

エア封入袋体による地盤崩壊防止効果の遠心模型実験による検討

豊澤康男*, 堀井宣幸*, 玉手 聡*,
山田知裕**, 羽上田裕章**

Effect of Air-Bag Support for Prevention of Trench Collapse in Centrifuge Tests

by Yasuo TOYOSAWA*, Noriyuki HORII*, Satoshi TAMATE*,
Tomohiro YAMADA** and Hiroaki HAJYOUTA**

Abstract: Accidents due to collapse sometimes occur in trench excavation site. The need for decreasing these accidents is currently one of major concern. Air-bag support can expect laborsaving of trench excavation. However, there are few research results about the air-bag for earth support, and its prevention mechanism for trench collapse is not fully understood.

In this research, the centrifugal model experiment was carried out for the purpose of clarifying the mechanism of the trench collapse prevention by the air-bag support. In this paper, a total of fourteen centrifuge tests were illustrated. The trenches with a height of 125 mm and width of 50 mm were made in the right and left side of the model grounds. The air-bag with a height of 50mm (25 mm and 100 mm for additional tests) and width of 50 mm (prototype size of the air-bag height is 1.0 m at centrifugal acceleration 20 G) was installed in the left-hand side of each trench. The model grounds were made by kaolin clay or the intermediate clay (mixtures of kaolin clay and Toyoura sand), which have different properties, strength, etc. While the centrifugal acceleration was raised gradually, the pressure of air-bag was controlled so that it would reach to 0.02 MPa at a centrifugal acceleration 20 G. The centrifugal acceleration was increased until the both trenches collapsed.

Based on the results of these centrifuge model tests, the deformation and failure mechanisms were discussed. The conclusions are as follows:

- (1) When the air-bag was installed, compared with the trench without air-bag, the trench collapsed at the large centrifugal acceleration for both of clay and intermediated clay models. The air-bag was effective as an earth support for trench excavation.
- (2) The air-bag was effective in controlling the generation of cracks and the strain development in ground, etc. and prevented the trench wall from moving inward.
- (3) FEM analysis using Mohr-Coulomb's failure criterion could follow the elastic behavior with sufficient accuracy. The acceleration generating the plastic strain and the ground displacement could be predicted correctly.

This research was performed as the joint research with Nippon Steel Corporation who developed this air-bag support.

Keywords; Failure, Trench, Earth support, Air bag, Retaining wall, Excavation, Centrifuge, Model test, Safety

1. 研究目的

土砂崩壊による労働災害はここ数年減少傾向にあるが、依然として毎年40名弱が死亡している。これらの半数以上が小規模な溝掘削時の災害であり、溝掘削の安全な施工法の開発・普及による土砂崩壊災害の防止は労働安全上、重要な課題の一つである^{1,2)}。

こうした小規模な溝掘削時の土止めの一形式として簡易土止め(トレンチバッグ)工法がある。本工法は、最近開発されたもので、掘削後の溝内部に軽量の袋体を吊り降ろし、それを空気圧で膨張させることにより掘削壁面を押さえるものである。エア封入袋体(エアバッグ)は軽量で、かつ、空気を抜いた状態ではかさ張らないという特徴があり、従来の土止め工に比べ施工の省力化が期待できる。しかしながら、この方式の土止めについては研究成果が少なく、地盤崩壊防止メカニズムは十分には解明されていない状況である。そこで本研究では、エア封入袋体による地盤崩壊防止効果のメカニズム等を明らかにすることを目的として遠心模型実験及び数値解析を行った。

なお、本研究は、当研究所と当該工法を開発した新日本製鐵(株)との共同研究として行われたものである³⁾。

2. 遠心模型実験

遠心模型実験は、地盤内応力を実物と同じにした模型実験を行うため、実物の縮尺1/nの模型を重力加速度のn倍のところに置いて、実物と同じ自重応力状態を模型地盤内に再現し、これによって模型に実物と同じ挙動を生じさせるものである。

本実験の主な目的は次の3点である。

- 1) エア封入袋体の地盤崩壊防止効果(エア封入袋体による土止めの有効性確認)
- 2) エア封入袋体設置時における地盤崩壊モードの確認(安全管理)
- 3) 数値解析モデル構築のためのデータ蓄積

2.1 遠心力載荷装置

当研究所の遠心載荷試験装置を用いて遠心模型実験を行った。当該遠心載荷試験装置は、有効半径2.3m、最大加速度200G(重力の200倍)、最大積載重量500kgf(4.9kN)の能力を有する。

2.2 模型地盤の作成

模型地盤として、カオリン粘土と中間土(カオリン粘土:豊浦標準砂=1:2重量比)の2種類を用い、粘土試料には、Table 1に示す物理定数のカオリン(NSF

カオリン)を用いた。このカオリンに90%の含水比となるように所定量の蒸留水を加え、攪拌してスラリー状とし、脱気槽に移し替えて真空状態で十分に脱気した後、試料容器(45×10×30cm)に移し替え、ペロフラムシリンダーを用いて所定の最大密圧力の下で最終圧密沈下量に到達するまで一次元圧密した。

中間土の場合もほぼ同様な手法で地盤を作成した。カオリン粘土は40%程度の含水比とし豊浦標準砂を加えて重量比1対2(カオリン粘土:豊浦標準砂=1:2{重量比})で練り混ぜた後、一次元圧密を行った。粘土と中間土は、それぞれ異なる最終圧密圧力(カオリン粘土:0.10, 0.13, 0.16 MPa, 中間土:0.13, 0.16, 0.19 MPa)で一次元圧密して、粘土、中間土とも地盤強度の異なる3種類の地盤をそれぞれ作成した。

なお、これらの一連の作業は、試料の水分中に含まれる空気を完全に取り除くとともに、圧密後の地盤の含水比を一定値に収めることで実験の再現性を担保するために行うものである。一次元圧密荷重、予圧密終了後の地盤の含水比はTable 2に示すとおりである。

2.3 模型掘削溝の成形及びエア封入袋体の設置

圧密終了後、地盤の左右両側に左右対称にFig. 1に示すような掘削溝を成形した。この掘削溝の大きさは両側とも深さ125mm×幅50mm(遠心加速度20G時の換算掘削深さ2.5m、幅1.0m)である。

遠心模型実験用にFig. 2のような袋体を作成した。幅を50mm、奥行きを100mmとし、縦の長さを25mm(小)、50mm(中)、100mm(大)の3とおりとした。

実験(ケース1~12)においては、左側の溝にのみ、袋体(中)を設置した。右側の掘削溝は、土止めを設けない素掘状態とした。なお、実験ケース13及び14は、袋体の大きさの影響を確認するため、右側の溝に袋体(大)と左側の溝に袋体(小)を設置した。

Table 1 Index properties of the kaolin clay.
カオリン粘度の物理定数

液性限界 Liquid limit	48.2%
塑性限界 Plastic limit	34.7%
塑性指数 Plastic index	13.5
比重 Specific gravity	2.73
粒度分布 Grain size distribution	silt 31% clay 69%

2.4 空圧調整装置

空圧調整装置は遠心載荷装置において袋体の中の空圧を調整するものである。当該装置は200 MPaの窒素ガスボンベ、空圧調整弁、3個の電磁弁、リザーバー、圧力センサーから成り、模型袋体内の空気圧を制御室から制御するものである。システム図をFig. 3に示す。

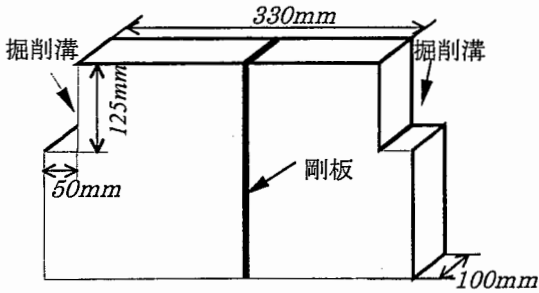
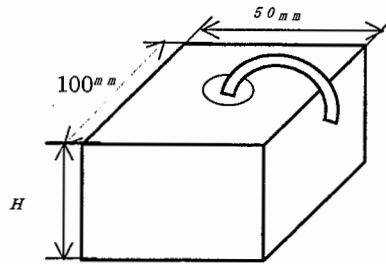


Fig. 1 Model ground. 模型地盤



H : 3種類 (50mm、25mm、100mm)

Fig. 2 Model air bag. 模型実験用袋体

2.5 遠心模型実験方法

本研究では遠心場において掘削過程を再現する方法として遠心加速度を上昇させる方法で実験を行った。本報告のすべての実験は、崩壊に至るまで遠心加速度を上昇させる上記の方法で行った。遠心加速度をほぼ一定率で上昇させ、約5分間で20Gに到達する設定とした。なお、実物の使用圧力は0.01~0.02 MPaであり、安全率は約4とされている。

遠心加速度を上昇させる際に、袋体内圧を遠心加速度20G時に0.02 MPaとなるように徐々に上昇させることによって遠心力の増加に伴う地盤の自重の増加によって地盤に過大な変形が生じないようにした。

遠心加速度が20Gに達した後は、袋体内圧を0.02 MPaにとどめた状態で左右両側の掘削溝が崩壊するまで遠心加速度を上昇させた。なお、計測は、変位計による計測・収録、画像撮影(連続写真撮影及びCCDカメラによるビデオ撮影)により行った。

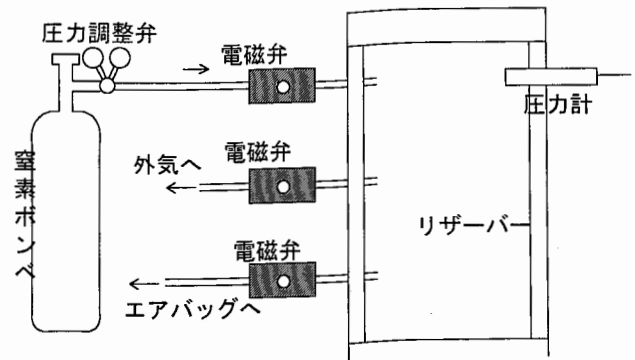


Fig. 3 Air pressure control system. 空圧調整装置

Table 2 Test Conditions. 試験条件

実験ケース		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
項目	袋体	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	有
	サイズ	中	—	中	—	中	—	中	—	中	—	中	—	小	大
土質		粘性土						中間土						粘性土	
地盤強度		弱		中		強		弱		中		強		中	
先行圧密圧力 (MPa)		0.098		0.127		0.157		0.127		0.157		0.186		0.127	
含水比 (%)		52.56		47.58		45.35		20.64		20.00		19.75		49.80	
湿潤単位体積重量 (N/cm ³)		0.0181		0.0189		0.0193		0.0186		0.0236		0.0237		0.0238	

Table 3 Test results.
すべり線発生時、地盤崩壊時の加速度 (粘土地盤)

実験 ケース	土質	地盤 強度	袋体		掘削壁面下部にすべり線発生時			崩壊時 (すべり線の地表面到達)		
			有 無	サイ ズ	加速度 (G)	換算掘削 高さ (cm)	換算袋 高さ (cm)	加速度 (G)	換算掘削 高さ (cm)	換算袋 高さ (cm)
1	粘性土	弱	有	中	18G	225	90	30G	375	150
2			無		14G	175	—	25G	313	—
3		中	有	中	30G	375	150	45G	563	225
4			無		24G	300	—	30G	375	—
5		強	有	中	34G	425	170	46G	575	230
6			無		25G	313	—	36G	450	—
7	中間土	弱	有	中	—	—	—	23G	288	115
8			無		—	—	—	13G	163	—
9		中	有	中	—	—	—	40G	500	200
10			無		—	—	—	25G	313	—
11		強	有	中	—	—	—	40G	500	200
12			無		—	—	—	25G	313	—
13	粘性土	中	有	小	15G	188	38	25G	313	63
14			有	大	40G	500	400	—	—	—

遠心力载荷実験の手順をまとめると次のとおりである。

- a. 模型地盤を遠心模型実験装置に設置する。
- b. 袋体の初期内圧を 0 kPa にする。
- c. 遠心加速度を上昇させ、模型地盤の重力場を 20G にする。この時点で、袋体内圧は 20 kPa とする。(遠心加速度は 10G, 15G, 20G で一旦加速度の上昇を留めて、一定 G のもとで袋体内圧を徐々に上げて所定の内圧とする。)
- d. 地盤崩壊現象が現れるまで、5G/min の速度で角速度を上昇させる。
- e. 地盤崩壊に至った時点で遠心载荷を終了する。

3. 実験結果と考察

実験の全ケース 1~14 について、袋体の有無、土質、地盤強度等の地盤条件について Table 2 にまとめて示す。また、実験結果を Table 3 にまとめて示す。この表中には、掘削壁面下部にすべり線が発生した時の加速度、すべり線が地表面に達し全体崩壊が発生した時の加速度を示してある。

なお、中間土地盤を対象としたケースの場合は、地表面にクラックが発生し、全体崩壊が発生した時の加速度のみを示す。また、実物に換算した掘削高さ、袋体高さを換算高さとして示す。

3.1 粘性土地盤における地盤挙動

粘性土地盤の実験は実験ケース 1 から 6 及び実験ケース 13, 14 の計 8 ケースである。実験ケース 1 及び 2 (地

盤強度：弱) について、遠心加速度 1G, 15G, 20G 及び 30G の時点における模型地盤の変形の様子を Photo 1 に示す。模型地盤の左側が実験ケース 1 (袋体有)、右側が実験ケース 2 (袋体無) である。

袋体を設置してない粘土地盤における溝では、15G (実物換算地盤高 1.8m) で法尻からすべり線が発生し、20G で崩壊が発生した。遠心加速度の上昇に伴って、まず掘削壁面下部にすべり線が発生し、それが地表面に向かって進展し、ついには地表面に小さなクラックが発生すると同時に地盤が滑り出す過程を辿って崩壊した。変形が進行する過程で、掘削壁面がオーバーハングな状態になるようないわゆるトップリング的な崩壊が見られた。

地表面の鉛直変位量と遠心加速度の関係を Fig. 4 に示す。写真と併せて判断すると、掘削部内に倒れるように崩壊していくことが分かる。

一方、袋体を設置した粘性土地盤における溝では、Photo 1 に見られるように、袋体で押さえられている壁面より下部の壁面部分が内側に變形し、次いでその先部にすべり線が発生したが、袋体のない溝で見られたようなすべり線が地表面まで繋がって発生するトップリング的な崩壊は見られず、すべり線が地表まで繋がらなかった。

実験ケース 3 及び 4 (地盤強度：中) について、遠心加速度 1G, 25G, 35G 及び 45G の時点における模型地盤の変形の様子を Photo 2 に示す。Photo 1 と同様に袋体がある方が掘削溝はよく安定している。崩壊状況もほぼ同じ傾向が見られた。

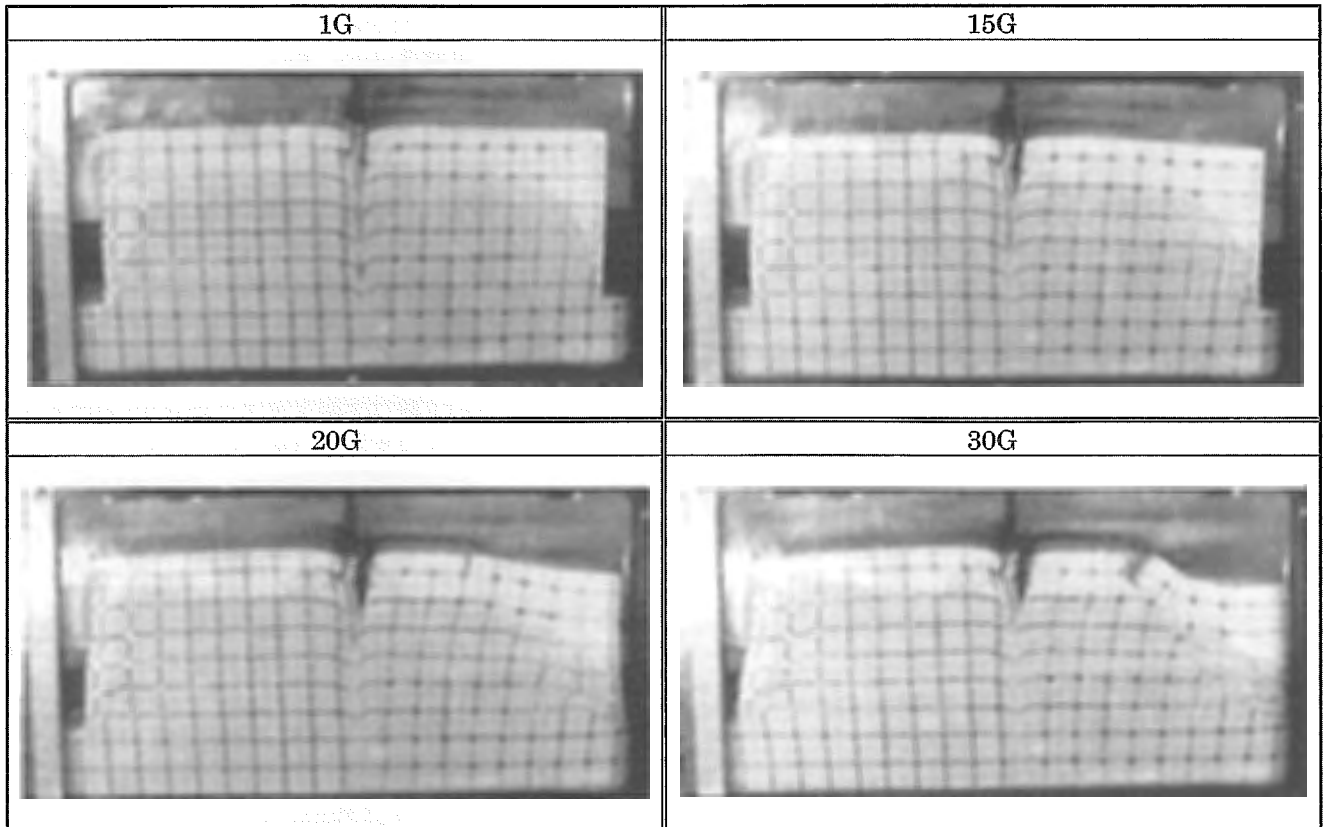


Photo 1 Sequence of failure. (Case 1 and Case 2)
 模型地盤崩壊の進行状況 (ケース 1 とケース 2)

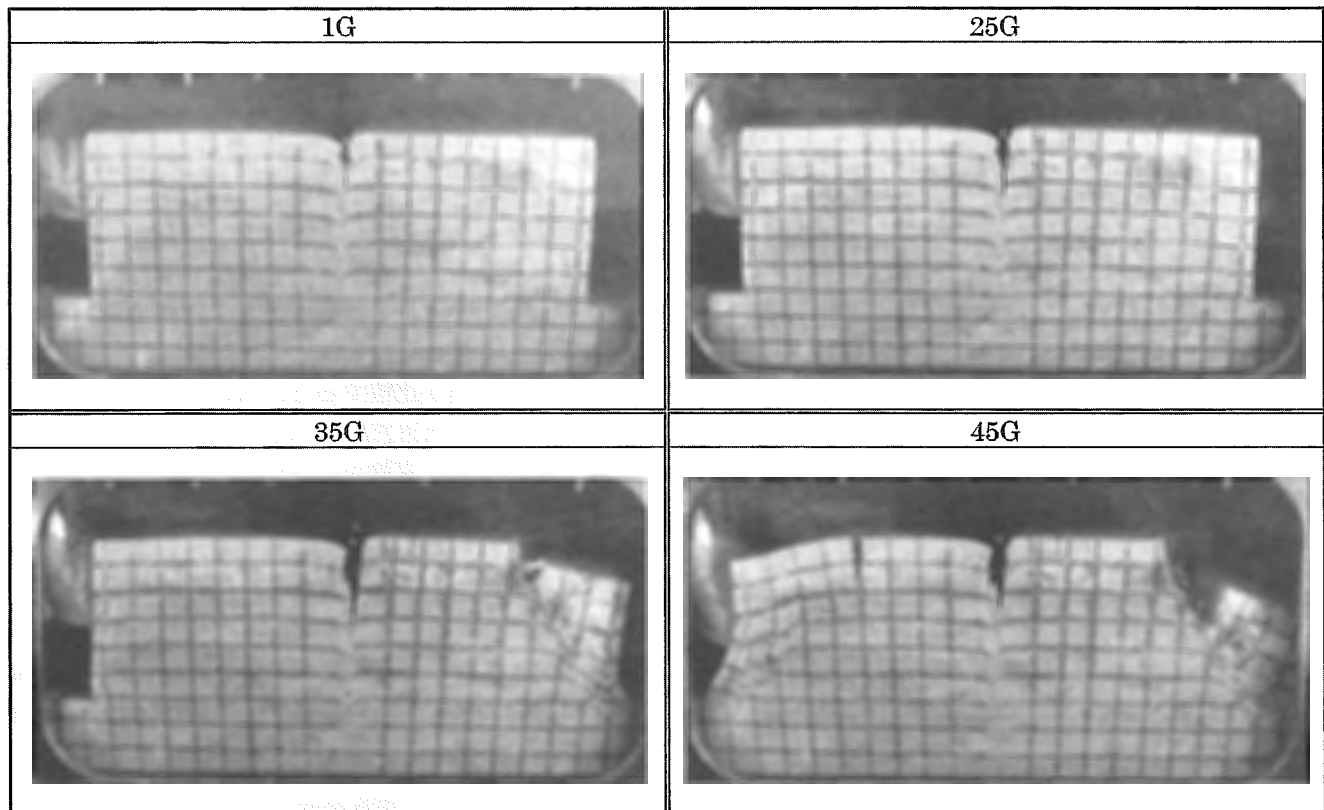


Photo 2 Sequence of failure. (Case 3 and Case 4)
 模型地盤崩壊の進行状況 (ケース 3 とケース 4)

すべり線が発生した時（掘削壁面下部にすべり線が発生した時）の遠心加速度 G を Fig. 5 に示す。また、全体崩壊が発生した時（すべり線が地表面に達した時）における遠心加速度 G について Fig. 6 に示す。

袋体を設置した場合は設置しない場合に比べ、崩壊時の加速度が4割程度大きい結果を得た。袋体の設置は溝崩壊を防止する効果が大きいことが分かる。

地盤強度が大きくなるほど、すべり線の角度が大き

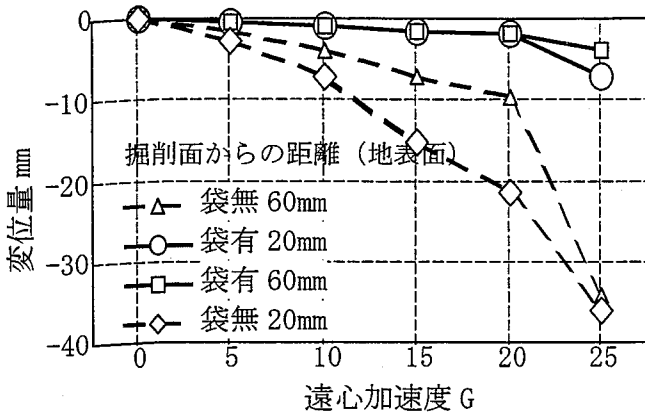


Fig. 4 Settlement of surface.
地表面における鉛直変位量

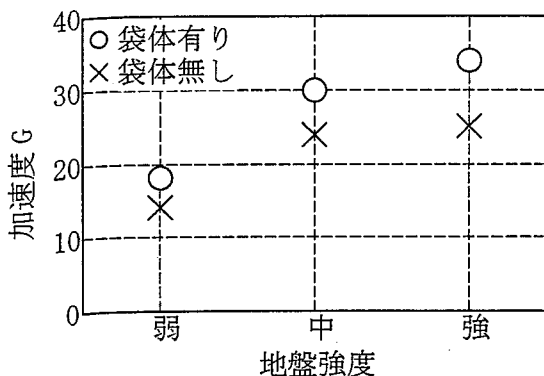


Fig. 5 Acceleration when slip line appeared.
すべり線発生時の加速度

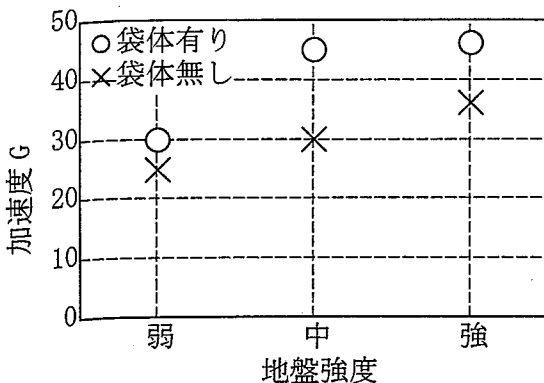


Fig. 6 Acceleration when slip line propagated up to the surface.
すべり線が地表面に到達した時の加速度

くなる傾向が見られた。また、地盤強度（大）のケース6では、地盤強度（小，中）のケース2，ケース4と比べて崩壊前に亀裂が大きく発達した。

亀裂（クラック）の発生で見ると、地盤強度の中と大ではほぼ同じ時点で発生している。通常、引張り強度は地盤強度として考慮されないが、素掘り状態の溝の場合は引張り強度及び亀裂の発生が安定性に大きく影響していると考えられる。

3.2 中間土地盤における地盤挙動

中間土地盤の実験は実験ケース7から12の計6ケースである。実験ケース7及び8（地盤強度：弱）について、遠心加速度1G，10G，15G及び20Gの時点における模型地盤の変形の様子を Photo 3 に示す。模型地盤の左側が実験ケース7（袋体有），右側が実験ケース8（袋体無）である。

袋体の無い中間土地盤（ケース8）は15G（実物換算地盤高1.8m）で法尻からすべり線が発生するとともに、地表面に亀裂が発生しているのが見て取れる。地表面にクラックが発生すると同時にすべり線が発生し地盤の崩壊に至った（Photo 3，参照）。

一方、袋体を設置した地盤は法尻部分に変形しているもののすべり線が地表面まで繋がるような崩壊は発生しなかった。まず袋体下部の溝壁面がはげ落ち、次いで地表面にクラックが発生して変形が進んだ。地表面の鉛直変位量と遠心加速度の関係を Fig. 7 に示す。

粘性土地盤と比べて崩壊まで沈下量が少なく、亀裂の発生とともに崩壊が急激に起こっていることがわかる。

中間土地盤を対象としたケースにおいて、地表面にクラックが発生し、全体崩壊が発生した時の加速度について袋体有無の比較を Fig. 8 に示す。

袋体を設置した場合は、設置しない場合に比べ、崩壊時の遠心加速度が6割程度大きく、粘性土よりも袋体の溝崩壊に対する効果がさらに大きい結果となった。

粘性土の地盤と比較すると、袋体を設置していない場合、亀裂（クラック）が生じやすかつそれが発達する速さが早い。崩壊の初期には、クラック発生箇所より前方部分が掘削内部に倒れるように変形が進行する特徴が見られた。ひずみの解析からも亀裂が発生する時点の体積膨張率は中間土の方が小さいといえる。

掘削溝のような鉛直な掘削面を有する地盤では、亀裂、クラック等の不連続箇所の発生やひずみの発達が崩壊を助長する。引張りに対する強度及び亀裂発達が崩壊の発生に関して重要な因子となっていると考えられる。

エア封入袋体は比較的土圧の少ない浅い掘削壁面を保持することにより、亀裂等の発生を抑制し、掘削壁

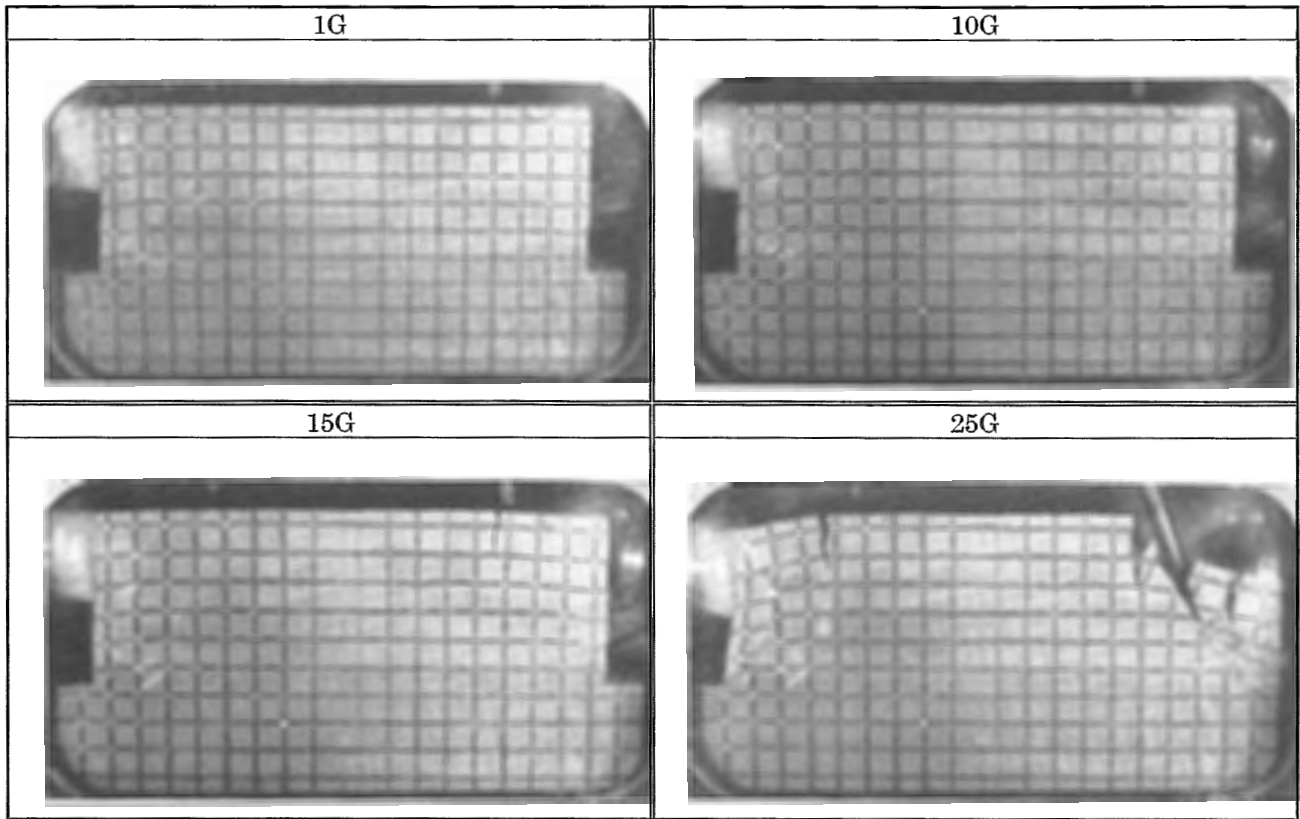


Photo 3 Sequence of failure. (Case 7 and Case 8)
模型地盤崩壊の進行状況 (ケース7とケース8)

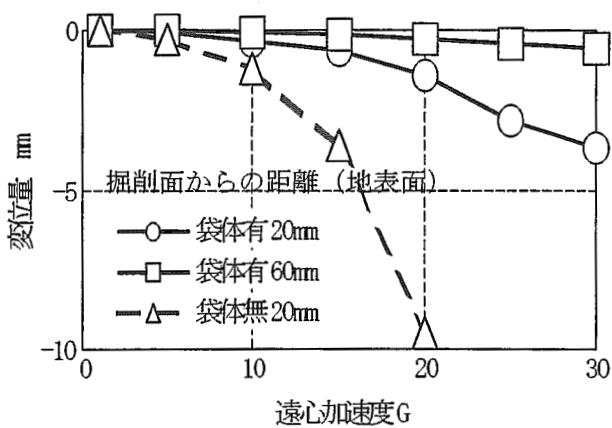


Fig. 7 Settlement of surface.
地表における鉛直変位量

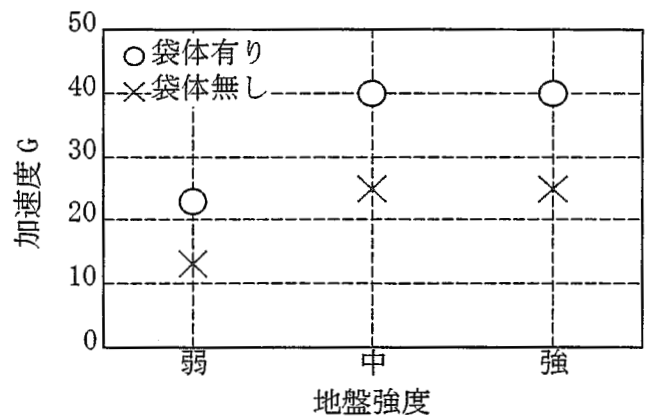


Fig. 8 Acceleration when crack appeared at surface.
地表面にクラックが発生した時の加速度

面が内側へ倒れ込むのを防止し地盤内のひずみの増加を押さえる効果があると認められた。この効果によって掘削地盤を保持しているものと考えられる。

なお、本工法は掘削後も自立する掘削溝に適用されるものであり、エア封入袋体にかかる空気圧以上の土圧が負荷する状態において作業者が溝内に入る場合は地盤に応じた強固な土止めを設置する必要がある。

4. 数値解析

溝掘削のある地盤をモデル化し (Fig. 9 及び Fig.

10 参照), 種々の地盤, 土止め条件における土止め効果を推定する手法を構築するとともに, エア封入袋体による土止め効果について実験結果との比較を行った。

計算の入力データは一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験から算定し, 実験の検証データとしては前述の遠心模型実験結果を用いた。

4.1 解析モデル及び解析手順

地盤解析モデルは四辺形平面ひずみ要素を用い, 破壊基準としては Mohr-Coulomb の破壊基準を適用した。

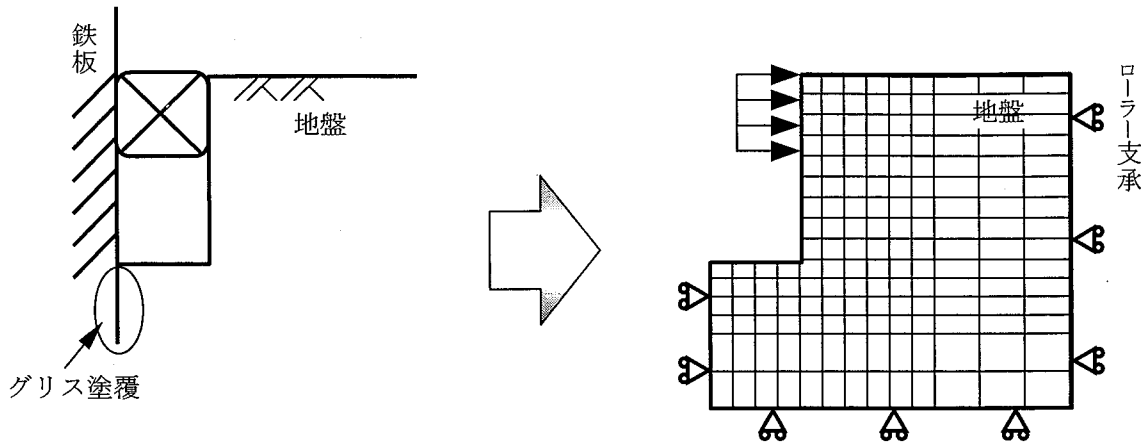


Fig. 9 Model concept for FEM analysis.
実験地盤のモデル化

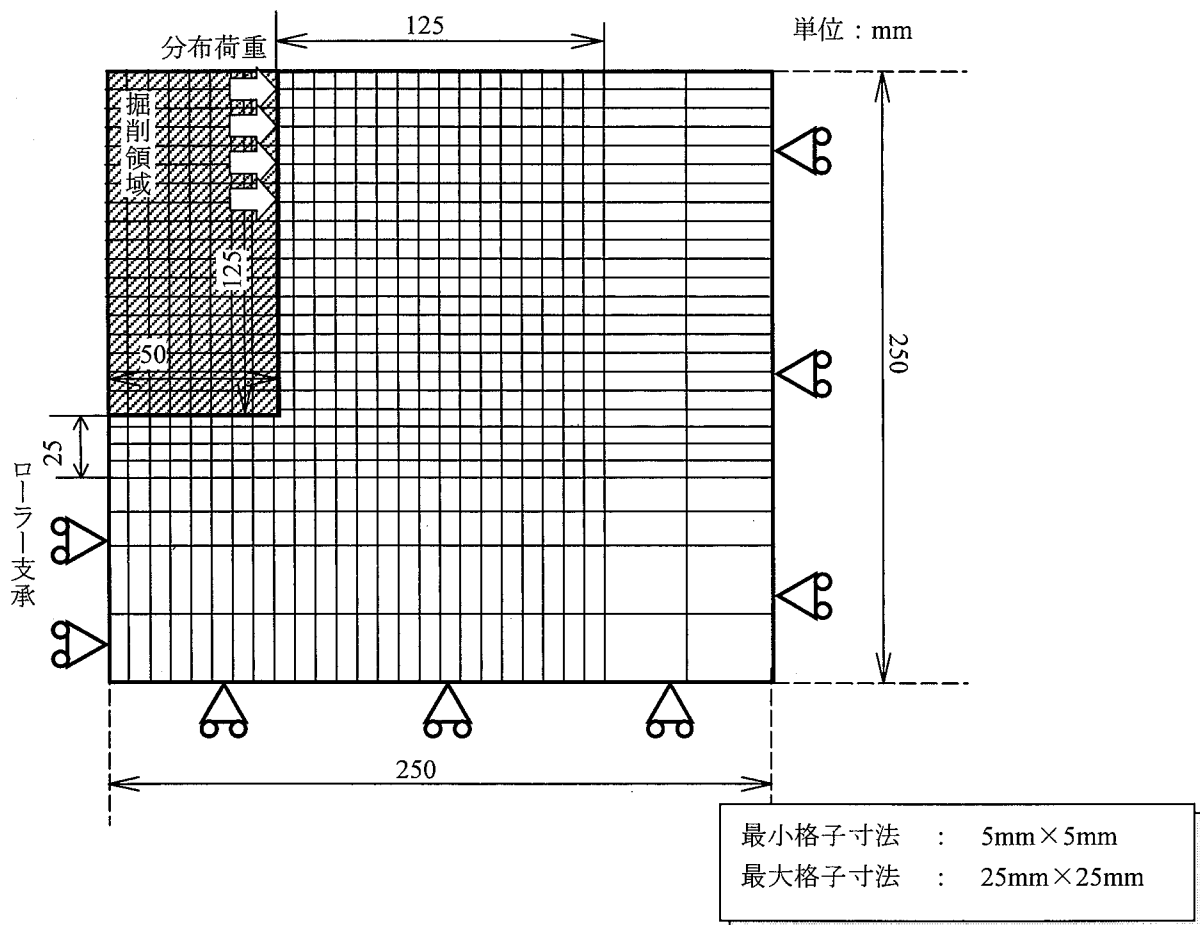


Fig. 10 Model for FEM analysis.
解析モデル

粘土及び中間土については、遠心模型実験で用いた地盤と同条件で資料を作成し、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を実施した。それらの結果を土質データとして用いた。

解析の手順は、遠心模型実験を再現するものとした。遠心模型実験の実験過程に従い、加速度をステップ毎に1Gずつ増加させて計算した。地盤崩壊が生じるまで

当ステップを繰り返し行った。なお、袋体の内圧も20Gに到達するまで各ステップで1 kPaずつ上昇させた。

4.2 解析ケース

解析ケースを Table 4 に示す。粘着力、内部摩擦角は前述した強度試験結果から決定した。なお、袋体の有無により地盤内の応力状態が変化すると考えられ

Table 4 Parameters, etc. for FEM analysis.
解析ケース

項目 \ 実験ケース	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無
袋体																								
土質	粘性土												中間土											
地盤強度	弱				中				強				弱				中				強			
粘着力 c (MPa)	0.010				0.014				0.018				0.008				0.012				0.014			
内部摩擦角 φ	17.1				15.9				15.1				27.0				25.0				24.0			

Table 5 Comparison between centrifuge tests and results of FEM analysis.
実験と解析結果の比較

実験ケース		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
滑り線発生 加速度 (G)	解析	17	13	23	22	27	23	17	13	25	18	26	21
	実験	18	14	30	24	34	25	崩壊と同時					
溝崩壊時 加速度 (G)	解析	39	25	55	45	66	56	43	22	59	27	57	27
	実験	30	25	45	30	46	36	23	13	40	25	40	25

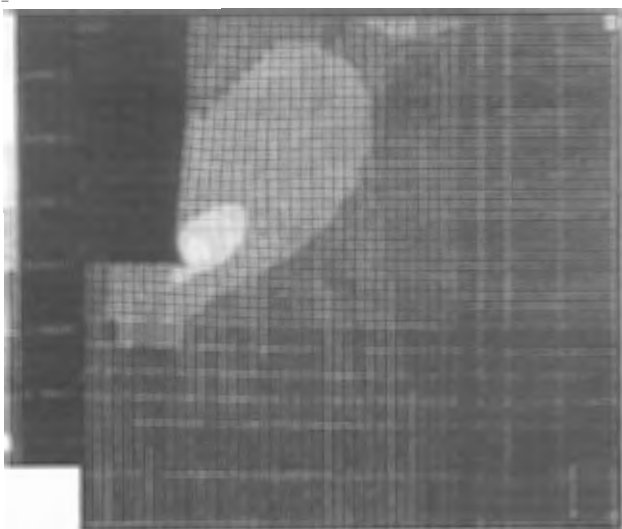


Fig. 11 Calculated strain distribution (Case 3).
塑性ひずみ分布 (ケース 3)

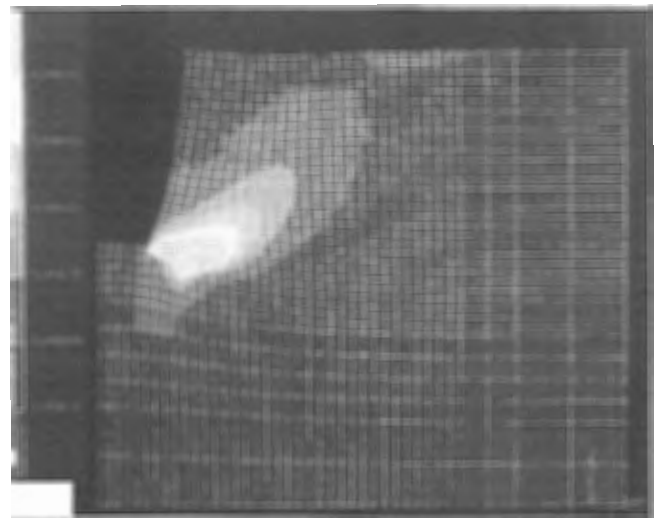


Fig. 12 Calculated strain distribution (Case 4).
塑性ひずみ分布 (ケース 4)

るため、一軸圧縮試験等のヤング率決定に際しては、袋体有りの場合は三軸圧縮試験、袋体無しの場合は一軸圧縮試験から得た応力—歪み関係を用いた。

4.3 解析結果

解析結果の一覧を Table 5 に示す。また、解析結果の一例を Fig. 11, Fig. 12 に示す。Table 6 は、地盤変化発生時の加速度をまとめた表であり、実験で観測

された地盤変化と FEM 解析のデータを対応させている。実験におけるすべり線発生時点を解析では塑性ひずみ発生時点に、また、実験における崩壊発生時点を塑性ひずみが地表面に到達した時点にそれぞれ対応させている。Fig. 11, Fig. 12 はそれぞれケース 3, 4 の地盤崩壊時の変形・塑性歪みを示す図である。掘削溝下端より発生した塑性領域が地表に向かって進展するにつれ、地盤の変形が進行するが、Fig. 11 では袋体

の効果により変形が抑制されるとともに、塑性歪みが比較的小さく抑えられていることが分かる。これらのことから、当解析によって塑性歪み発生後の地盤変形を再現することは出来ないものの、弾性挙動を精度良く追うことができ、塑性歪み発生時の加速度及び地盤変位を正確に捉えることが出来たと言える。

5. 結 論

エア封入袋体を設置することで溝掘削時の溝崩壊を防止するトレンチバッグ工法について、その安全性、崩壊防止効果、崩壊メカニズムについて検討するため、遠心模型実験を行うとともに数値解析を実施した。実験は、粘性土及び中間土（粘性土と砂を混合した地盤）について14ケース行った。その結果、次のような知見を得た。

- (1) エア袋体を設置した場合は、設置しない掘削溝に比べ、粘土地盤、中間土地盤の2種地盤ともに崩壊時の遠心加速度が大きく、エア封入袋体の設置による土止め効果が大きいことが確認できた。
- (2) エア封入袋体は、亀裂等の発生を抑制し、掘削壁面が内側へ倒れ込むのを防止し、ひずみを押さえ

る効果があると認められた。

- (3) モール・クローンの破壊基準を降伏関数とするFEM解析モデルを構築し、計算を行った。その結果、塑性歪み発生後の地盤変形を再現することは出来ないものの、弾性挙動を精度良く追うことができ、塑性歪み発生時の加速度及び地盤変位を正確に捉えることが出来た。

参 考 文 献

- 1) 豊澤康男, 堀井宣幸, 玉手聡, 「溝掘削工事における土砂崩壊による死亡災害の分析」, 産業安全研究所特別研究報告, RIIS-SRR-14, pp. 7-18 (1995).
- 2) 豊澤康男, 堀井宣幸, 玉手聡, 「遠心模型実験による掘削溝の変形・崩壊特性の解明」, 産業安全研究所特別研究報告, RIIS-SRR-14, pp. 41-55 (1995).
- 3) 山田知裕, 上田裕章, 豊澤康男, 堀井宣幸, 玉手聡, 「エア封入袋体による土止め効果を検証するための遠心載荷模型実験」, 土木学会第55回年次学術講演会, III-B180, pp. 358-359 (2000).

(平成13年2月20日受理)