砂地盤における地下連続壁掘削溝の安定性について

Stability of slurry trench in sandy ground

名倉克博* (Katsuhiro Nagura) 樋口雄一** (Yuichi Higuchi)

本研究は、安定液掘削溝の安定性に対する評価手法を確立するために行っている。ここでは、砂地盤における 掘削溝の破壊形態を調べ、破壊要因との関連性を調べるため、小型模型実験と遠心力載荷実験を行ない、以下の 結果が得られた。①安定液掘削溝の破壊には、浸透破壊と土塊すべり破壊の2つの形態がある。②浸透破壊に対 しては、水位差と浸透距離との比(浸透勾配)の影響が大きく関与している。③安定液掘削溝の安定問題につい て相似則を考慮した遠心模型実験が可能になった。④掘削溝深さと安定に必要な水位差との間には、二次元条件 では直線的な関係があるが、三次元条件では曲線となり、ある値に収束する。これは実施工における経験則に合 致する。⑤掘削溝の幅Bに比して掘削長しが短くなるに従い、安定に必要な水位差ΔHは小さくなる。これは、 「三次元効果」によるもので、水平方向のアーチ作用により土塊の滑動力が低減されたことによる。⑥安定液掘 削溝の破壊時の土塊形状を近似して滑りに対する安定計算を行なったところ、ばらつきがあるものの実験結果を 比較的よく表現できた。

キーワード:地下連続壁/安定液/砂地盤/掘削溝/遠心力載荷実験/安定機構 IGC:K10/E6

1. まえがき

ベントナイトを主成分とする安定液を使用した地盤掘削技術は、19世紀末に石油ボーリングの分野で採用され、 その技術が1930年代初めに建設分野の地下連続壁工事に採用された。その後、1950年代になってこの掘削工法が 著しく発達し、わが国でも同時期から技術導入され、実用化された。その後、施工に関する技術は多くの開発と 改良が加えられて飛躍的に進歩してきた。しかし、掘削溝の安定問題に関する理論的検討は、多くの研究者が提 案を行っているものの¹⁾²⁾、いまだに確立した計算法がないため、事前予測が正確にできない状態である。この 原因として、第一に安定機構に係わる要因が多く、また地盤。掘削安定液・掘削形状・掘削方法・地下水位など の諸性状が複雑でかつ相互に絡み合っていること、第二に実工事での正確な崩壊記録が非常に少ないこと、第三 に掘削満の崩壊現象を実験的に再現することが困難であること等が考えられる。

しかし近年、大規模なLNG地下タンク工事、長大橋の基礎、大断面シールドトンネルの大型立坑などの建設 において、掘削深さが 100mを越え、壁厚が2m以上の大深度大断面地下連続壁工事が行われるようになってき た。また、大都市における地下連続壁工事は、他の地下構造物との近接施工となる場合が多くなってきた。この ような背景から、より安全で合理的な施工を行うために、益々掘削溝の安定性を定量的に正確に評価する手法が 求められている。

本研究は、安定液掘削溝の安定性に対する新しい評価手法を確立するために行っているもので、ここでは、砂 地盤における安定液掘削溝の破壊要因を調べ、遠心力載荷実験装置を用いた模型実験による掘削溝の安定に対す る検討結果について報告する。

2. 連壁掘削溝の崩壊形態と要因抽出

連壁掘削溝の破壊が発生する要因としては、一般的に次のような項目が考えられる。

* 大成建設株式会社技術研究所 山口大学大学院博士課程

**大成建設株式会社技術研究所

① 地 盤:地盤強度が小さいと破壊しやすく、また高透水性地層が介在すると破壊しやすい。

② 地 下 水:安定液水位と地下水位との水位差が小さいと不安定となり、被圧水・雨水の流入がある と破壊しやすい。

③ 安 定 液:安定液の造壁性・比重などが適切でないと破壊しやすい。

④ 掘削形状(1):隅角部をもった掘削形状が存在したり、掘削長(平面)が大きいと破壊しやすい。

⑤ 掘 削 深 度:掘削深度が大きくなり、掘削時間が長いと破壊しやすい。

⑥ 荷 重:溝壁に施工機械が近接し過ぎると、破壊しやすい。

これらの要因が溝壁の安定にどの様に関連しているかをすべてを定量的に把握することは難しい。そこで、主 な要因の関連性について調査する。

図-1は、砂地盤における連壁掘削溝壁の破壊例を示したもので、 (a)は超音波記録を (b)は超音波記録を基 にして図示したものである。

(a) の地盤は、G.L. - 8.5m以浅は沖積層でシルト分が30%含有しており、それ以下は細粒分が少ない洪積砂層である。破壊は地層の層境付近の洪積砂層側で局所破壊が生じた。安定液は、粘土を重量比で10%だけ混ぜた もので、比重は1.08であるが、API規格の濾過水量は 100m ℓ/30min 以上もあり、安定液による溝壁面の泥 膜(フィルターケーキ)の性状がよくなかった。

(b) の地盤は、緩い沖積砂層で、G.L. - 8mまでは薄くシルト層を挟んでおり、それ以深は、締まった砂層が続く。安定液は、比重が 1.035、ファンネル粘度 30sec、濾過水量13.6m & / 30min と大変良好な性状であった。 ただし、安定液水位と地下水位との水位差を 1.1mで掘削していたが、破壊が生じた日の前日から降雨が続いており、地下水位が上昇していた可能性がある。

これらの図にみられるように、連壁掘削溝の破壊形態としては、図-1(a)に示すようなある掘削深さにおいて 溝壁が局部的に崩壊する局所破壊のタイプと、(b) に示すような掘削長全域にわたって掘削溝から地表面までの 土塊すべり破壊のタイプがあることが分る。



3. 小型模型による掘削溝破壊実験³⁾

安定液掘削溝の安定機構を検討するに当たって、まず地盤特性。地下水位。安定液の特性と液面高。掘削形状 と深度などの主要因がそれぞれがどのように関係しているのかを調べるための模型実験を行った。

3.1 実験装置·使用材料。実験方法

実験装置は、現実の安定液掘削方式と同様に溝壁が地表面から形成されるように、図-2に示すような中仕切板を下方に押し込む方式の小型実験装置(L300×B200×B200m)を作成した。仕切板にはシリコングリスを薄く

塗布した。また、この装置には、安定液水位と地下水位を任意の高さに可変できる供給装置を両側に取り付けた。 使用した模擬地盤は、図-3に示す3種類の乾燥砂を土槽内にロートを用いて砂面上約1 cmから落下させて充 填し、ゆっくり地下水で飽和させたもので、その平均物性を表-1に示す。なお透水係数は、直径100 mm,高さ 200 mmのモールドに土槽実験で用いた密度に合わせるよう充填した供試体を、定水位透水供試体で求めたもので ある。また、安定液は、2~10%の群馬産ベントナイトと0~0.5 %のCMC(カルボキシルメチルセルロース) を配合した。安定液と地下水との水位差は、2,4,10 cmとし、安定液面を地表面に一致させた。

実験は、中仕切板を1 cm/min の速度で押し込み、この時、掘削溝壁面の破壊形状および安定液の砂地盤への 浸透状況を調べた。浸透量はあらかじめウラニンを土槽内のガラス面近くの砂に少量づつ層状に添加しておき、 その色の変化を測定することにより求めた。



図-2 実験装置(単位mm)



実験時 <u> 地盤</u> 使用秘 檀淮利 6号珪砂 4号珪砂 の平均物性 0.70 間 0.87 0.85 間 (e) 局 除 比 (emax) 最大間隙比 (emax) 最小間隙比 (emin) 0.97 0.79 0.960.59 $0.54 \\ 2.67$ (e_{min}) 0.61 (Gs) $\frac{2.65}{74.0}$ 2.6768.5 64.4 相対 度 (%) 透水係数 (cm/sec) 2×10⁻ 7×10 4×10

3.2 実験結果

3.2.1 掘削溝壁付近の観察

図-4~6は、安定液の粘性・地盤の透水係数・水位差などの溝壁安定要因のうち、一つの条件を変化させた 時の溝壁面状況と安定液の浸透状況について調べたものの代表例を示したものである。縦軸は、地盤の厚さ乙。 と中仕切板押込量(掘削量) z との比 z / Z。(開口率)を表し、横軸は中仕切板からの距離を示した。なお開 口率が1.0 の時、中仕切板を上槽底辺まで押し込んだことを示す。また、図中の実線は安定液の浸透線を、破線 は濃壁形状を示し、数字は経過時間(分)を示す。

図-4は、地盤Aを掘削する場合、安定液中のベントナイト量を変化させたとき、安定液が地盤へ浸透してい く状況とその時の溝壁の状況を示したものである。これから安定液の濃度が大きいほど溝壁は安定し、浸透量も 少ないことが分かる。とくに溝壁が自立した場合の浸透量は非常に少なく長時間放置していても浸透層の厚さは 変化しなかった。

図-5は、地盤の粒径(透水係数)を変化させたときの状況である。安定液の浸透量は、砂の粒径が大きくな るほど多くなり、かつ溝壁は浸透量の増大と共に大きく破壊した。

図-6は、安定液水位と地下水位との水位差を変化させたときの状況を示したものである。これによると、水 位差が大きいと安定液の浸透量も多くなるが、溝壁は安定する。

3.2.2 掘削溝壁状況と安定要因との関係

溝壁の状況について、安定液配合・砂の粒径・水位差との関係をみるために、実験結果を表-2にまとめた。 表中の●印は、掘削溝が自立したときを、〇印は破壊したときを示している。

これから溝壁の安定は、安定液配合・地盤の透水係数および安定液水位と地下水位との水位差とに非常に高い

名倉 樋口





図-6 水位差と浸透破壊との関係



表-2 溝壁の安定状況と安定要因との関係



BENT.CMC ... %, Δh ... 水位差 (cm), 入 ... 地盤

相関があることが認められる。すなわち同一地盤の場合、溝壁を安定させるには、ベントナイトあるいはCMC により安定液の粘性を上げるか水位差を大きくすればよいことが分かる。なお、安定液の濃度を、ベントナイト を増やした場合とCMCを増やした場合とを比較してみると、ベントナイトの方が溝壁の安定に寄与しているこ とが分かる。これはCMC溶液が水溶液であるのに対し、ベントナイト溶液は懸濁液なので安定液が溝壁で目詰 りを起しやすいためと考えられる。(実際工事では安定液中に掘削土砂の細粒分が混入してくるので、この様な 顕著な差異が生じない。)さらに同表から、砂の粒径が大きくなるほど、すなわち透水係数が大きいほど、溝壁 が安定し難くなっている。

この表をもとに、掘削溝壁と安定要因(地盤、水位差、安定液の粘性ここではファンネル粘度)の関係につい て表したものが、図-7である。この図において、各曲線の上側が溝壁の安定域を、下側が破壊域を表している。 この図から、水位差・安定液の粘性が小さい程、砂の粒径が大きい程、すなわち透水係数が大きいほど溝壁は不 安定で破壊しやすいことが分かる。

図4~図6から、掘削溝壁の安定は、安定液が砂地盤に浸透する層厚に深く関係することが分かった。 ビンガム流体のパイプフローの一般式は、次式で与えられる。

 $\Delta h / \ell = (2 T_F / \gamma_F) / R$ ----- (1) ここに、 ℓ:細管長、 R:細管の半径 *て***_F : ビンガム流体のイールドバリュー、** *γ***_F : 流体の単位体積重量**

この式の ℓを安定液が溝壁から浸透する距離、Rを地盤の間隙と仮定すると、浸透距離 ℓは、水位差Δh安定液

の性質 (T_F / Δ_F)及び地盤の空隙に関係する。

図-8は、溝壁状況と安定液の浸透距離と水位差との比($\Delta h / \ell$)との関係についてまとめたものである。 図中の縦軸は、自立高さと模型地盤高さの比(Z_f / Z_o)を表し、横軸は水位差(Δh)と中仕切板からの最 大浸透距離 ℓ_{max} との比($\Delta h / \ell_{max}$:以下これを単に浸透勾配と呼ぶ)を示す。同図によると $\Delta h / \ell_{max}$ の値が小さい時には Z_f / Z_o が1より小さくなり、溝壁が破壊する様子が分かる。逆に、 $\Delta h / \ell_{max}$ の値が 大きいときには Z_f / Z_o の値も大きくなり、 $\Delta h / \ell_{max}$ がある値以上になると、 $Z_f / Z_o = 1.0$ となり掴 削溝壁は自立している。以上のことから、安定液の浸透破壊に対しては、浸透勾配が大きな要因を占めており、 この値により溝壁が破壊したり安定したりする事が明らかになった。なお、これらの結果はあくまで小さな模型 実験に対するものであり、実際の施工に定量的評価ができるまでに至っていない。

2. で述べた図-1の破壊は、(a) の場合は溝壁面に生ずるフィルターケーキ(泥膜)の透水係数が大きいこと(造壁性が悪いこと)により浸透勾配が小さくなって破壊した場合であり、(b) の場合は雨水の地盤浸透により水位差が小さくなることにより浸透勾配が小さくなって破壊したものと考えられる。



4. 遠心力載荷実験4)5)

浸透破壊を発生させないように施工した場合の掘削溝の安定問題は、安定液圧と地下水圧および掘削に伴う地 盤内の応力解放による土塊すべりの安定問題に帰着する。これに対しては、遠心載荷装置を用いて二次元・三次 元模型実験を行った。その時、破壊形状の観察を行なうと共に、溝壁安定と掘削深さ、掘削長、掘削幅および地 下水位などの要因との関連性について調べた。

4.1 実験装置

実験で用いた遠心力載荷装置は、大阪市立大学のMk-V(公称半径2.56m,最大遠心加速度 200g)である。 本装置は、アームを回転することにより模型地盤に遠心力を作用させ、実地盤に相当する応力を与えること ができるものである。模型実験装置を写真-1、図-9に示す。遠心装置のアームの先端にスウィング式の プラットフォームを取り付け、その上に模型容器(幅46cm、高さ30cm、奥行き16cm)を乗せる。模型容器は隔壁 で二分され、右側に模型地盤と掘削溝が、左側に送泥装置がある。この装置は安定液水位を常に地表面に一致さ せるために、遠心力場で電動モータによりピストンをシリンダに押し込み、シリンダ内の安定液を掘削溝に送る ものである。地下水位は、水タンク兼用のプラットフォームに圧搾空気を送ることにより制御する。安定液水位 と地下水位は、間隙水圧計で測定し、地表面の地盤変位は、厚さ0.15mmのりん青銅板で作った片持ちばり式 変位計で測定した。 名倉 樋口



写真-1 遠心模型実験装置



図-9 遠心模型(単位mm)

4.2 使用材料

地盤材料は瀬戸珪砂の7号、8号、特粉を乾燥重量比2:2:1で混合したもの(以下、S-7%Tと呼ぶ)と 珪砂7号(S-7と呼ぶ)の2種類を用いた。地盤材料の粒度分布を図-1%に、材料特性を表-3に示す。S-7%Tを用いた模型地盤は、初期密度 γ_d =1.4%g/cm³(相対密度Dr=4%)で、S-7地盤は γ_d =1.4%g/cm³(相対密度Dr=4%)で作成した。表-3中に、この密度で締め固めたときの透水係数kの値を示した。

安定液は一般的な配合とし、ベントナイト濃度6%、CMC濃度 0.1%の1種類で、その性状はファンネル粘度29秒、比重1.03、濾過水量1000である。



図-10 模型地盤の粒度分布

表-3 地盤材料の特性

地盤	Gs	Uc	γdmax (g/cm ³)	γdmin (g/cm ³)	k (cm/sec)
S – 78T	2.68	8.0	1.73	1.27	2.2×10^{-4}
S – 7	2.67	2.3	1.72	1.35	4.1×10^{-3}

4.3 実験方法

掘削溝は、二次元と三次元の2通りのモデル化を行った。二次元模型は、掘削長を模型容器の奥行き寸法としたもので、三次元模型は、図-9に示す実物の掘削溝を2本の対称軸で分割した1/4模型である。なお、座標軸は、ガラス面に平行な方向をx軸とし、直角方向(奥行方向)をy軸、掘削深さ方向をz軸とする。なお、小文字は模型の座標系を、大文字はプロトタイプに変換した座標系を示す。三次元実験では、溝壁安定に関する要因として掘削深さ2のほかに掘削長と掘削幅の比(アスペクト比)L/Bによる影響も調べた。実験は次の手順により行った。

(1) 模型実験の作成

実験容器を横倒しにして掘削溝に相当する位置にダミー板を取り付け、気乾状態の地盤材料を口径1 cmのロートを用いて、材料分離を防ぐためにふるい(網目3 mm、3 枚重ね)を通して容器に流し込む。三次元実験では実験後に破壊形状を観察するために、模型地盤内に着色した砂の水平層を作った。ガラス面には、地盤材料との間の摩擦係数を低減させるために寒天膜を薄く塗布した。その後ガラス蓋を取り付け、容器を建て起こしプラットフォームに乗せ、地盤をゆっくりと飽和し、遠心載荷する。遠心載荷中は、地下水位が地表面を保つように制御する。

(2) 地下水位上昇による掘削溝の破壊

・ 遠心載荷を止め、地下水位を掘削溝底付近まで下げ、地盤にわずかな自立性をもたせ、掘削溝に安定液を送りながらダミー板を引き抜き、安定液掘削溝を形成する。安定液を充分に浸透させた後、再び遠心載荷する。安定液水位をG.L.±0 cmに、地下水位をG.L.−7 cm程度に制御しながら遠心加速度を上昇させる。所定の遠心加速度に達したら、安定液水位をG.L.±0 cmに保ちながら地下水位をゆっくりと上昇させて掘削溝を破壊させる。

4.4 実験結果

(1) 相似則

違心模型実験の相似則は、模型の幾何学的縮尺を変え、それに応じた遠心力を付与することで確認した。図-11は、掘削深度が15mに相当する2次元遠心模型を3種作成し載荷して、その時の破壊水位差を求めたものであ る。これから実験条件の違いによる破壊時の水位差にはほとんど差がないことがわかる。3次元模型実験におい ても、遠心加速度を50g、100 g、150 gに相当する3種の縮尺模型を作成して同様な実験を行い、破壊時の水 位差ΔHを図-13(a) のZ=10m付近の〇印で示した。これらの値はほぼ一致しており、破壊形状も似ていたこ とから、三次元実験でも相似則が成り立つのが認められた。

(2) 掘削深さ(Z)と水位差(△H)関係

図-12は、二次元実験における2種類の地盤に対する掘削深さ(乙)とその時の土塊すべり破壊を起こす水位 差(ΔH)を示したものである。これを見ると、地盤により異なるものの、乙-ΔHには直線的な関係がある。 同様な実験を掘削長Lと掘削幅Bとの比(アスペクト比)L/B=4.5 に対する掘削深さ乙と破壊時の水位差Δ Hの関係をそれぞれ図-13(4)(b)に示す。三次元掘削溝の安定に必要な水位差ΔHは、S-78T地盤、S-7地 盤とも二次元掘削溝のそれよりも小さな水位差で安定している。またに2次元模型の乙-ΔH関係が直線上であ るのに対し、三次元模型では曲線となりΔHは掘削深さ乙と共に増加するが、ある値に近づく傾向が見られる。 これは、実際の施工における「水位差をある値以上に保てば掘削溝は破壊しない」という経験則と合致している。







図-12 二次元模型実験によるZ-ΔHの関係



図-13 三次元模型実験によるZ-ΔHの関係

(3) L / B - △ H 関係

図-14に、Z = 20mの時のアスペクト比L/Bと破壊時の水 位差 Δ Hの関係を示す。 Δ HはL/Bの増加にともない増加し、 さらにL/Bが増えると二次元実験(L/B= ∞)の Δ H値に 収束する。またL/Bが減少してていくと、いわゆる「三次元 効果」により安定に必要な水位差 Δ Hは小さくて済む。

(4)破壞形状

図-15は、二次元実験での破壊形状を示す。掘削深さに応じ て破壊線の生じる深さも大きくなる。また、地表面における破 壊線の発生位置X。も掘削深さにと共に徐々に大きくなるもの の、掘削深さZ ≥ 20m (100 g以上)ではあまり変わらない。



図-14 アスペクト比と水位差

三次元実験の破壊形状は、実験終了後ワイヤーソーを用いて模型地盤をガラス面に平行な鉛直面で1 mm~1 cm づつカットして観測した。写真-2は、観測例(溝寸法 ℓ = 4.5 cm, b = 1 cm、z = 20 cm、遠心加速度 100 g) である。破壊線はどのカット面でも溝底部より生じ、破壊土塊の形状は溝端部に近づくにしたがい細くなってい く様子がよく分かる。各カット面の撮影写真から破壊線の形状測定し、三次元破壊面形状を得た。この破壊面形 状データから各水平断面における破壊線を求めた結果の1例を図-16に示す。これらの破壊線は、L/B=1.0 を除けばいずれも掘削溝端部を通過する曲線であった。砂のような粒状体に生じる応力は周囲に伝達され、アー チ作用が生ずる。三次元掘削溝では、掘削溝に崩落しようとする滑動力の一部は溝端部へも伝達されるので、 二次元掘削溝の場合の滑動力に比べて低減される。前述した「三次元効果」とは、主に水平方向のアーチ作用に よるものと考えられる。



図-15 二次元破壊形状の一例



図-16 三次元破壊形状の一例(平面形状) (Z=20m, L/B=4.5)



 y = 0.5 cm y = 3.5 cm y = 4.2 cm y = 4.4 cm

 (Y = 0 m) (Y = 1.5 m) (Y = 3.5 m) (Y = 4.2 m) (Y = 4.4 m)

 写真 - 2
 三次元破壞形状の一例
 $(Z = 20 \text{ m}, L \nearrow B = 4.5)$

5. 破壊土塊の安全率

遠心実験の結果から、図-17に破壊形状の近似方法を示す。こ のすべり土塊形状の特徴は、①任意のY面(鉛直面)上で破壊底 Z=Z。を通り、地表面で直交し、②任意のZ面(水平面)上で は溝端部Y=0と直交する。この破壊形状を近似する連続関数と して、①は、地表面に中心を持ちZ=Z。を通る円弧とし、②の 水平方向の形状は、式(2)に示すような溝端部Y=L/2を通る 指数関数で表せると仮定し、図-16に示した破壊線をカーブフィ ッティングして係数C1, C2を決定した。

$$X = C_1 \cdot e_X p_1(Y^m) + C_2$$
; $m = 1 \neq \phi_d$ ---- (2)



図-17 三次元破壊形状の近似

計算のため、この土塊をX, Y方向に鉛直な柱に分割し、土塊の 安全率はJanbu 法を三次元に拡張し、式(3) を用いて計算した。

安定液圧は溝壁に三角形分布で与え、地下水位は破壊時の測定結果を用いた。また使用した地盤定数を表-4に 示す。

$$F_{s} = \frac{1}{\sum_{i,j} (W \cdot \tan \alpha \cdot \cos \beta) - P_{s}} \cdot \sum_{i,j} \left\{ \frac{c_{d} \cdot s \cdot \cos \alpha + (W - u \cdot s \cdot \cos \alpha) \tan \phi_{d}}{\cos^{2} \alpha (1 + \tan \phi_{d} \cdot \tan \alpha / F_{s})} \cos \beta \right\} \quad ----- (3)$$

ここではPsは安定液圧による抵抗力で、またW, S, uはそれぞれ分割した土塊柱の重量、底面積、底面に 作用する静水圧を表わす。またαは、底面と水平面のなす角α = tan⁻¹(|∂z/∂x|/ cosβ)を表わし、 βは底面中心の最急勾配のX軸のなす角β = tan⁻¹|∂x/∂y|を表わす。

安全率の計算結果を、表-5に示す。

地盤 S – 78T S – 7

表-4 計算に用いた物性値

表-5 三次元実験で生じた破壊土塊の安全率

7		[[I					(L/B =	4.5)
	cd	¢d	$\gamma_{\rm t}$	γ_{sat}	山山 島安		掘	削深	さ Z(m)	
	(kPa)	(deg)	(KN/m^3)	(KN/m ³)	电磁	5	10	15	25	30	35
	0	42	13.4	18.9	S-78T	1.04	0.93	0.86	-	0.90	0.91
1	0	47	14.6	17.8	S-7	1.08	-	0.87	0.74	0.81	0.81

この表から、S-78T地盤ではFs = 0.86~1.04、S-7地盤ではFs = 0.74~1.08が得られた。これらの計 算値は多少ばらついているが、ほぼFs = 1.0 に近い値を示している。このばらつきの原因は、破壊形状の測定 作業において生じる誤差や破壊形状を近似する時に生じる誤差およびその他の測定誤差よるものと考えられる。 今後砂地盤におけるアーチ機構を解明し、その結果に基づいて水平方向の破壊形状を近似すればFs がより 1.0 に近い値が得られるものと予想される。

つぎに、この計算法を用いて掘削溝の安定要因の変動と安全率の関係について調べた結果が、表-6である。 この表は、各パラメーターの基本値(P。)を設定し、P。におけるFsを0.5変化させるに必要な各パラメー ターの変動幅を調べたものである。なお、このP。条件下でのFsは、ほぼ1.0である。

この表から、Fsを0.5大きくするためには、地下水位を1.15m下げるか、あるいは安定液比重を0.10大きく

表-6 Fsを0.5変化させるに必要な各パラメータの変動幅

パラメータ p	基本条件 po	各パラメータの変動幅
地下水位 H _w (m)	1.17	1.15
安定液比重 γ _s (g/cm ³)	1.03	0.10
z z kz, $\phi_d = 42.0 \text{ (deg)}$ $\gamma_{\text{sat}} = 18.9 \text{ (KN / m^3)}$	平面形状) 破壊位置	n = 1.36 $X_0 = 4.79 (m)$

して安定液比重を1.13にする必要があることを示している。安定液を1.03から1.13に変えると、その性質は見た だけですぐ分るほど大きく変わり、スライムの問題、安定液のプラントでの処理上の問題等々が発生する可能性 がある。一般の工事では地下水位を1.15m下げることは容易なので、地下水低下による安全性向上を計っている。 地下水位は降雨などによって容易に上昇するので、地下水管理が不充分な場合、溝壁が危険な状態になることも 考えられる。このことから安定液掘削工事においては、地下水位の管理は重要であると言える。

6. 結論

砂地盤における地下連続壁掘削溝の安全性について、安定液の浸透観測実験と遠心模型実験を行なった結果、 以下に示す知見が得られた。

- (1)安定液掘削溝の安定問題を考えるには、安定液の地盤への浸透による破壊(浸透破壊)と土塊すべり破壊 2つの破壊形態を検討する必要がある。
- (2)浸透破壊に対しては、浸透勾配の影響が大きく関与していることが明らかになった。つまり、安定液と地下水との水位差が大きいほど、安定液が地盤浸透しにくいほど(安定液濃度が大きいほど、濾過水量が小さいほど、地盤の透水係数が小さいほど)掘削溝は安定する。
- (3)安定液掘削溝の安定問題について、遠心力載荷装置を用いることにより、相似則を満足した模型実験が可能になった。
- (4)安定液掘削溝の深さ乙と、安定に必要な安定液と地下水の水位差△Hの関係は、二次元状態では直線となる。一方、三次元状態は乙-△H関係は曲線となり、ある値に近付いていく傾向が見ら、実施工における 経験則によく対応する。
- (5) 掘削溝の幅Bに比して掘削長Lが短くなるに従い、安定に必要な水位差△Hは小さく済む。これは、いわゆる「三次元効果」によることを示しており、水平方向のアーチ作用により土塊の滑動力の一部が溝端部に伝達され、掘削溝への滑動力が低減されることを示している。
- (6)安定液掘削溝の破壊時の土塊形状を近似して滑りに対する安定計算を行なったところ、L/Bがある値以上の場合ばらつきはあるもの、実験結果を比較的よく表すことができた。L/Bが1に近づくと本計算式を適用する事が難しくなる。適用限界については今後の研究を待ちたい。

今後、さらにこの研究を進め、さらに精度の高い定量的評価が行えるようにすることにより、大深度大断面地 下連続壁の構築の安全性向上に貢献したい。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの協力者を得た。特に、大阪市立大学高田直俊教授、東田淳講師には遠心力 載荷実験に対し色々と御指導いただくと共に、長期間心よく装置を貸していただき大変感謝しています。また、 山口大学村田秀一教授には多くの御助言を戴きました。厚く御礼申し上げます。

8. 参考文献

- Piaskowski, A. and Kowalewski, Z. : Application of Thixotropic Clay Suspension for Stability of Vert ical Sides of Deep Trenches without Strutting, Proc. of sixth Int'l Conf. on Soil Mech. and Foud . Eng., Vol. 2 pp. 526~529, 1965.
- 2)地中連続壁基礎工法技術資料、地中連続壁基礎協会, pp. 3-1~3-11, 1987.
- 3) 名倉克博、金子文夫、妹尾博明:ベントナイト安定液の研究(その5) トレンチ溝壁の安定機構について 大成建設技術研究所所報 No.15, pp.137~142, 1982.
- 4) Tohda, J., Higuchi, Y., Nagura, K., Kawasaki, K., Yagura, T. and Yano, H. : Stability of Slurry Trench in Sandy Ground in Centrifuged Models, Proc. of the Int'l Conf. on Geotechnical Centrifuge Model ing, pp. 75~82, 1991.
- 5) 樋口雄一、名倉克博、川崎宏二: 遠心模型実験による安定液掘削溝の安全性評価に関する研究、大成建設技術研究所所報 No. 24, pp. 185~192, 1991.