

砂質地盤における泥水式シールドの 下限値泥水圧に関する遠心模型実験

CENTRIFUGE TEST ON THE FACE STABILITY OF SLURRY SHIELD TUNNEL IN SANDY GROUND

杉山博一¹⁾・後藤 茂²⁾

Hirokazu SUGIYAMA, Shigeru GOTO

A centrifuge model test were conducted for evaluating the lower limit pressure of face stability of slurry shield in sandy ground. The ground deformation caused by the decrease in the slurry pressure was observed by CCD camera during the test. The results were summarized as follows; (1)The deformation of sandy model ground developed to the ground surface in a constant width. (2)Rankine's active earth pressure may be over-designed as lower limit pressure of slurry. (3)The redistribution of earth pressure by the excavation should be taken into consideration in a exact study of lower limit pressure of slurry,

Key Words: slurry shield tunnel, centrifuge test, face stability, slurry pressure, sandy soil

1. はじめに

筆者らは泥水式シールドの切羽安定機構を解明するために遠心載荷装置を用いた切羽の安定模型実験を行っている。まず軟弱粘性土地盤を対象とした場合の泥水圧の下限値を検討するために鉛直方向の土圧と泥水圧のメカニズム的な検討を行い、切羽を安定させる泥水圧の下限値と地盤の粘着力の関係等に関していくつかの知見を得た^{1),2),3)}。しかし鉛直方向に地盤を支持する実験装置では砂質地盤は自立性がないため、泥水が地盤に浸透している間に地盤が崩落することが多く、十分なデータが得られずに詳細な検討をするまでに至らなかった。そこで自立性の低い砂質地盤での切羽安定の検討を目的として、本来のトンネルと同じ切羽面（鉛直面）を持つ実験土槽を新たに作製し遠心模型実験を行った⁴⁾。本論文ではこれまで行ってきた鉛直方向の実験結果と水平方向の実験結果について両者のメカニズムの違いを検討し、さらに従来から切羽泥水圧の下限値として用いられてきている Rankine の主働土圧や Terzaghi のゆるみ土圧などと実験結果を比較検討した。

2. 実験装置の概要

図-1に圧力泥水により鉛直方向に地盤を支持する機構を持った土槽および泥水圧力制御装置を示し、図-2に水平方向に地盤を支持する機構を持った土槽を示す。以降では前者の土槽を用いた実験を鉛直方向実験と呼び、後者を水平方向実験と称することにする。鉛直方向実験は圧力泥水で鉛直方向に地盤を支持する機構になるため、鉛直有効土圧と水圧の和と泥水圧の釣り合いを検討する実験となり、水平方向実験は圧力泥水で水平方向に地盤を支持する機構になるため、側方有効土圧と水圧の和と泥水圧の釣り合いを検討する実験となる。

(1) 土槽および泥水室

両土槽は大きさが若干異なるものの、基本的には模型地盤を入れる土槽部と泥水圧を制御する部分から成って

1) 正会員 修士(工学) 清水建設(株)技術研究所

2) 正会員 博士(工学) 清水建設(株)技術研究所

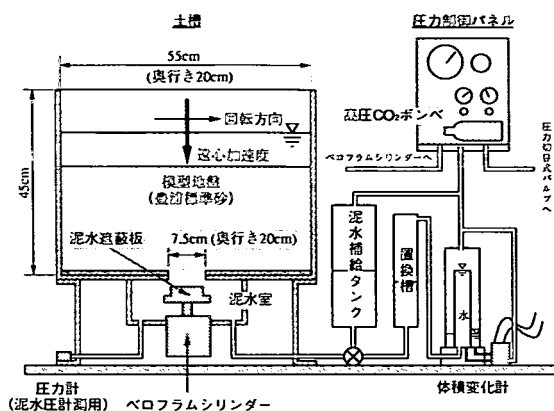
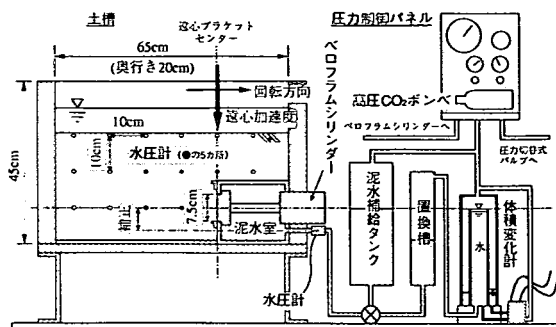


図-1 鉛直方向の検討をするための遠心模型
実験用土槽および泥水圧力制御装置



図一 2 水平方向の検討をするための遠心模型
実験用土槽および泥水圧力制御装置

いる。シールドチャンバーを模した泥水室には開口部が設けてあり、ここから地盤に圧力泥水を作用させて支持する機構になる。両土槽ともに開口の大きさは幅（または高さ）が7.5cm、奥行きが20cmとなっており、ベロフラムシリンダーにより開閉することができる。なお両土槽ともに平面ひずみ状態で実験している。

(2) 体積変化計

実験では泥水圧を除荷することにより模型地盤を安定状態から崩壊状態に変化させ、泥水室に流入する地盤の体積を計測するための装置（体積変化計と称す）を設けて地盤の変形状況を計測している。体積変化計は二重管式で内・外管ともに背圧との差圧を計測する機構になっており、その結果から管内の水位変化、および体積変化量を順次計算して求めている。構造的には内管の頂部は切羽面の中心と同じ高さにしてあり、泥水室と連通している。そのため地盤が崩壊した際には外管へオーバーフローさせることで水位を保つことができるため、遠心応力場でも安定した泥水圧を地盤に作用させることができる。また計測可能な容量は内管を水で満たした状態を初期状態として $\pm 200\text{cm}^3$ である。これら圧力制御装置は地上から遠心載荷装置の中央に搭載した圧力制御パネルを遠隔操作することにより泥水圧の載荷・除荷および切羽部開口やバルブ関係の開閉がすべてできるようになっている。

3. 実験の概要

(1) 模型地盤

模型地盤は豊浦標準砂を用い、空中落下法によりまき出すことで密度が一定になるように作製した。土槽と地盤との摩擦を低減させる目的で土槽側壁にシリコンオイルを塗布し、その上にメンブレンシートを全面に貼付したが、地盤の変形を観察するために一方の側面はアクリルボードを使用しており、メンブレンシートを貼らずに実験したものもある。その際にはマーキングのために着色した豊浦標準砂を5cm間隔で層状に薄くまいている。また開口部を開放した直後の泥水浸透時に切羽が崩落するのを防止するため、開口部の前面に市販の工作粘土を厚さ2～3mm程度で貼り、これを泥膜として開口部を開放した直後に有効に泥水圧を地盤に伝達させるようにした。なお、あらかじめ実験で使った砂および泥水を用いて静的な泥水の浸透実験を行い、図-3に示すように30秒ほどで泥膜ができることを確認して

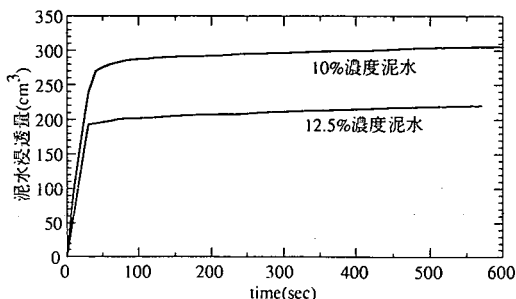


図-3 泥水の浸透実験結果

いる。

模型地盤はまきだし終了後、CO₂ ガスを通気し、脱気水を通水することにより飽和させた。

(2)泥水

模型地盤を支持する泥水には豊潤（浅間印）ベントナイトの10% 濃度、および一部12.5%濃度の溶液を用いた。各濃度に関する泥水性状は表-1,2の実験条件に示した。

(3)実験手順

- 実験手順は以下の通りである。
- ①模型地盤を作製した後、泥水を泥水室および泥水タンクに満たす。
 - ②土槽を遠心载荷装置のプラットフォームに搭載し、所定の回転速度で回転させることで一定の遠心加速度を作用させる。但し、作用させた遠心加速度は実験条件により異なる。
 - ③泥水圧を切羽部での土圧+水圧相当まで上昇させた後、開口部を開放し泥水圧により地盤を支持させる。
 - ④泥水圧を徐々に除荷し、その時の地盤の泥水室側への流入量（変形量）を計測するとともに、CCD カメラで地盤の変形状況を観察する。
 - ⑤体積変化計の指示値、およびCCDカメラによる目視で地盤が完全に崩壊したのを確認した後に開口部を閉鎖し、泥水圧の除荷、遠心载荷の停止などを行う。

(4)実験条件

表-1に鉛直方向実験の実験条件を、表-2に水平方向実験の実験条件を示す。表に示すとおり遠心加速度、地盤の高さ、および水位を変化させて応力状態を変化させている。なお表に示す各応力は計算して求めたものである。これは土圧計などの計器を設置することによる地盤への補強効果为了避免のためであり、あえて計器を設置していない。また水平方向の有効土圧は、実験と同程度の密度の試料の三軸（CD）試験で求めた内部摩擦角（ $\phi' = 40.1^\circ$ ）の値を用いてJakeyの式によりK₀値を求め、鉛直方向の有効土圧に乗じて求めている。

表－１ 鉛直方向実験の実験条件

		V-1	V-2	V-3
開口部位置からの地盤高さ(cm)		31	26	21
開口部位置の水深(cm)		36	36	36
遠心加速度(G)		30	30	30
開口部中心位置 の応力状態 (計算値)	$\sigma'_v(\text{kgf/cm}^2)$	0.86	0.72	0.59
	$\sigma'_h(\text{kgf/cm}^2)$	0.31	0.26	0.21
	$\sigma_w(\text{kgf/cm}^2)$	1.0	1.0	1.0
泥水	濃度(%)	10	10	10
	密度(g/cm ³)	1.05	1.05	1.05

表－２ 水平方向実験の実験条件

		H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6	H-7
開口部中央からの地盤高さ(cm)		21	16	21	21	16	15	15
開口部中央までの水深(cm)		21	21	21	21	21	20	15
遠心加速度(G)		30	30	50	50	50	50	50
開口部中心位置 の応力状態 (計算値)	$\sigma'_v(\text{kgf/cm}^2)$	0.59	0.45	0.99	0.99	0.75	0.71	0.71
	$\sigma'_h(\text{kgf/cm}^2)$	0.21	0.16	0.35	0.35	0.27	0.25	0.25
	$\sigma_w(\text{kgf/cm}^2)$	0.63	0.63	1.05	1.05	1.05	1.00	0.75
泥水	濃度(%)	10	10	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
	密度(g/cm³)	1.05	1.05	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07

4. 実験結果

実験中はCCDカメラで土槽側面から地盤の様子が観察できるため、その様子をビデオ撮影した。図-4は鉛直方向実験終了後の土槽中の地盤の変形状況であり、図-5は水平方向実験のものである。両者の崩壊状況はまず最初に開口部付近の地盤が崩壊し始め、次に崩壊範囲直上の地盤の重みによって順次崩落し、結果的に開口部付近での崩壊幅がそのまま地表面に達したものである。図-6は参考のために粘性土地盤の実験結果を示したもののだが、

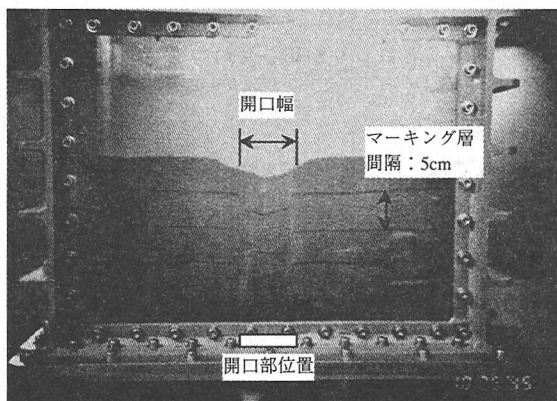


図-4 鉛直方向実験終了後の地盤の変形状況

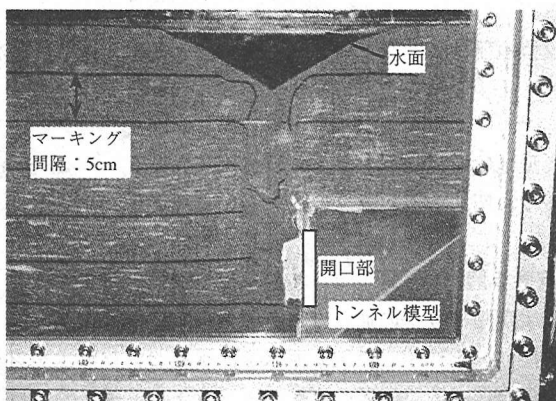


図-5 水平方向実験終了後の地盤の変形状況

開口部の端部より無数のすべり線を生じ、地表面に向かって幅広い領域で変形しており、土質による崩壊形態の違いをみることができる。

泥水圧の下限值はビデオのタイマーにより地盤が大きく変形し始める時間を特定し、計測データと照合することにより決定した。

5. 考察

図-7は両実験における開口部での力の釣り合いの概念図を示すものだが、開口部付近の地盤には鉛直または水平全土圧と泥水圧の差に相当するせん断力が作用している。また、砂質地盤のせん断強度は拘束圧に依存することから、破壊時の全土圧と泥水圧の差は地盤の応力状態

に強く支配されることが考えられる。そこで、各実験結果から実験初期の鉛直全土圧または水平全土圧と地盤が崩壊し始めた時の泥水圧との差（地盤に作用するせん断力の一種）を算出し、鉛直または水平全土圧との関係について示したものが図-8である。この図より一般的に初期の全土圧が大きいほど崩壊時の圧力の差が大きいということが言えるが、鉛直方向実験の結果と水平方向実験の結果とでは傾向が異なっている。

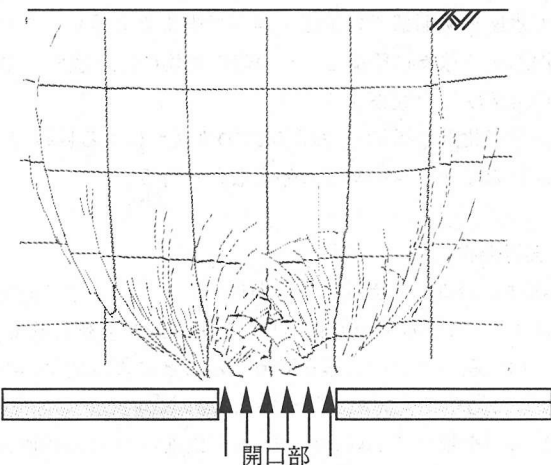
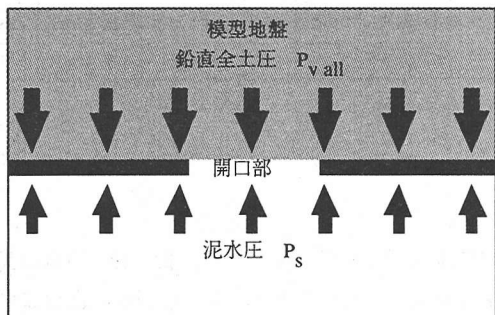
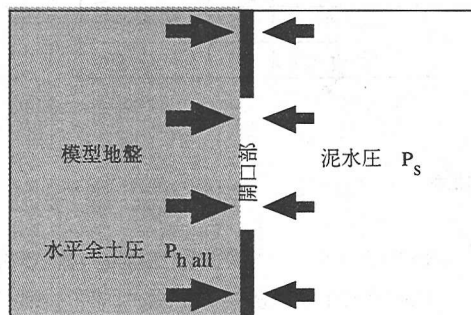


図-6 粘性土地盤での地盤の変形状況（スケッチ）

図-9は鉛直方向実験では水平方向の有効土圧を実験中一定と仮定し、水平方向実験では鉛直方向の有効土圧を



(a) 鉛直方向実験



(b) 水平方向実験

図-7 開口部での力の釣り合い概念図

一定と仮定した場合に求められる主応力の最小値、つまり Rankine の主働土圧をモール円で示したものである。この計算方法により求められた主働土圧（計算値）と実験結果を比べたものが図-10であり、シールド切羽と同じ形態の水平方向実験では主働土圧を泥水圧下限値とした場合に安全側であると言えるが、崩壊時を考えた場合、鉛直方向の応力が変化しないとは考えにくい。

一方で泥水圧の下限値を検討する別の手法として Terzaghi

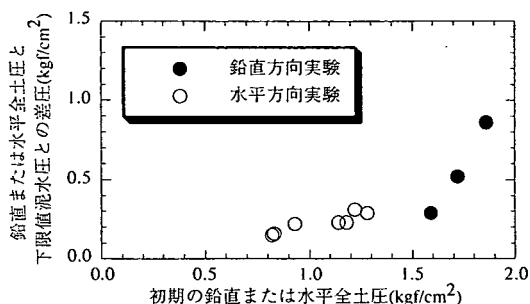


図-8 全土圧と差圧（地盤に作用するせん断力の一種）との関係

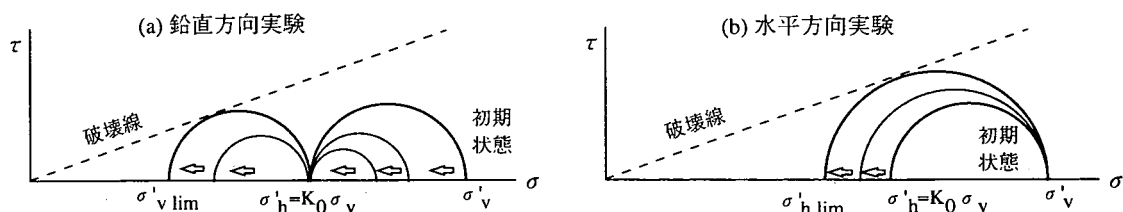


図-9 地盤の応力状態の変化（主働土圧）

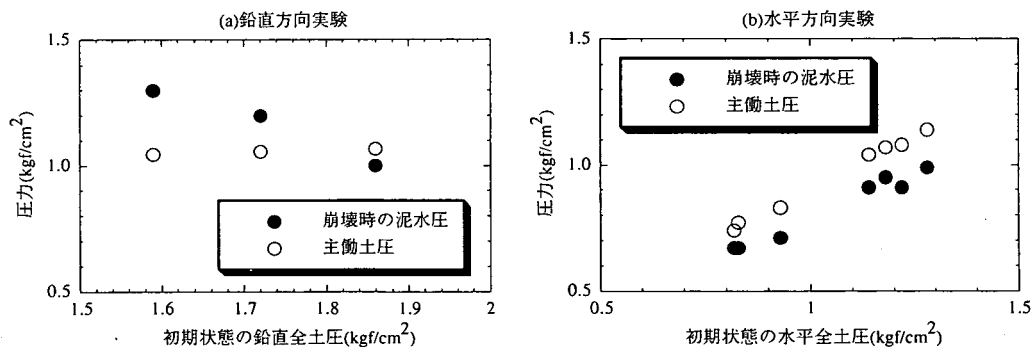
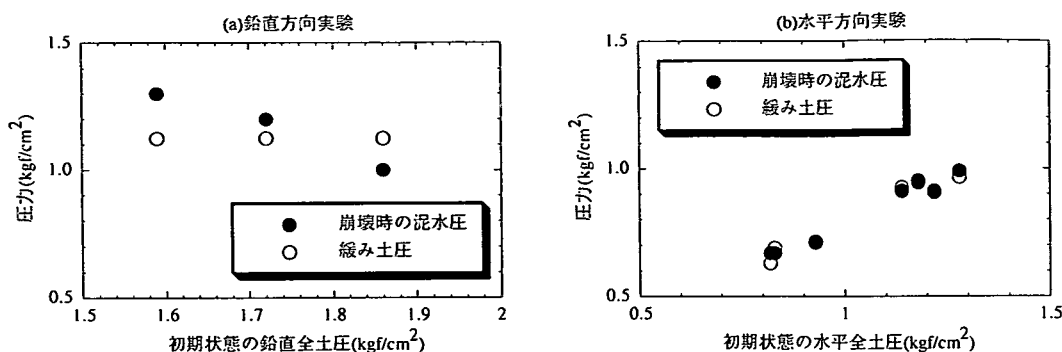


図-10 崩壊時泥水圧と主働土圧の比較

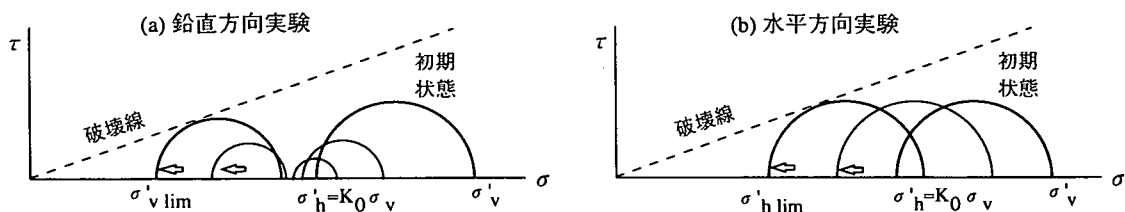
のゆるみ土圧の式がある。この式はいわゆる落し戸実験から求められたものであり、鉛直方向実験はこれと同じような機構の実験になる。しかし、本実験は圧力泥水で地盤を支持するため、地盤には一様な圧力がかかるのに対し、落し戸実験では応力集中により支持する場所によって土圧が異なるという点でメカニズム的には多少異なる。図-11は鉛直実験結果とゆるみ土圧（計算値）を比べたものである。この図から落し戸実験の機構に似た鉛直方向実験では明確な関係を見出すことはできないが、水平方向実験では実験結果と計算結果とがよく一致していることが分かる。

図-12はゆるみ土圧の概念をモール円で考えた場合の概念図であるが、鉛直方向実験では初期状態で最大主応力であった鉛直土圧が応力再配分によって減少しながら水平方向土圧も減少し、ある時点で鉛直方向土圧が最大主応力から最小主応力に転じた後、最終的な破壊時のモール円に至ることが考えられる。一方で水平方向実験では最小主応力である水平方向土圧が減少しているが、それに伴って応力解放が進み、鉛直方向土圧も減少しているという考え方であり、実験結果と一致する傾向がみられたのもこのような応力再配分の影響が取り入れられているためと思われる。

しかしながら今回の実験の範囲ではゆるみ土圧（有効応力）自体が非常に小さいことから、ゆるみ土圧の妥当性を十分に確認するまでには至っておらず今後、さらに検討する必要がある。



図一 1 1 崩壊時泥水圧とゆるみ土圧（計算値）との関係



図一 1 2 地盤の応力状態の変化（ゆるみを考慮した場合）

6. まとめ

泥水式シールドにおける切羽安定泥水圧のうち泥水圧の下限値を検討するために遠心模型実験を行い、砂質地盤に関する検討を行った。シールド切羽における安定検討は通常側方についてのみ行っているが、テールボイドなどでは鉛直方向も検討対象となるため、鉛直方向における安定検討（鉛直方向実験）と水平方向における安定検討（水平方向実験）を行い、比較検討した。得られた結論は以下の通りである。

- ①砂質地盤の崩壊領域は基本的には切羽の部分的な崩壊が地表面まで垂直に進展するのに対し、粘性土地盤では地表に向かって変形領域が広がっている。
- ②泥水圧の下限値に Rankine の主動土圧を用いた場合は安全側となるが、地盤破壊時のメカニズムとして考えた場合、鉛直方向の土圧が変化しないという仮定が成り立たないため実際の破壊メカニズムとは異なる可能性が高い。
- ③厳密な泥水圧の下限値を検討する場合には、Terzaghi のゆるみ土圧のような応力再配分を考慮した理論を用いる必要があり、本研究の範囲ではゆるみ土圧の妥当性が確認できた。

参考文献：

- 1)後藤他「軟弱粘性土地盤の切羽安定泥水圧検討のための遠心模型実験」,
第 50 回土木学会年次学術講演会, Ⅲ部門, pp1304-1305, 1995.
- 2)杉山他「軟弱粘性土地盤の切羽安定泥水圧検討のための遠心模型実験（その 2）」,
第 51 回土木学会年次学術講演会, Ⅲ部門-B, pp328-329, 1996.
- 3)後藤他「遠心応力場での圧力泥水による地盤支持実験」,
土木学会論文集, Ⅲ部門, 1997.9 月号.
- 4)杉山他「遠心模型実験による泥水式シールドの切羽安定実験」,
第 52 回土木学会年次大会学術講演会, Ⅲ部門-B, pp206-207, 1997.