

遠心模型実験による控え矢板を有する土止めの崩壊メカニズムの検討

豊澤康男*, 堀井宣幸*, 玉手 聡*, H.G.B. アレスマ**

Failure Mechanism of Tie-Rod Anchored Sheet Pile Wall in Centrifuge Tests

by Yasuo TOYOSAWA*, Noriyuki HORII*, Satoshi TAMATE* and H.G.B. ALLERSMA**

Abstract : Accidents due to collapse sometimes occur in excavation site. The need for decreasing these accidents is currently one of major concern. It is difficult to find out the causes of accident, because of the disturbance of site during the rescue and the collapse itself. To find out the scenario of an accident is very important to retrieve the information involved.

In this paper, firstly, a case history is described of a temporary earth support collapse. Secondly, the basic attempt for this approach by using centrifuge would be illustrated. The combination of both site investigation and centrifuge model tests would give more useful information to approach the scenario of accidents.

Thanks to the low weight of the models (they can be conducted by one person) several configurations could be simulated in a short period. Six models, which consisted of different profiles, were tested to observe the tie-rod anchored sheet pile wall's collapse in centrifuge.

The tests covered both sheet pile walls anchored in the soil and sheet pile walls supported by struts. Performing the tests at 100 g simulated a prototype depth of approximately 6 m. To simulate a field accident, struts were removed in flight. The modes of failure were observed in the different model tests by means of an on-board video camera. It was possible, even in small models, to simulate complicated configurations, and detailed information could be obtained by using image-processing techniques. Based on the results of these centrifuge model tests, the deformation and failure mechanisms are discussed.

The following conclusions are drawn :

- (1) A case history of the temporary earth support collapse shows that the buckling of the struts induced the sequence of collapse.
- (2) It appeared that the observed failure modes in the centrifuge tests show a good agreement with field observations.
- (3) Piles that are blown in the bottom of the excavation have a significant influence on the failure mechanism.
- (4) It has been shown that the anchoring of sheet pile walls does not seem to be very effective in several cases. Cracks are initiated from the anchoring wall of the sheet pile walls, which led to unstable behavior of the retaining wall.
- (5) Centrifuge model tests have proven to be helpful in obtaining a good understanding of the failure

*建設安全研究部 Construction Safety Research Division

**デルフト工科大学 Delft University of Technology, Netherlands

mechanism in the case history. For further information, water and three-dimensional effects, etc. should be considered.

Keywords ; Case history, Failure, Anchor, 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。また、一旦発生すると重大災害となる可能性が高いため、土砂崩壊による労働災害の防止は労働安全上、重要な課題の一つである。

実際に発生した土砂崩壊災害を詳細に分析することによって、災害防止に関する多くの有用な情報を得ることができる。しかしながら、労働災害の発生現場は二次災害の危険性や救助、復旧工事等で長期に及ぶ詳細な調査が困難な場合が多い。また、現場は様々な条件が輻湊しているため、崩壊メカニズムの解明や原因の特定は容易ではない。

通常は現場の調査から得られた情報に基づき原因の推定を行うが、再現実験を行うことで推論の裏付けや新たな知見を得ることが多い。

再現実験としては大別して実大規模実験（要素を抽出して行う実験を含む。）と模型実験がある。実大規模の再現実験は原因解明に非常に有効な手段ではあるが、時間と経費がかかること、崩壊による危険性が存在すること等で頻繁に実施できるものではない。

一方、模型実験は、比較的短時間に安価に繰返して実験を実施出来るメリットがある。しかし、地盤強度は応力に依存しているため、小さな模型では崩壊現象を再現できない等の制約があった。

本研究では、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遠心模型実験を活用することを試みた。

この遠心模型実験で得られた知見を活用することで、効率的な現場調査が可能になるとともに災害原因の特定や防止対策の策定等に寄与するものと考えられる。

本報告では、まず最初にタイロッドで繋がれた控え矢板を有する土止めの土砂崩壊災害事例について簡単に紹介した後、当該災害事例について基礎的な知見を得ることを目的として行った遠心模型実験結果について述べる。

2. 仮締切り工崩壊災害事例

橋梁架替え工事現場において鋼矢板式の締め切り工が崩壊し、泥水に埋没し 2 名が死亡し、2 名が負傷した。災害の経緯は次のようである。

工事は、南北 19.4 m、東西 11.0 m の長方形の面を長さ 17 m の鋼矢板を用いて締め切り、内部を深さ 11.4 m まで掘削するものであった。掘削に先立って締め切り工を打設した後、切り梁を支える中間杭と橋脚の基礎となる場所打ちコンクリート杭 11 本を施工した。その後、タイロッド 10 本を控え矢板に繋いで、締め切り工内部の掘削を開始した。

施工計画図によると、締め切り工の内部には掘削に従って支保工が三段架かることになっていた。しかし、クラムシェル (40 tf) による掘削の邪魔になることから、三段目の切り梁を設置しないまま、最終掘削面までの掘削が全体のほぼ 3 分の 2 にわたって行われた。

当締め切り工は河川と堤防の境界域に位置するため河川側と陸側との土圧が異なるいわゆる偏土圧を受ける構造であり、最上段は川側の受働土圧が期待できないため切り梁の代わりにタイロッド式のアンカーを設置したものである。

災害当日、火打ち梁のボルトが破断したため、補修作業等を行っていたところ、締め切り工が大音響とともに陸側から倒壊に至った。施工計画と事故後の検証結果から事故の前後の横断面を描くと Fig. 1 のようになる。

3. 遠心模型実験

3.1 遠心力載荷装置

実験にはデルフト工科大学の半径 1.1 m、最大加速度 300 G、最大積載量 400 N の性能を有する遠心力載荷装置を使用した¹⁾。

3.2 二方向ローディングシステム

二方向ローディングシステムは遠心載荷装置において様々な用途に活用できる。当該システムは 2 つの DC モーターによって駆動するもので、駆動（回転）状況をパルスカウンターで読み込みコンピュータによる制御を行っている。また、同時に荷重と変位の測定も行っている。

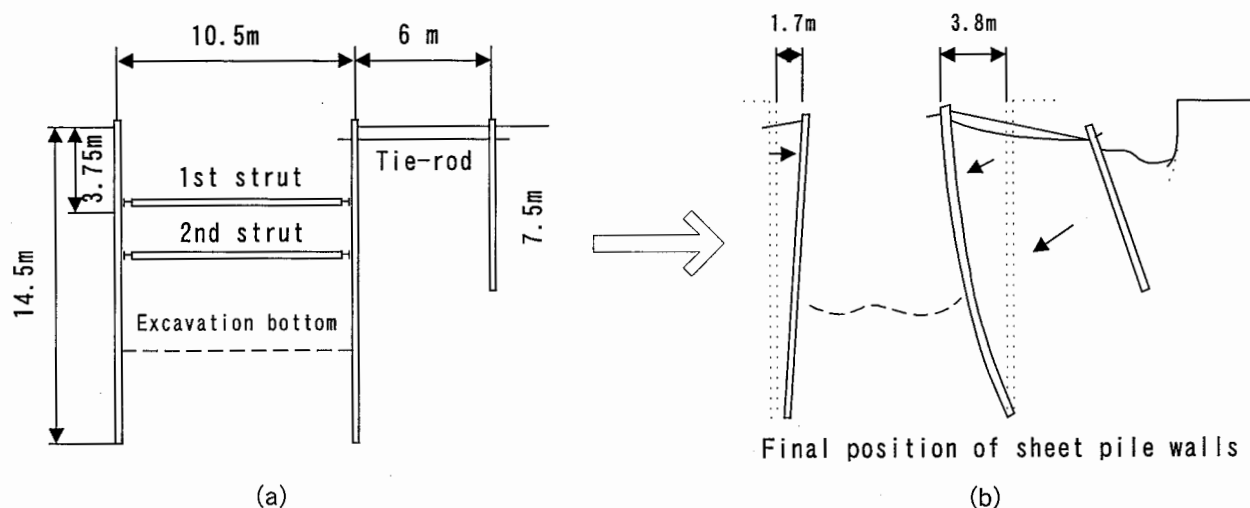


Fig. 1 Profile of earth support before and after collapse.
事例の崩壊前後の状況

本実験では、当該システムを利用して、切り梁の除去とのり肩にかかるクレーンやトラックの荷重を再現するためにウェイトを載せることを行った。

3.3 デジタル・イメージプロセッシング・システム

遠心力载荷装置上に設置した CCD カメラにより崩壊に至るまでの模型を撮影し、ビデオ録画と同時にその画像を随時パソコンに取り込み、イメージプロセッシング処理により画像解析を行った。イメージプロセッシング処理はオンライン処理のためビデオ撮影と同時に実験中にも解析が可能である。画像は一画面当たり 512×512 のピクセルを有し、それぞれのピクセルは 255 段階の白黒の段階に分解が可能である。既存プログラムのイメージファンクションを組み合わせることで画像の特徴にあった処理が可能である。

遠心模型実験においては、模型地盤の変形の進行状況の観察が重要な項目の一つである。

変形の進行状態を観察する最も簡単な手法は、2つの画面のサブトラッキングである。これは1枚の画面の濃淡の情報データを逆にし、もう1枚と重ね合わせることで変形した部分を明瞭に浮き上がらせて見えるようにするものである。実験中の2画面をサブトラッキングすることにより、どの部分が変形しているかを把握できる。

4. 実験方法

4.1 実験準備

上記事例のような災害における崩壊挙動を再現することを目的に、約 100 分の 1 の模型を粘土で作成し、

遠心模型実験を行った。

Fig. 2 は今回実験を行った六種類の模型地盤の概要図である。実験 W 3, W 4 及び W 5 においては掘削部底面に 6 本の杭を設置した。実際の現場において場所打ちコンクリート杭が設置されていたことを模擬するためである。

地盤変位を観察するため、5 mm 角のメッシュを模型地盤側面に描いた後、成形した模型地盤を箱型の試料容器（内寸 $18 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$ ）に設置し、それぞれ概要図のように切り梁やタイロッド、杭を設置した。

実験模型地盤は陶器用粘土（K 140: Product of WBB Vingerling）を成形して作成した。当粘土の粘着力はおよそ 25 kN/m^2 である。

矢板の模型は厚さ 1.0 mm、長さ 72.5 mm のアルミニウム製である。なお、根入れ長さは今回の全ての実験で 1.75 cm とした。タイロッド用の控え矢板の模型は厚さ 1.0 mm、長さ 37.5 mm のアルミニウム製のものをを用いた。

遠心加速度の上昇により掘削をシミュレートし、崩壊状況を観察した。さらに、コンピュータ制御の二方向（鉛直、水平方向）のローディングシステムを用いることで、遠心加速度一定の遠心場において矢板の支持、切梁の除去等を行いその影響を調べた。

4.2 実験手法

それぞれの模型地盤の概要と実験の手順は以下のとおりである。なお、矢板とタイロッド及び控え矢板の設置位置並びに根入れ長さは、事例と相似形にしている。

4.2.1 実験 W 1

模型地盤の中央に掘削部を配置し、矢板上部に切り梁を設置した。両側から対称に土圧がかかる模型とし、タイロッド及び控えの矢板は設置していない。

実験の手順は次のとおりである。

- ①遠心加速度 G を 100 G まで上昇。
- ② 100 G において切り梁を除去（ローディングシステムを用いて切り梁をつり上げた。）。
- ③遠心加速度 G を 150 G まで上昇。

4.2.2 実験 W 2

地盤の片側（陸側）を模擬した模型地盤である。タイロッドと控えの矢板を設置し、ローディングシステムを用いて矢板上部を支持している。

実験の手順は次のとおりである。

- ①遠心加速度 G を 100 G まで上昇。
- ② 100 G において切り梁を除去（ローディングシステムを上昇させた。）
- ③遠心加速度 G を 150 G まで上昇。

4.2.3 実験 W 3

実験 W 2 と矢板、タイロッドの配置は同じである。掘削部（受働側）に杭（pile）の模型として釘を設置した。

実験の手順は次のとおりである。

- ①遠心加速度 G を 100 G まで上昇。
- ② 100 G においてのり肩に（30 gf）の荷重を負荷（ローディングシステムを下降させて、つり下げた錘をのり肩に置いた。）。

4.2.4 実験 W 4

タイロッド用の控え矢板位置の影響を確認するため、控え矢板の位置を掘削部から実験 W 2、W 3 と比べて二倍離れた。実験 W 3 と同様に掘削部（受働側）に杭（pile）の模型として釘を設置した。

実験の手順は次のとおりである。

- ①遠心加速度 G を 100 G まで上昇。
- ② 100 G においてのり肩に（30 gf）の荷重を負荷（ローディングシステムを下降させて、つり下げた錘をのり肩に置いた。）。
- ③遠心加速度 G を 150 G まで上昇。

4.2.5 実験 W 5

事例とほぼ相似になるように矢板等を配置した模型地盤を作成した。あらかじめ 2 段の切り梁を設置した。ただし、実際にはあった川側の水は模擬していな

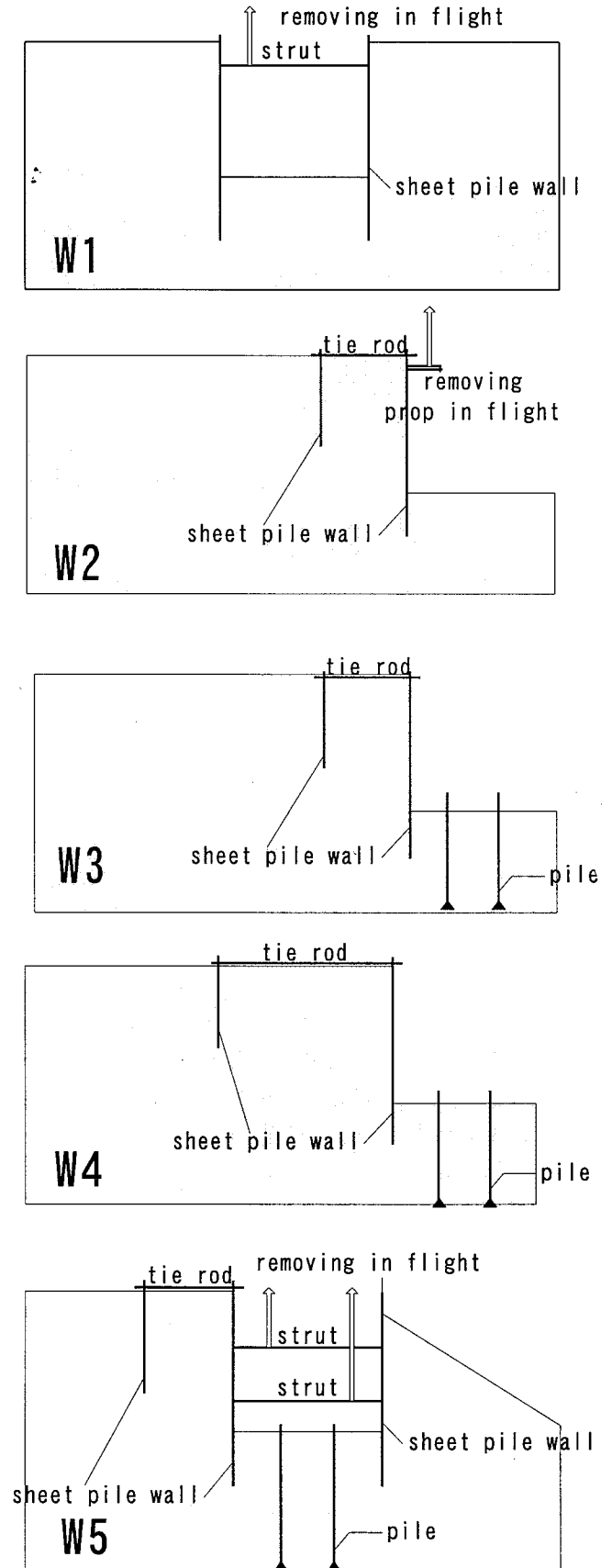


Fig. 2 Cross sections of models.
模型地盤の概要

い。

実験の手順は次のとおりである。

- ①遠心加速度 G を 100 G まで上昇。
- ② 100 G において 2 段のうち、下段の切り梁を除去。
- ③遠心加速度 G を 150 G まで上昇
- ④ 150 G において残りの上段の切り梁を除去

5. 実験結果と考察

5.1 実験 W 1

Fig. 3 は切り梁を除去した前後の変位のサブトラクションによる可視化画像である。**Fig. 4** は実験後の地盤の様子である。

矢板下端から主働側及び受働側の両方向にすべり線が発生し、地表面近くの地盤が全体的に掘削側に移動しているのが明瞭にわかる。

切り梁を除去した後、さらに 150 G まで遠心加速度を上昇させたが、**Fig. 4** の状態で平衡に達した。掘削底部（受働側）の地盤が両方から押されて、地盤底部がせり上がる現象（ヒービングの一種）が起きたため、その分の受働土圧が増加し、主働土圧と平衡に至ったものと考えられる。

5.2 実験 W 2

実験 W 2 の結果を **Fig. 5** から **Fig. 8** に示す。切り梁を除去した影響を可視化したものが **Fig. 5** と **Fig. 6** である。

100 G に至った時点で矢板下部が掘削側（受働側）に押し出されるように変形し、さらに切り梁の除去に伴い地盤上部が全体的に掘削側へ変位している。なかでも矢板と控え矢板の間の地盤が大きく変位し、控え矢板の位置で亀裂が発生したことがメッシュをイメージとして取り出した **Fig. 6** からも窺える。**Fig. 7** は 120 G から 140 G に遠心加速度を上昇させたときの変位を可視化したものである。すべり線がほぼ直線となっているのがわかる。切り梁が効いていた時と除去後ではすべり線の位置が異なる等、地盤の変形状態が変化していることがイメージプロセッシングによる画像から読み取れる。

実験 W 3 及び実験 W 4 と較べると実験 W 2 において掘削側（受働側）の変形が大きい、これは掘削側（受働側）に杭を設置していないためと考えられる。

5.3 実験 W 3

Fig. 9 に実験終了後の模型地盤の様子を示す。実験 W 2 と実験 W 3 の地盤条件の大きな違いは、掘削側（受働側）における杭の設置の有無である。

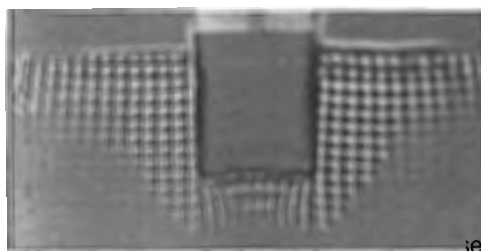


Fig. 3 Visualization of displacement change by removing strut in test W 1 by subtraction.
切梁の除去による変位状況の可視化（実験 W 1）

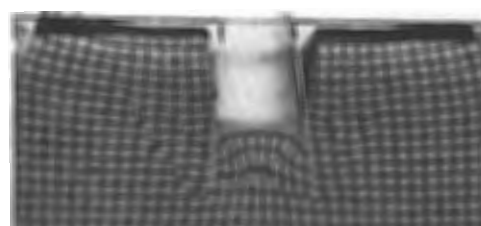


Fig. 4 Photograph of the model after test (Test W 1).
模型地盤の実験後の状況（実験 W 1）

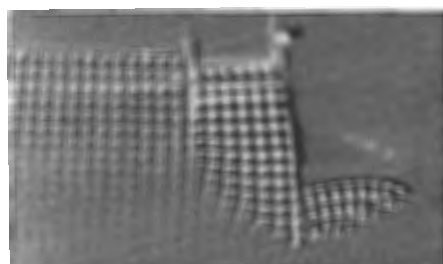


Fig. 5 Visualization of the deformation caused by removing strut in test W 2 by subtraction (at 100 G).
100 G における切梁の除去による変位状況の可視化（実験 W 2）

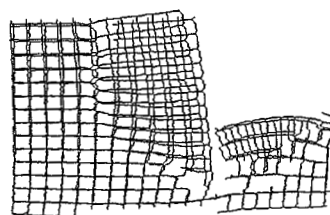


Fig. 6 Extraction image of the meshes (deformation caused by removing strut in test W 2).
メッシュイメージの抽出（実験 W 2 における切り梁除去による変位状況）

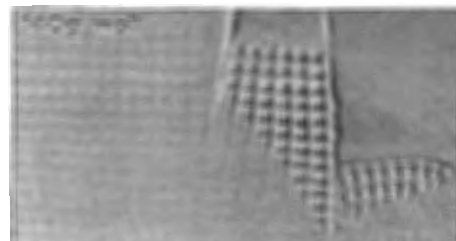


Fig. 7 Visualization of the deformation caused by increasing G (from 120 G to 140 G) in test W 2.
120 G から 140 G までの変位状況の可視化（実験 W 2）

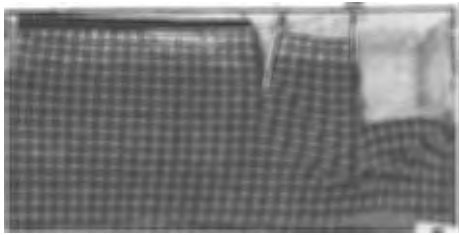


Fig. 8 Photograph of the model after test (Test W 2).
実験後の模型地盤状況 (実験 W 2)

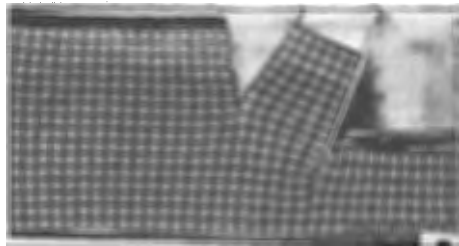


Fig. 9 Photograph of the model after test (Test W 3).
実験後の模型地盤状況 (実験 W 3)

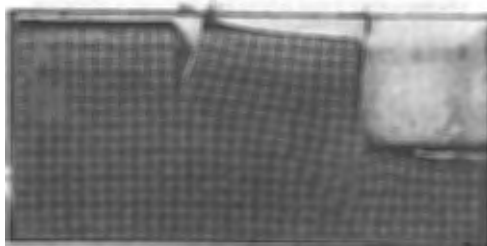
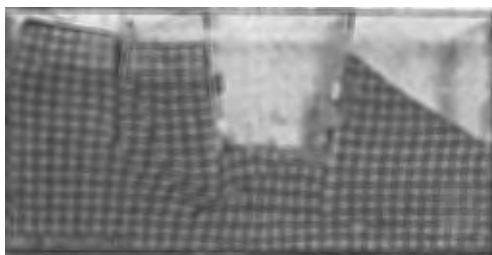


Fig. 10 Photograph of the model after test (Test W 4).
実験後の模型地盤状況 (実験 W 4)



(a) Before test (W 5)
実験前の模型地盤状況 (実験 W 5)



(b) After test (W 5)
実験後の模型地盤状況 (実験 W 5)

Fig. 11 Photograph of the model (Test W 5).
模型地盤状況 (実験 W 5)

両者を比較すると、杭を設置した実験 W 3 では、矢板と控え矢板の間の地盤が倒れるように崩壊しているのに対して、実験 W 2 では掘削側（受働側）の変形が大きく、矢板もほぼ鉛直に自立した状態を保っている。

足下を押さえられているか否か、つまり掘削側（受働側）底部の地盤強度の大小が崩壊の様態に大きく影響するといえる。

実験 W 3 (Fig. 9) の結果が実際に計測された事例の Fig. 1 に示された変形状態とほぼ等しいことから、実験 W 3 と同じような崩壊が事例においても起こった可能性が高い。このような崩壊が実際にも起こったと想定すると、現場で見られた崩壊の位置関係や外観がよく理解できる。

5.4 実験 W 4

Fig. 10 は 150 G で載荷した後の模型地盤の様子である。

実験 W 3 の結果から控え矢板の位置、つまりタイロッドの長さが崩壊形態に影響していることが判明した。実験 W 4 では実験 W 3 に較べてタイロッドの長さを 2 倍にした。足下を押さえられ、控えの矢板の位置で亀裂が発生し、倒れるように崩壊する変形形態は同じであったが、実験 W 3 では 80 G で崩壊が始まったのに対し実験 W 4 では 120 G まで安定していた。

このことから、実験 W 3 における控え矢板の設置位置がすべり線発生範囲内であり、掘削部に近すぎたといえる。また、控え矢板の打設によってかえって亀裂の発生を助長することになったことも見逃せない。

実験 W 4 のように想定すべり線の外側に控えの矢板を打設することが必要である。

5.5 実験 W 5

実験前後の模型地盤の様子を Fig. 11 (a) 及び Fig. 11 (b) に示す。

模型地盤は 100 G においても二段の切り梁が効いており、ほとんど変形がなく安定を保っていた。100 G において下段の切り梁を除去した前後の変形の様子を示したのが Fig. 12 である。下段の切り梁の代わりに上段の切り梁が効き、上段切り梁の矢板支持点を中心に地盤が回転するように変形しており、陸側での変形が大きいことがわかる。

上段切り梁の除去後、地盤が安定したのでさらに遠心加速度を 150 G に上昇させ、今度は上段の切り梁をローディングシステムを用いて除去した。除去前後の変位状況を可視化したのが Fig. 13 である。明瞭なす

べり線の発生とともに陸側が大きく変形した。

事例をほぼ模擬した模型にもかかわらず、Fig. 1 (a) と Fig. 11 の崩壊後の形状が異なるのは、実験 W 5 において模型の切り梁強度が大きいと除去直前まで効いていたためと考えられる。実際には変形初期の段階で切り梁は連鎖的に座屈したと推定される。

5.6 崩壊のメカニズムの推定と災害防止対策

5.6.1 崩壊のメカニズムの推定

三段目の切り梁が無い状態で最終掘削面まで掘削を行った場合、二段目の切り梁等にかかる荷重を下方分担法によって求めると 63.7 tf/m となる。三段目の切り梁等がある場合の荷重 26.9 tf/m に比べ 2 倍以上の荷重が二段目の切り梁等に作用することになる。

この荷重が作用すると考えると二段目の腹起こしには許容せん断力の 2 倍以上の応力が作用し、切り梁との接合部で局部破壊が起こると考えられる。また、切り梁も曲げ作用面外座屈を起こす可能性が高い。

実際の現場においては、二段目の切り梁の荷重を受ける部分の腹起こしの損傷がひどく変形の程度が大きかった。また、切り梁はキリンジャッキ部で大きく曲がっていた。

また、タイロッド控えの鋼矢板の位置が掘削部に近かったため、この鋼矢板と締切り部の鋼矢板との間の地盤が倒れるように崩壊したと考えられる。この崩壊は、足下を押さえられて倒れるような崩壊であり、変形の進行過程で不安定化が増大するため、倒れきるまで変形がとまることなく進むと考えられる。

これらを総合して崩壊の経緯を推定すると次のようになる。これらが連続的に一瞬に発生したと考えられる。

- ①最下段（3 段目）の切り梁を省略したため、2 段目の切り梁、腹起こしに土圧が集中し、
- ②2 段目の腹起こしの局部破壊、切り梁の座屈
- ③ついで 1 段目の切り梁の座屈
- ④矢板の倒壊、泥水の締切り内への流入

5.6.1 災害防止対策

控えの矢板の設置位置が掘削部に近く、地盤変位の影響範囲内であったことが最終的にこのような崩壊に至った一因であり、急激な変形が生じたのは、このような土止めの配置に起因していると考えられる。もとより最下段の支保工が設計図どおり設置されていれば、崩壊に至ることはなかったと考えられるが、控え矢板はすべり線の範囲外に設置することが望ましいことはいふまでもない。

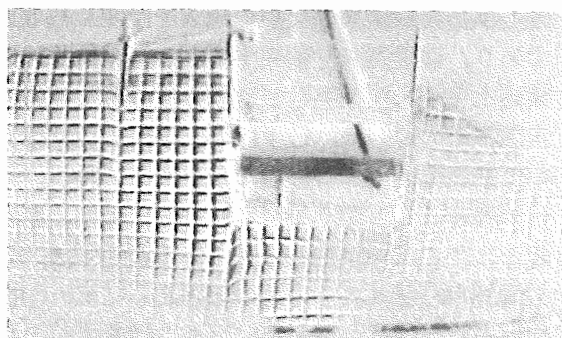


Fig. 12 Visualization of the deformation caused by removing lower struts in test W 5.

下段の切り梁除去による変位状況の可視化（実験 W 5）

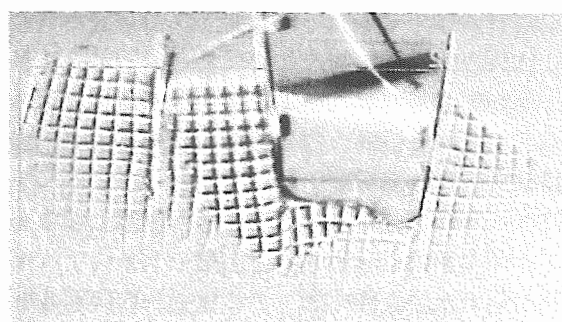


Fig. 13 Visualization of the deformation caused by removing upper struts in test W 5.

上段の切り梁除去による変位状況の可視化（実験 W 5）

Fig. 1 (a) に示したとおり、この掘削現場は川側と陸側で地盤形状が異なるため、偏土圧がかかる締切り工であり、そもそも慎重な設計・施工が必要な掘削工事である。そうした認識に基づき、現場管理を実施することが不可欠である。

本災害では火打ち梁のボルトが破断した時に補修を始めたが、この時点で最悪な事態を考慮して作業の継続の適否を判断する必要があったと言える。すなわち、この場合においては切り梁や腹起こし等の座屈、切梁等土止め材の落下、矢板の倒壊、泥水の流入等が考えられるものであり、直ちに作業を中止し、慎重に対応する必要があったものと考えられる。

地盤は安定な状態となるまで動くものであり、どのような挙動・変形を経て安定に至るかを予想し、安全を見極めることが大事であろう。

6. 結 論

土砂崩壊による労働災害事例を対象として遠心模型実験を行った。現場調査の結果と併せて検討した結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 遠心模型実験結果は実際の現象を説明し得るものであり、現場調査を補完するとともに防止対策の策定上も遠心模型実験が有効な手段となり得る。
- (2) 当該事故の原因は、最下段の三段目の切り梁を省いて最終掘削面まで掘削したため、二段目、一段目の腹起こしと切り梁が次々と局部破壊と座屈を起こしたことによると考えられる。
- (3) 労働災害に至ったその他の要因としては、①控え矢板の設置位置が掘削部に近く、地盤変位の影響範囲内であったため、控え矢板の位置から亀裂が発生し、②掘削底部の変形が少なかったため、矢板と控え矢板との間の地盤が足下を押さえられて倒

れるように崩壊し、倒れきるまで変形が進んだことが挙げられる。

なお、本研究は二国間型国際共同研究（科学技術庁）「デジタル・イメージ・プロセッシングの活用による崩壊予知」の一部として行われたものである。

参考文献

- 1) H.G.B. Allersma, The University of Delft geotechnical centrifuge. Int. Conf. Centrifuge 94, Balkema, Rotterdam, pp.47-52 (1994)

(平成 12 年 3 月 10 日受理)