

## 斜め壁を用いた自立土留めの開発

高橋 真一      杉江 茂彦  
 嶋田 洋一      松本 伸

### Centrifuge Model Tests on Diagonally Shaped Cantilever Earth-Retaining Wall

Shinichi Takahashi      Shigehiko Sugie  
 Yoichi Shimada      Shin Matsumoto

#### Abstract

The low cost involved in the construction of a diagonally shaped cantilever earth retaining wall is advantageous for constructing an earth retaining wall. This paper describes centrifuge model tests carried out on a diagonally shaped cantilever earth-retaining wall. The model tests were carried out as follows. A model ground with an earth-retaining wall was constructed using dry sand. After constructing the model, the centrifuge gravity was increased to 50 G. The main results obtained were as follows. 1) The larger the inclination of the earth-retaining wall, the smaller is the pressure acting on it. 2) The larger the inclination of the retaining wall, the smaller is its deformation.

#### 概要

自立土留めは、掘削範囲内に切梁がなく、施工作業性が優れるとともに、コストダウンが期待できる。しかし、掘削深さが大きくなると地盤安定性が減ることから、その適用は浅い掘削条件に限定されている。一方、土留めを、 $10^\circ$  程度傾けると、土留めに加わる土圧は理論的には減少し、その結果土留めの変形の低減が期待できる。これらの組み合わせで自立土留めをより深い土留め掘削で利用することが可能と考えられる。しかし、斜め打設した自立土留めの挙動は、土留めに作用する土圧や地盤変形の低減効果に不明確な部分も多い。そのため、実地盤の応力を再現できる遠心模型実験で、土留めの傾斜度合いを変えた実験を行い、斜め形式の自立土留めの効果を検証した。土留めの傾斜度合いを直立、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  に設定したモデル地盤を各々準備し、掘削過程を模擬しながら、遠心加速度50G場で最大10m掘削相当の土留め地盤を再現し、地盤変形、安定性や、土留めに作用する土圧を観察した。その結果、土留めの斜め形式が、土留めに作用する土圧と変形を通常の鉛直土留めの半分程度まで減少する効果が確認でき、土留めの安定性向上に寄与することを確認した。

#### 1. はじめに

自立土留めは、切ばり、腹起し等の支保工を用いず、主として掘削側の地盤の抵抗によって、土留め壁を支持する工法である。掘削面側に支保工がないため掘削が容易である大きな特徴がある。しかし、支保工がないデメリットとして土留め壁の変形が大きくなりやすいため、一般には掘削深さ3~4m程度と比較的浅い掘削深さの場合に採用される<sup>1)</sup>。

土圧理論によると、土留め壁が傾斜すると、土留め壁へ作用する土圧は低減することが知られている。この土圧の特徴を利用した斜め壁を用いた自立土留めは、従来形式より土圧が少ない土留めが可能と考えられる。最近では、傾斜した土留め壁が施工できる施工機械が開発されており、設計的に土圧低減効果を期待して斜めに打設することで、より効率的な土留め施工の可能性が大きくなってきている。

本論文では、砂地盤での自立土留めに関する遠心模型実験を行い、作用する土圧分布や変形観測から斜め壁を用いた自立土留めの効果について実験的に検証した。

#### 2. 実験方法

実験は、縮尺模型地盤に遠心加速度を載荷することによって実際と同じ土圧分布やひずみ分布を再現できる遠心模型実験で行った。

Photo 1に模型地盤を示した。斜め壁を用いた自立土留めを設置した模型地盤を順次掘削しながら、変形や土圧の分布の変化を調べた。

遠心模型実験装置の仕様と全景をTable 1、およびPhoto 2に示す。

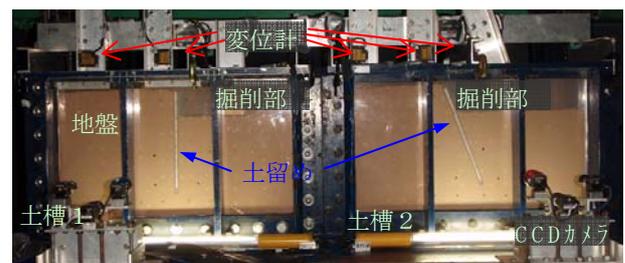


Photo 1 直立および斜め自立土留め模型  
Centrifuge Model

Table 1 遠心模型実験装置の主な仕様<sup>2)</sup>

Performance of Centrifuge	
項目	仕様
最大回転半径	7.01 m
搭載容量	700 tonf・g
搭載重量	7 tonf
搭載面積	2.2×2.2 m



Photo 2 遠心模型実験装置  
Obayashi Centrifuge

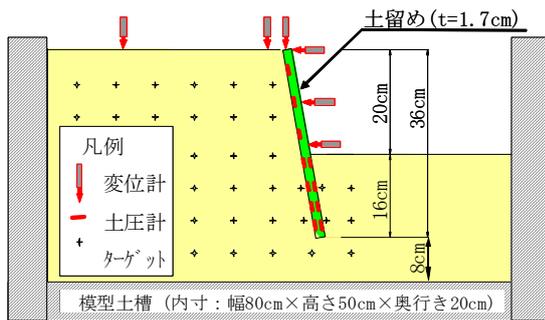


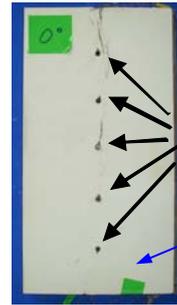
Fig. 1 模型地盤の概要  
Cross Section with Retaining wall in Dry Sand

Fig. 1に模型地盤の概要を示す。図では傾斜した土留めのケースを示した。砂地盤を対象とした自立土留めを模擬するため、あらかじめ土留めを有する模型地盤を作製した後、遠心力を最大50Gまで増加させる方法で行った。使用した土槽寸法は、幅80cm×高さ50cm×奥行き20cm、前面はアクリル板を使用し、地盤変位の計測が可能である。また、アクリル板を含む土槽と模型地盤の間には摩擦低減のためテフロンシートを貼付している。模型地盤深さは44cm、土留め壁の高さは36cmである。

Photo 3に土留め壁模型を示す。地盤改良を利用した土留め壁を想定して、模型用石膏 ( $q_u=8,000\text{kN/m}^2$ ) で作製した。土留め壁模型には、小型土圧計 (大きき  $\phi 6\text{mm}$ , 容量  $1\text{MN/m}^2$ ) を主働側7箇所、受働側4箇所に埋込みで設置し、壁面にかかる土圧を計測した。

模型地盤は、土留め模型を所定の場所に設置後、乾燥した豊浦標準砂を用いて、Photo 4に示す空中落下方法により作製した。

Table 2に実験中の計測項目を示す。Table 3に実験ケ



小型土圧計 ( $\phi 6\text{mm}$ )  
土留め壁(石膏製)  
(36cm×幅20cm×厚さ1.7cm)

Photo 3 土留め壁模型  
Retaining Wall Model

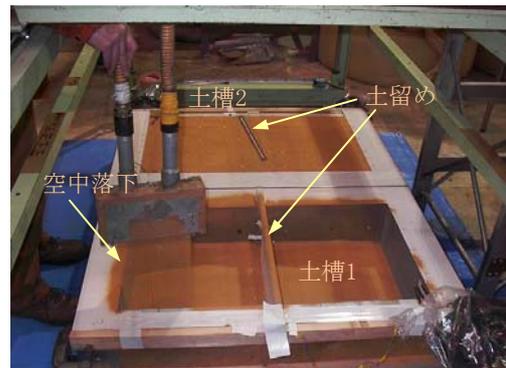


Photo 4 空中落下法による模型地盤作製  
Model Preparation Using Dry TOYOURA Sand

Table 2 実験計測項目

Model Tests Conditions	
計測項目	計測方法
壁面土圧	小型土圧計 ( $\phi 6\text{mm}$ ) 土留め主働側 7箇所 土留め受働側 4箇所
土留め変形	レーザー変位計, CCDカメラ
地盤変形	レーザー変位計, CCDカメラ

Table 3 実験ケース

Model Tests Conditions			
No.	Case1	Case2	Case3
土留めの傾斜	直立	10°	20°
土留め	材料: 石膏 厚さ: 85cm (17mm 50G場換算)		
地盤	材料: 豊浦標準砂 (乾燥) 密度: $\rho_d=1.55\text{g/cm}^3$ 作製方法: 空中落下方式		
掘削過程	STEP1: 掘削深さ5m (10cm 50G換算) STEP2: 掘削深さ10m (20cm 50G換算)		

ースを示す。実験では、Fig. 2に示す手順に従って、1G場で所定の掘削 (10cm, 20cm, 50G遠心加速度場で各々5m, 10m相当) 後、遠心加速度50Gまで載荷する方法を進めた。実験では、土留めに働く土圧、土留めの水平変位、土留め背面地盤の沈下、模型側面からの地盤変形挙動を観測した。

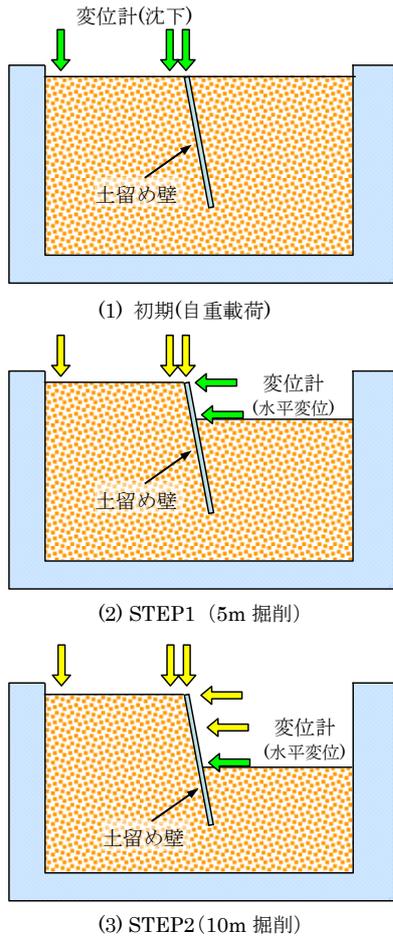


Fig. 2 模型地盤の掘削模擬  
Cross Section of Model Ground

### 3. 実験結果

#### 3.1 Case1(直立土留め)実験結果

Photo 5, Photo 6に5m, 10m相当の掘削を行った模型地盤掘削状況を示す。レーザー変位計による土留め壁水平変位, 地表面沈下とともに地盤側面の変形を観察した。

Fig. 3は, 掘削深さと土留め壁天端の水平変位を示した。それぞれ換算長さで整理した。5m掘削時で5cm, 10m掘削で20cmの水平変位が発生した。掘削深さに対して比例ではなく2乗の関係で掘削深さが増えると水平変位は急激に増加する傾向が認められる。単純に掘削に伴う主働側の土圧だけ考慮しても土圧係数に変化がない場合には掘削深さのほぼ2乗以上に比例する土圧によるモーメント合力が設計では考慮するが, 実験結果では掘削深さの増加に伴う水平変形の増加傾向は生じたが, その増加割合と同様の掘削深さの増大に伴う水平変位挙動が実験でも確認できた。

Fig. 4は, 土留め壁で5m掘削時に2点, 10m掘削時に3点計測した土留め壁の水平変位の分布を示した。掘削底面での変位量も掘削深さが大きいほど増大している。また85cm厚さの土留め壁は曲げ剛性が大きいことから, 壁の曲げ変形はほとんどない。その結果, 掘削面における

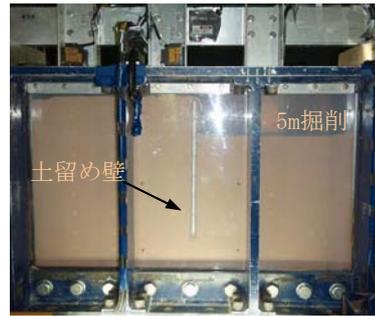


Photo 5 STEP1 (5m掘削)  
STEP 2

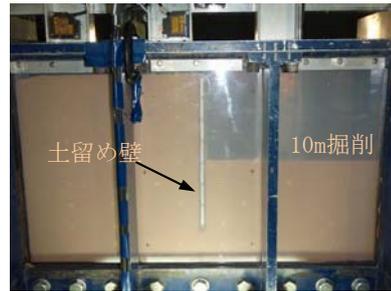


Photo 6 STEP2 (10m掘削)  
STEP 2

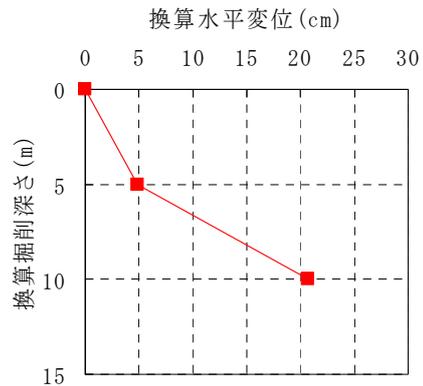


Fig. 3 掘削深さと土留め天端の水平変位  
Horizontal Displacement of Retaining Wall

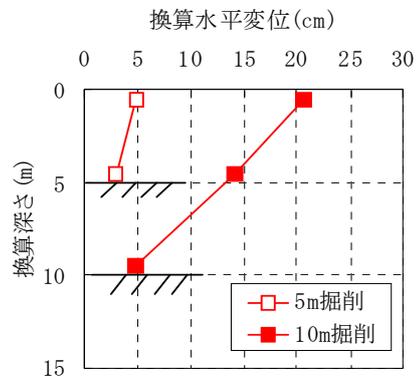


Fig. 4 土留めの水平変位分布  
Distribution of Lateral displacement of Retaining Wall

土留め壁の水平変形の分布は、掘削深さに関わらず掘削底面からほぼ直線的に掘削面側に変形が生じている。

Fig. 5は、土留め壁に作用する主働側の土圧分布である。土留め上部3m程度の範囲は土圧がほとんど作用せず、その後深度方向に増加している。また掘削深さごとの土圧分布を比較すると掘削が深いほど土圧が小さい。図中にはクーロン土圧分布を付記した。土圧係数のみで算出されるクーロン土圧の分布は深度方向に比例して分布し、掘削深さは特に影響ない。実験結果と特徴が異なっている。実験で得られた土圧は土圧理論よりも小さいとともに、土留め壁の変形に伴いより減少したものと考えられる。設計で利用する土圧理論により算定される主働側の土圧分布は、実際の土圧分布より大きな評価になっている可能性がある。

Fig. 6は、土留め壁に作用する受働側の土圧分布である。Fig. 5で示した主働側の土圧分布に比べて大きい。またその土圧分布は、深度に伴って増加する主働側土圧と異なり表面付近が大きくなる分布形状を示している。掘削深さが大きくなると土圧が減じた主働側の挙動と異なり、掘削面近傍では受働側の土圧が増加し、自立土留めの反力として作用していることが確認できる。

### 3.2 土留めの傾斜効果

Photo 7にCase2における10m相当掘削時の模型地盤を示す。またPhoto 8にはCase3における10m相当掘削時の模型地盤を示した。ともに、前節で示したCase1と同様に、5m相当掘削、10m相当掘削と段階的に掘削を進め、各々遠心加速度を増加させ実験を進めた。Case1と同様の計測結果が得られたので、以下Case1, 2, 3の比較によって、土留めの傾斜の効果について整理した。

Fig. 7, Fig. 8には、5mおよび10m掘削相当時の土留めの水平変位の分布を示す。5m掘削相当の段階からCase1（鉛直土留め）に比べてCase2, Case3（傾斜土留め）が小さい水平変位となっている。10m掘削相当時点ではその傾向はより明確になり、実験の結果では、水平変位がCase2で約1/2, Case3で約1/4まで低減する効果が認められた。一方その変形挙動は、土留め天端が一番大きく、掘削面では2~4cm程度と小さく、掘削とともに土留めが前方へ傾いてくる変形となっている。当初鉛直状態であったCase1では、掘削に伴う変形によって土留め壁がせり出した状態となるが、Case2, 3で当初の斜めの効果により、鉛直状態までまだ達せず、安定状態を保っていると言える。

Fig. 9, Fig. 10は、鉛直壁、10° 傾斜土留め壁で10m掘削時のFEM解析した結果のうち、水平変位分布を示した。解析に用いた材料定数はTable 4に示した。土留め壁の天端ほど大きな分布になり傾向は実験結果と同様の傾向を表している。土留め壁の背面地盤の水平変位が生じる範囲は、土留めの背面側掘削深程度の範囲で水平変位が大きくなっている。土留め壁天端の変位量は、鉛直土留め壁条件で18.5cm、10° 傾斜土留め壁条件で11.0cmと実験

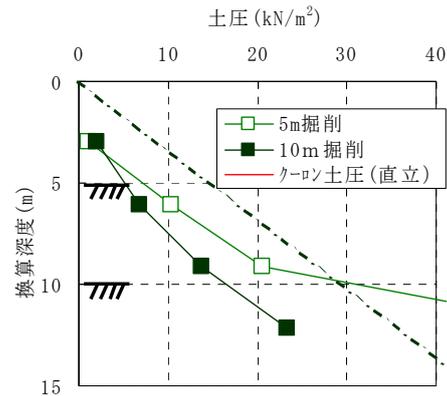


Fig. 5 壁面に作用する土圧分布（主働側）  
Lateral Earth Pressure

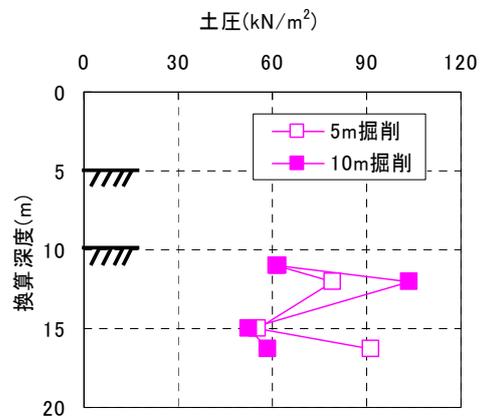


Fig. 6 壁面に作用する土圧分布（受働側）  
Lateral Earth Pressure

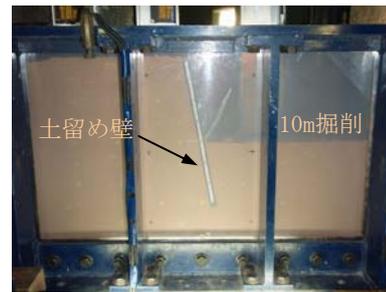


Photo 7 Case2 10m掘削  
Case2

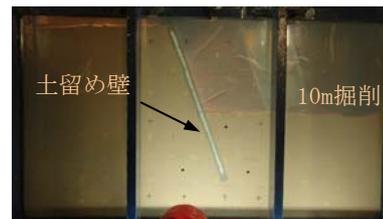


Photo 8 Case3 10m掘削  
Case3

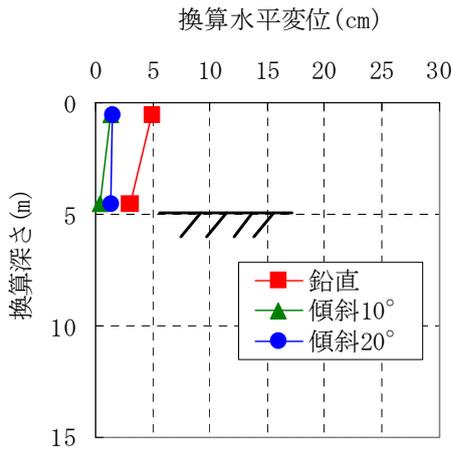


Fig. 7 土留め壁の水平変位 (5m掘削時)  
Lateral Displacement of Earth Retaining Wall

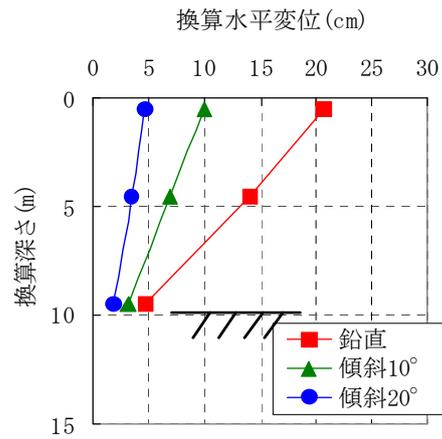


Fig. 8 土留め壁の水平変位 (10m掘削時)  
Lateral Displacement of Earth Retaining Wall

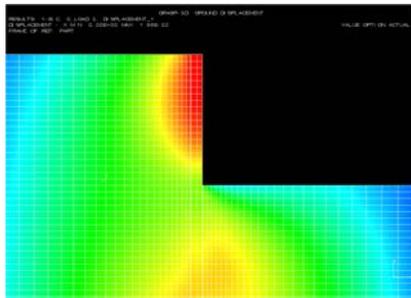


Fig. 9 FEM解析結果 (鉛直壁, 10m掘削時)  
FEM Analysis

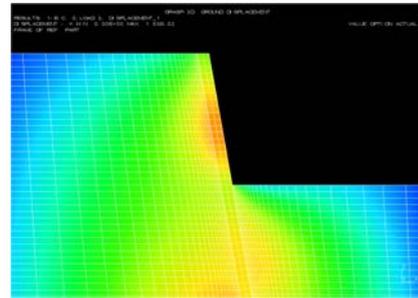


Fig. 10 FEM解析結果 (傾斜10° 10m掘削時)  
FEM Analysis

Table 4 解析条件  
FEM Analysis Condition

	地盤	土留め壁
密度 (kN/m <sup>3</sup> )	15.2	16.4
平均変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	2,440	114,000
ポアソン比 $\nu$	0.25	0.20
粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )	7.5	—
内部摩擦角 $\phi$ (°)	39.5	—

と同程度の変形を示した。土留め壁の条件の差による変形量を比で表すと、10° 傾斜土留め壁解析結果/鉛直土留め壁解析結果=0.59となり、前述の実験結果と同程度の水平変位低減効果が確認できる。

Fig. 11, Fig. 12は、掘削に伴う土留め天端の水平変位と、土留め背面地盤の沈下の関係を示した。掘削深さに関わらず土留めの変形が小さい結果、背面地盤の変形も抑制され、背面地盤の沈下発生量も小さくなっている。

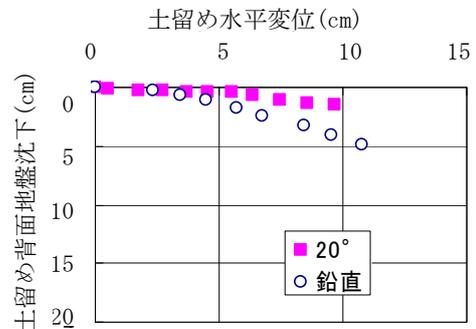


Fig. 11 土留め天端水平変位と背面地盤沈下 (5m掘削)  
Lateral Displacement and Ground Settlement

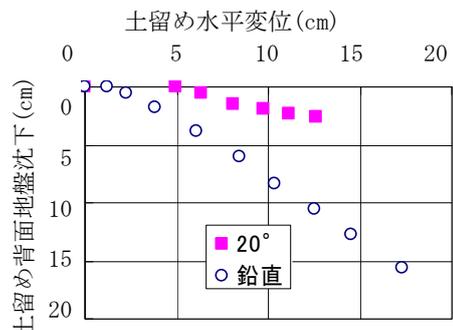


Fig. 12 土留め天端水平変位と背面地盤沈下 (10m掘削)  
Lateral Displacement and Ground Settlement

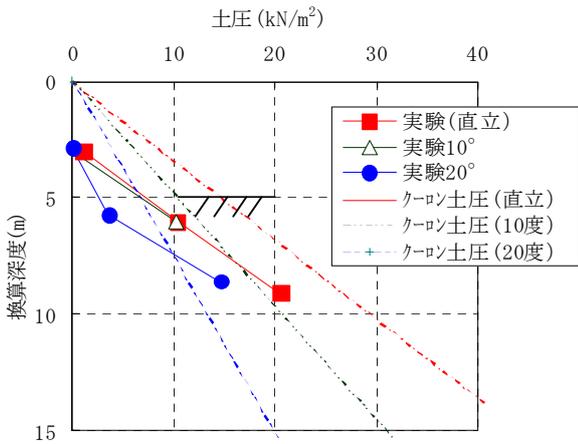


Fig. 13 壁面に作用する土圧(5m掘削)  
Earth Pressure Distribution (h=5m)

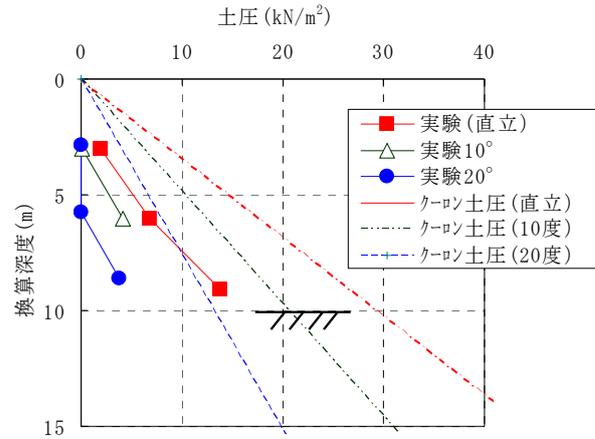


Fig. 14 壁面に作用する土圧(10m掘削)  
Earth Pressure Distribution (h=10m)

Fig. 13, Fig. 14は、各掘削段階の土留め壁面に作用する主働側の土圧の分布である。図中には、クーロン土圧を付記している。土圧分布は、どの深さにおいても、クーロン土圧よりも小さな値を示している。特に壁面上部の方が比較的小さな土圧となり、この傾向は土留めの傾斜が大きいCase3が最も顕著になっている。土留めの傾斜のよって土圧の合力が減じるとともに、土留め上部の土圧の減少がより大きいことから、土留めに作用する合力の作用点の位置も相対的に下がり、その結果、先に示した変形抑制効果が大きく現れたものと考えられる。これらの壁に作用する土圧に関しては、抗土圧構造物は異なるものの、高田ら<sup>4)</sup>によるもたれ擁壁に対する一連の遠心実験でも認められ、土留めの変形による土圧分布の減少の影響が示唆される。

#### 4. まとめ

切ばり、腹起し等の支保工を用いず、主として掘削側の地盤の抵抗によって、土留め壁を支持する自立土留めは、掘削面側に支保工がないため掘削が容易である大きな特徴がある。その特徴をより深い掘削に適用するため

の一つの工夫として自立土留めを斜めに設置することで、その特徴をより発揮することについて、遠心模型実験を用いて検証した。その結果、

- (1) 土留め壁に作用する土圧が低減する。
- (2) 土留め壁の水平変位量は、土留め壁の傾斜10°で約1/2、土留め壁の傾斜20°で約1/4まで低減する。
- (3) 作用する土圧の大きさは通常的设计で算定する値に比べ小さく、設計では過大に評価している可能性がある。

などの知見を得た。今後、斜め形式の自立土留めの展開に向けて、基礎的な挙動の確認ができた。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 仮設構造物工指針，(2001)
- 2) 遠心模型実験装置の活用事例，大林組技術研究所報，No. 66，pp. 121～124，(2003)
- 3) 日本建築学会：山留め施工指針，(2002)
- 4) 高田，新井：もたれ擁壁に働く土圧，大阪市立大学修士論文梗概集，(2003)