0, 4K-10-5-0)における断層変位40mmにおける変位状況を図-7に示した。

表層地盤がやや湿潤して自立するケース(8K-10-5-0)では、表層部にひび割れが入り、くさび状のブロックを形成した。一方表層地盤が自立しない実験ケース(4K-



(a) 8K-10-5-0



(b) 4K-10-5-0

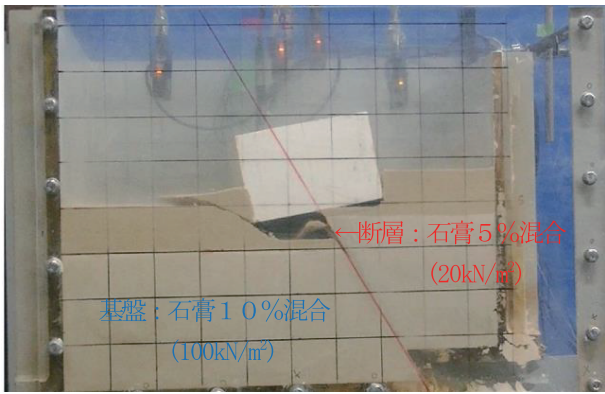
図-7 構造物のないケース

10-5-0)では、ひび割れは生じず、地表面が緩やかに変化し、断層変位による段差を表層が吸収したような形となった。

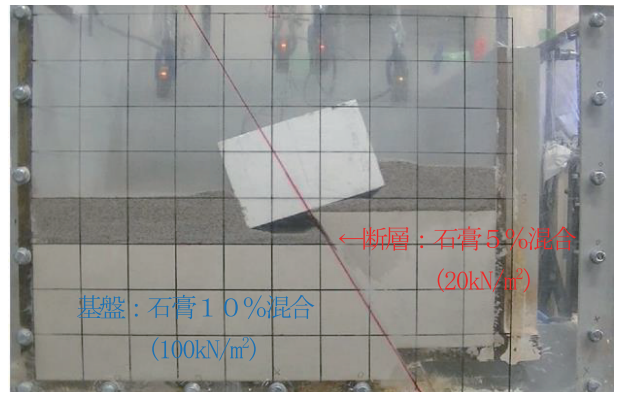
構造物のあるケースで表層が自立する(図-8(1)~(4))場合、断層および基盤の強度によらず、左(不動)側にくさび状のブロックを形成し、移動土塊の一点で支持されるような変状状況となり、それぞれのケースで大きな違いは認められなかった。

構造物のあるケースで表層が自立しない(図-8(5)~(8))場合では、右(移動)側にも変状が生じる範囲が拡大し、小さなくさびを形成したが、断層および基盤の強度による明瞭な違いは認められなかった。

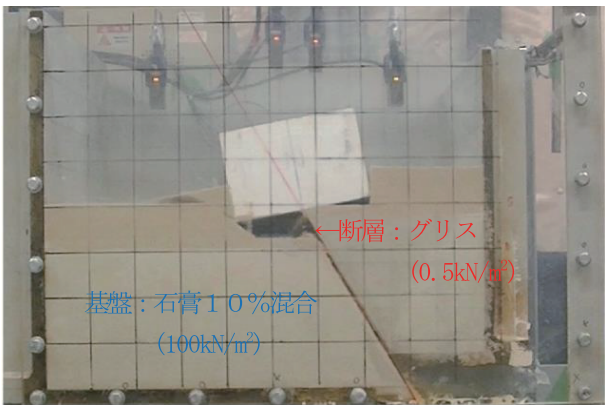
また、断層の強度と基盤の強度を等しくしたケース(4K-5-5-C)では、断層内で変位せず、上部の構造物を



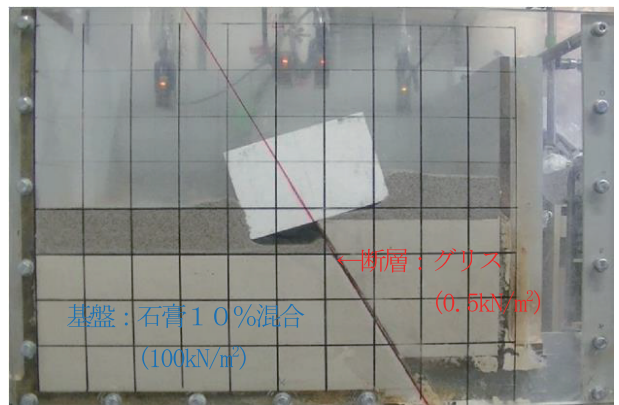
(a) 8K-10-5-C



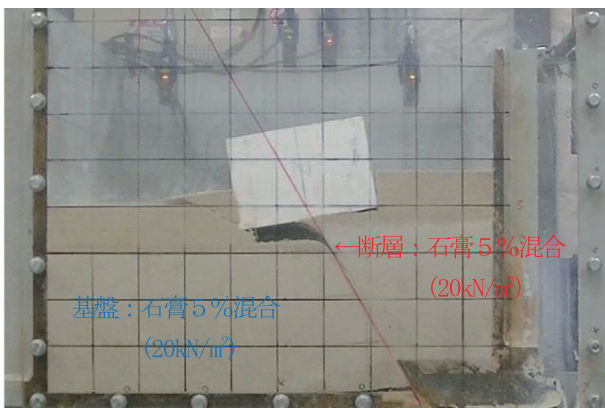
(e) 4K-10-5-C



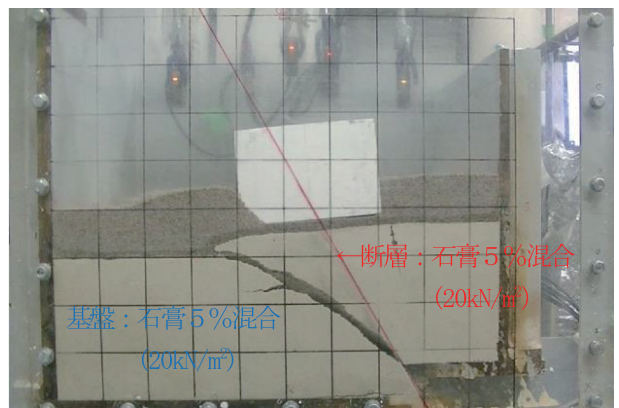
(b) 8K-10-G-C



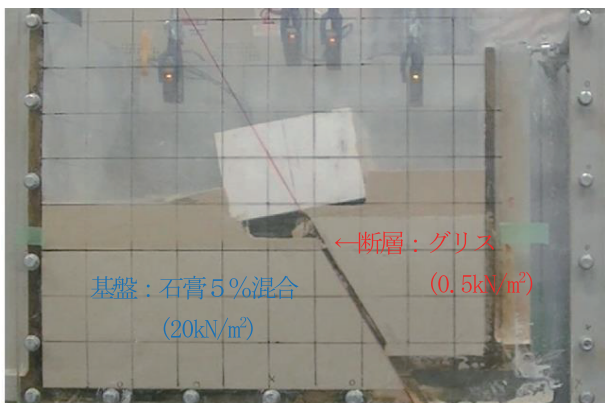
(f) 4K-10-G-C



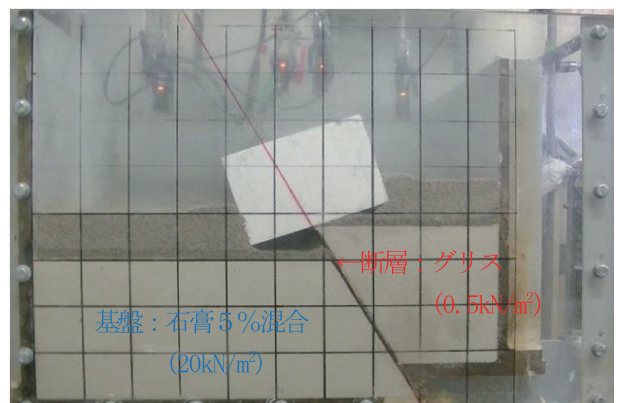
(c) 8K-5-5-C



(g) 4K-5-5-C

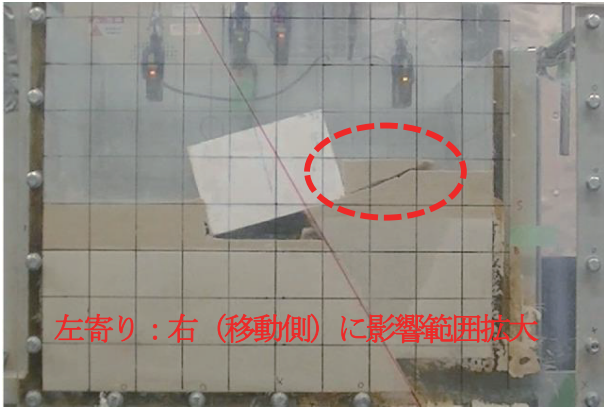


(d) 8K-5-G-C



(h) 4K-5-G-C

図-8 構造物が中央にあるケース



(a) 構造物が左寄りのケース (8K-10-5-L)



(b) 構造物が右寄りのケース (8K-10-5-R)

図-9 構造物が左右に寄ったケース

避けるように新たな断層を形成するような変状が生じた (図-8(7))。

構造物の重心が断層位置からずれている場合、図-9より、これまでのケースと変状範囲が異なる結果となった。特に構造物が断層位置より左寄りのケース (構造物が不動側にずれていた場合) では、右 (移動) 側に変状範囲が大きく拡大するため、対策などの範囲を設定する際に考慮が必要である。

4. 解析結果

模型実験の挙動を再現するため、個別要素法 (DEM) による数値解析を実施した。数値解析では、断層の変位が構造物に与える影響について検討した。検討対象としたパラメータは、①副断層の発生位置と構造物の位置関係、②基盤岩の力学特性 (硬・軟)、③表層土の力学特性である。断層の変位は大変形であり不連続的な現象であるため、そのような現象を取り扱うことが可能な数値解析手法として個別要素法を適用した (Itasca 社製の PFC2Dver.4.0)。個別要素法解析では図-10 に示した赤の破線のハッチング領域をモデル化した。

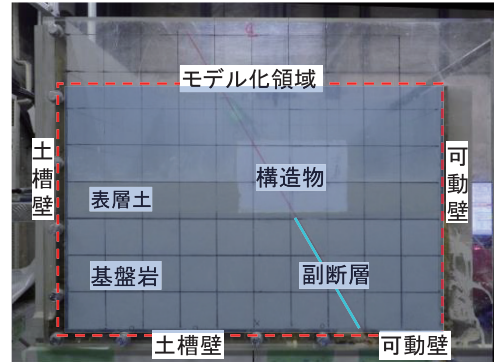


図-10 数値解析におけるモデル化範囲

図-11 に個別要素法 (DEM) によるモデルを示す。図-11(a) は構造物がない場合のモデル、図-11(b) は構造物がある場合のモデルである。図中の黄色の粒子は基盤岩、青色の粒子は表層土、グレーの粒子は構造物を表している。また、副断層 (厚さ 5 mm) は水色の粒子で示している。基盤岩と表層土の両端と底面は壁要素で作成し、断層の変位は実験と同様に右側の壁および右下の赤色で示した部分の壁を 60 度で強制的に変位させた。

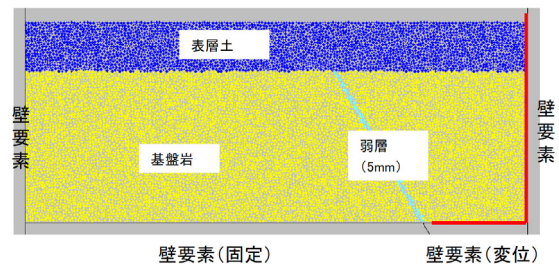


図-11(a) DEM 解析モデル (構造物がない場合)

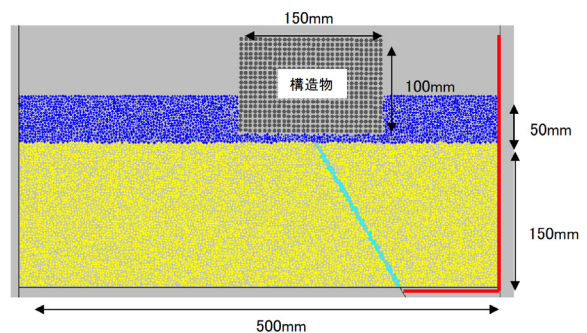


図-11(b) DEM 解析モデル (構造物がある場合)

個別要素法における入力パラメータを設定するために基盤材料 (石膏 10% 混合硅砂: 100kN/m²) (以降、基盤 (硬)) および (石膏 5% 混合硅砂: 20kN/m²) (以降、基盤 (軟)) の一軸圧縮試験等の要素試験を実施し、実験結果と個別要素法による解析結果を比較した。表-4 に一軸圧縮試験の解析結果と実験結果から得られた一軸圧縮強度および変形係数の比較表を示す。同解析結果から基盤 (硬) の一軸

圧縮強度は 99.4kN/m²、変形係数は 47.6 MN/m²となる。この結果は、実際に用いた試験体の力学特性（一軸圧縮強度 100 kN/m²、変形係数 40 MN/m²）と同程度である。同様に基盤（軟）についても解析結果は実験結果を良く再現している。表層については、三軸圧縮試験の解析を実施し、粘着力および内部摩擦角の比較を行った。その結果を表-5に示す。4号珪砂および8号珪砂のいずれも、粘着力と内部摩擦角は解析結果と実験結果はほぼ一致している。以上の結果から設定したパラメータの一覧を表-6に示す。

表-4 基盤岩の解析結果と実験結果の比較

材料名称	記号	DEM/ 実験	強度特性	
			一軸圧縮強度	変形係数
			qu (kN/m ²)	E ₅₀ (MN/m ²)
基盤(軟)	Gy05	DEM	26.4	1.98
		実験	26.19	2.04
基盤(硬)	Gy10	DEM	99.4	47.6
		実験	101.96	41.1

表-5 表層土の解析結果と実験結果の比較

材料名称	記号	DEM/ 実験	強度特性	
			粘着力	内部摩擦角
			c (kN/m ²)	Φ(°)
8号珪砂	8K	DEM	13.8	30.3
		実験	13.38	30.3
4号珪砂	4K	DEM	10.6	38.3
		実験	11.08	37.2

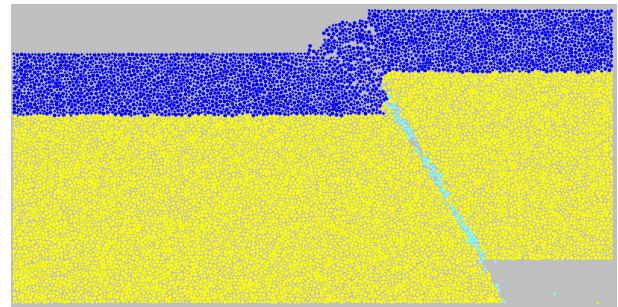
表-6 入力パラメーター一覧（基盤（硬））

マイクロパラメータ	単位	値
最小粒子半径	m	1 × 10 ⁻³
最大粒子半径と最小粒子半径の比	-	2
粒子の密度	kg/m ³	3169
粒子の接触係数	Pa	40 × 10 ⁶
粒子の垂直方向とせん断方向の剛性の比	-	2.5
粒子間の摩擦係数	-	0.2
パラレルボンドの接触係数	Pa	40 × 10 ⁶
パラレルボンドの垂直方向とせん断方向の剛性の比	-	2.5
垂直方向強度の平均値	Pa	100 × 10 ³
垂直方向強度の標準偏差	Pa	10 × 10 ³
せん断方向強度の平均値	Pa	40 × 10 ³
せん断方向強度の標準偏差	Pa	5 × 10 ³

基盤岩が硬く構造物を有しないケースの実験結果と解析結果を図-14、図-15に示す。実験と解析の結果を比較すると、断層に沿ったすべりが生じている点、および8K-10-5-0で表層に鉛直のひび割れ・変状が生じ、ブロックが形成されている点、4K-10-5-0で表層の変状が緩やかな点などが良く一致していることが分かる。

基盤岩が硬く構造物を有するケースの実験結果と解析結

果を図-16に示す。構造物がある場合には、断層のせり上がりにより、構造物が表層土を押し出して崩壊が生じている。大変形時には構造物が傾斜して底面と地盤が点で接触する状態になっている。構造物と周辺地盤との接触力の分布を図-16(b)に示す。接触力は黒の実線で示されており、線の太さが作用する力の大きさを表している。同図からも構造物の底面に大きな力が生じることが確認された。

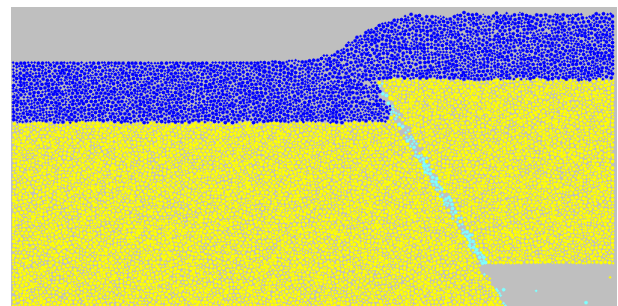


(a) 構造物なしケース (8K-10-5-0) の解析結果



(b) 構造物なしケース (8K-10-5-0) の実験結果

図-14 DEM解析と実験結果の比較（表層自立）



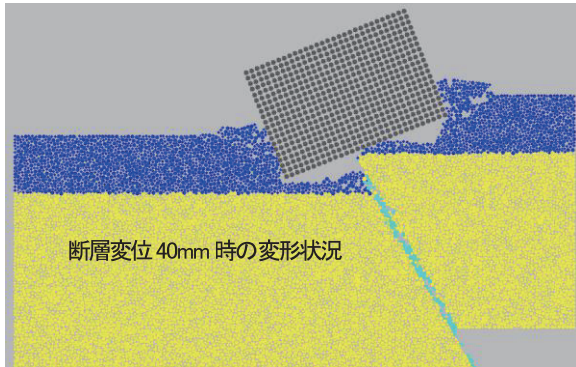
(a) 構造物なしケース (4K-10-5-0) の解析結果



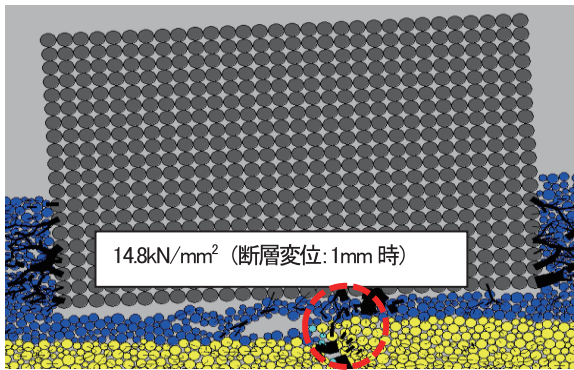
(b) 構造物なしケース (4K-10-5-0) の実験結果

図-15 DEM解析と実験結果の比較（表層自立なし）

地上に建設された重要構造物に及ぼす副断層の変位の影響を検討するために、個別要素法により断層および構造物をモデル化し、実験結果と比較するための解析を実施した。作成したモデルによる解析結果は、断層変位を与えた模型実験結果を概ね再現できた。



(a) 解析結果 (変形図)



(b) 接触力分布

図-16 構造物があるケース (8K-10-5-C) の解析結果

5. おわりに

今回実施した模型実験および個別要素法による解析から、断層変位が構造物に与える種々の影響を定性的に把

握し評価することができた。今後、断層変位による荷重増加が実構造物に対してどの程度の影響を与えるかについての定量的な検討を進める予定である。

また、本実験のような小型模型実験では、表層に作用する有効土被り・応力レベルが極めて小さく、相似則による算出値の精度や適用限界が検討できていない。今後は遠心模型実験の実施および相似則の適用限界についても検討して行きたい。

本研究は（一財）エンジニアリング協会における「エネルギー関連施設に関する活断層の工学的研究会」の活動の一環で実施したものである。研究会メンバーおよび関係各位のご協力に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 平松ほか:活断層の見方・捉え方, 応用地質, 第 59 巻, 1 号, 2018.
- 2) 塩崎ほか: 指針・基準類に見る活断層対策, 応用地質, 第 59 巻, 第 2 号, 2018
- 3) 松浦ほか: 活断層の一般的・平均的なイメージ (一般像・平均像) の把握, 応用地質, 第 59 巻, 第 6 号, 2019.
- 4) 室山ほか: 断層変位による構造物への影響評価のための実験及び解析 (その 1 実験編), 土木学会全国大会, 2021.
- 5) 船津ほか: 断層変位による構造物への影響評価のための実験及び解析 (その 2 解析編), 土木学会全国大会, 2021.
- 6) 香川: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集 275, 69-77, 1978.

Research on experiments and analysis to evaluate the impact of fault displacement under structure

Takuo MUROYAMA, Takahiro FUNATSU and Isao SHIOZAKI

It is important to examine engineering countermeasures for fault displacement in order to grasp in advance the degree of effect generated in the structure, when displacement by a sub-fault which was not assumed is generated directly under an important structure, and to examine countermeasures as necessary. I evaluated the effect on the structure by the fault displacement which assumed a sub fault directly under the structure using model experiment and numerical analysis, and by reproducing the model experiment result by the individual element method, it was possible to qualitatively and quantitatively evaluate various effects of the fault displacement under the structure.