

研究成果報告書

研究課題名	大規模地中構造物の挙動解明手法の開発
研究開発組合代表者名	(株)奥村組

1. 研究目的

農業用排水施設は、全国に約 40 万 km 敷設されており農業の最も基幹的な施設の一つとして将来にわたる適切な維持管理と改修が不可欠である。現在、幹線の開水路の改修においては大量の用水を通水するために、大口径のパイプラインやカルバートが採用される場合が多くなってきている。地中に埋設される構造物であるパイプラインやカルバートは、土圧に抗する適切な剛性を確保することで安全性を保っている。地中構造物の構造設計については、小・中口径のパイプの実績をもとに、地盤は弾性限度内に納まる範囲での運用を原則としているが、大口径のパイプラインなどではパイプの変形量が大きいために周辺地盤が破壊した状態までを対象とすることとなり、設計手法としての適正を欠く運用となる。

本研究開発事業では、構造物の規模の影響（スケール効果）や地盤特性の影響などを取り込むことのできる有限要素解析手法を開発し、①大規模地中構造物の地盤と構造物の相互作用の解明、②地中構造物の挙動の解明、③従来の構造設計手法の適用性の検証、④施工過程を考慮した大規模地中構造物の安全性評価を行うものである。

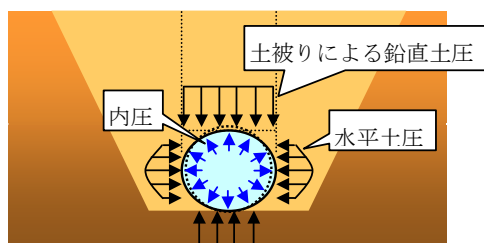


図-1 最終施工段階の安全性検討
（現行の設計基準）

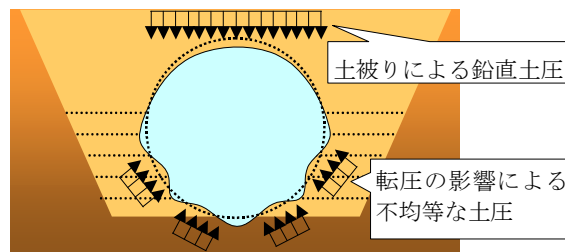


図-2 パイプラインの埋設状態
（設計基準の適用範囲外）

2. 研究内容

各課題ごとの技術的課題と研究内容を以下に示した。

表-2.1a 本研究開発事業での研究内容（その1）

	技術的課題	研究内容
a) 地盤掘削・埋め戻し解析手法の開発	大口径パイプ（設計基準外）は施工過程における変形が大きく各段階で照査する設計手法が必要である。	大口径パイプ施工を対象とし、施工過程（掘削から埋め戻しまで）におけるパイプ挙動および周辺地盤への影響を評価できる数値解析手法を開発し、設計手法としての妥当性を実験的に検証する。
b) 矢板引き抜きによる地盤の挙動解析モデルの開発	大口径パイプ・埋め戻し後の矢板引き抜き時の地盤変位がパイプの安全性に与える影響が大きく設計上の課題である。	矢板引き抜き時に生じる空隙の崩壊、ゆるみが大口径パイプに与える影響が評価できる数値解析手法を開発する。空隙崩壊によるゆるみと閉塞が評価できる総合的な要素モデルを構築し、大口径パイプの安全性の評価手法として実験的に検証する。

表-2. 1b 本研究開発事業での研究内容（その2）

	技術的課題	研究内容
c) 水路内に設置される構造物の挙動解析モデルの開発	老朽化の進んだ水路に内挿管で更生した管路の数値解析	老朽化の進んだ既設管並びに更生用内挿管及び中込材を表現した複合断面モデルによる挙動解析と埋設実験との比較から解析手法の有効性を検証する。
d) 曲線配管部の挙動解析モデルの開発	継手の可とう性を活用して管路を曲線配管する場合の内圧によるスラスト力に対する挙動の解明。	パイプの継手構造を表現した数値解析モデルによる挙動解析と埋設実験からその安全性を明らかにし、設計手法を提示する。その際、数値解析を適用して検討を行う必要がある条件・範囲についても示す。
e) 路線横断工法の挙動解析モデル	鉄道や道路直下の浅土被りでの水路の施工に先受ルーフ工法を用いた施工方法について仕様を決定する基準がない。 掘削時の地盤の挙動メカニズム（初期変形～崩壊）を明確にし先受ルーフ長を評価した解析モデルの開発の必要性	解析モデルは、①地盤掘削による切羽の安定やせん断破壊に対する地盤の支持力の評価、②地盤と構造物の相互作用、③現場計測のフィードバック、の3点を満たす必要がある。 解析モデルの有効性を検証するために、土質模型実験との比較を実施する。実験は小規模模型と拡大模型実験の2種類行い、スケール効果も含めた解析の有効性を確認する。

3. 研究成果

3.1 研究成果の概要

a) 地盤掘削・埋め戻し解析手法の開発

施工過程および転圧過程を考慮したパイプラインの数値解析手法を提案した。解析では直径3500mm鋼管の埋設実証試験を対象にして解析手法の検証と妥当性の確認を行い、各過程の影響を示した。

b) 矢板引き抜きによる地盤の挙動解析モデルの開発

矢板引き抜き現象を解析するために要素掘削手法とベルシェコらが提案したピンボールアルゴリズムを弾塑性有限要素に適用し、地盤中の応力解放と不連続面の接触現象を考慮できる数値解析モデルを開発した。

c) 水路内に設置される構造物の挙動解析モデルの開発

老朽化した水路、更生管、中込材といった複合断面の解析モデルを提案した。老朽化水路のひび割れや接触面のすべりのモデル化など試験結果と比較、検討し解析モデルの有効性を検証した。

d) 曲線配管部の挙動解析モデルの開発

継手の可とう性を活用し、複数の継手を連続的に屈曲させる曲線配管部の挙動解析モデルを提案した。解析手法として、パイプの継手機能を表現した3次元バネ・シェル要素モデルと、管断面方向の2次元弾塑性解析モデルとを併用した。これにより、曲線配管部の全体的な管路挙動を捉えるとともに、地盤と管の相互作用に伴う変位と背面土圧の検証を行う方法を提示した。

e) 路線横断工法の挙動解析モデルの開発

地盤と地中構造物（ルーフ・函体）を一つの構造系とし地盤の水平掘削に対し、初期変形から破壊に到るまでの解析を確立し先受けルーフ工法の1つの設計手法を提案した。地盤の構成則はひずみ硬化・軟化、せん断帯、異方性の影響を考慮し弾性から塑性までを表現可能とした。

また、実証試験としては下記工事について路線横断工の現場計測（平成21年11月～12月）を行っており、現在、解析手法の検証を行っている。

工事名：東伏見～西武柳沢間地下道新設工事、期間：平成20年2月～平成23年3月

3.2 従来技術との比較

各課題ごとの研究成果について既存技術との比較を以下に示した。

表-3.1 既存技術との比較

		新技術	既存設計法など既存技術
a) 地盤掘削・埋め戻し解析手法の開発	特徴	直径 3500mm 大口径パイプを対象 施工過程を考慮した弾塑性解析の適用 転圧過程を荷重（載荷と除荷）で評価	土地改良事業計画設計基準設計 「パイプライン」基準書・技術書 （平成 10 年 3 月）
	問題点	転圧過程がパイプ挙動に与える影響は 大きい。転圧幅や載荷ピッチなど転圧過 程のモデル化の検証が必要である。	現行設計基準では直径 3000mm ま でが適用口径である。 完成系のみを対象とした構造計 算手法である。（一体解析）
b) 矢板引き抜きによる地盤の挙動解析モデルの開発	特徴	要素掘削手法とベルシェコらが提案し たピンボールアルゴリズムを弾塑性有 限要素に適用し、地盤中の応力解放と不 連続面の接触現象を考慮できる数値解 析モデルを開発した。	矢板の引き抜きや施工過程は、個 別に検討するのではなく、完了時 の状況を条件として施工過程の 安全性も配慮した設計を実施す る。
	問題点	実際の現場での矢板引き抜きによって 発生する空洞は、矢板の根入れ深さや地 盤の特性に依存するため、モデルに組み 込む空洞厚さの設定が課題となる。	矢板の引き抜きの影響は、埋戻し 材の反力係数に反映した形で、構 造設計に陰的な導入。
c) 水路内に設置される構造物の挙動解析モデルの開発	特徴	複合断面をモデル化。この時、老朽化に 伴い発生するクラックは空隙とせず極 弱い要素として表現。材料ごとに Explicit 解法(陽解法), Implicit 解法(陰 解法)を選択し、適切な解析を行う。	「パイプライン」「水路トンネル」 「水路工」等、現行設計基準では 単体断面を対象。
	問題点	実験による検証数を蓄積することと、現 地での計測事例が不可欠である。	統一的な考え方による設計手法 が確立されていない。
d) 曲線配管部の挙動解析モデルの開発	特徴	路線の屈曲点に、継手の可とう性を活用 してパイプを曲線状に配管する。角度の 比較的小さい屈曲点で曲管を省略でき るので、管路コスト縮減、耐震性向上、 施工性向上、路線設計の自由度向上など の利点を有する。	路線の屈曲点には、その角度に応 じた曲管を用いる。内圧によるス ラスト力に対してはコンクリー ト製のスラストブロックを設け、 受働抵抗力和自重により構造的 に安定させる。
	問題点	屈曲区間の内部に複数の継手が配置さ れる構造であり、大口径、高水圧などの 条件では挙動の未解明な部分がある。	スラストブロックを打設するの で、施工が煩雑。軟弱地盤では施 工が困難。地震時には相対変位が 大きくなり被害が集中する。
e) 路線横断工法の挙動解析モデルの開発	特徴	地盤と地中構造物の全体構造で解析 地盤の初期変形～破壊の連続解析 ひずみ硬化・軟化、せん断帯等を考慮し た構成式(弾性～塑性まで評価) 現場計測とのリンクが可能	地盤と地中構造物は個別に計算 斜面釣合計算による安定解析 梁-バネモデルについて弾性解析 と釣合計算(剛・完全塑性体)によ るルーフの仕様の決定
	問題点	計算に一定の時間が必要	地盤と地中構造物の相互作用の 考慮がない。 性能設計に対応できず過大設計 現場計測による検証が不可

4. 試験研究機関（農工研、大学等）総括者による意見・評価等

項 目	評価結果	備 考
研究計画の効率性・妥当性	A	設計基準に記載されている手法や考え方だけでは、対応できない施設構造物の挙動と安全性に焦点を当て、数値解析手法のモデル開発と実験による検証をバランスさせており、目標とする成果を得る上で効率的な計画がなされている。
目標の達成度	B	数値解析モデルの開発や数値解析による施設の挙動を予測については、合理的な結果を予測することが確認され、当初目的は達成されている。具体的な設計手法に発展させるためのシナリオや実際の施設への展開が望まれる。
研究成果の普及可能性	C	課題として挙げている施設の実証試験を実施できていないことから、数値解析手法の具体的な有効性を明らかにするためには、現地適用のためのモニタリングなどの実施が必要である。
研究成果の出来栄	B	個別の課題については、所定の成果が得られているが、設計や現地適用に向けた技術開発の展開方法や今後の残された課題などの整理に若干の余地がある。
総合コメント：設計基準に記載されていない複雑な施工や構造物を対象とした挙動解明と安全性評価を命題としており、数値解析で得られた成果は設計基準で考えるべきポイントや着目点などを示唆する重要な結論を導き出している。しかし、模型実験から現実の構造物への展開が不十分にとどまっており、今後は実証的な確認試験を実施して施設の設計・施工に資する技術に昇華することが望まれる。		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。

5. 研究総括者による自己評価

項 目	評価結果	備 考
研究計画の効率性・妥当性	B	現行の設計基準で重要な課題を取り上げており、妥当な研究計画と考えられる。
目標の達成度	B	各課題で実験的検証を踏まえており、一定の目標は達成できている。
研究成果の普及可能性	B	設計精度を今後も向上させていくうえで参考になる成果と考えられる。
研究成果の出来栄	B	各課題について設計への展開を念頭に研究を進めた。設計基準に対する一定の提案ができる成果も得られたが、適用範囲を十分に考慮する必要がある。
総合コメント 各課題では新規の解析モデルや解析手法を設計に生かす観点から取組んでいる。まだ課題は残されているが、設計基準が確立されていない地中構造物を対象としており、現状で設計を行ううえでは参考になる成果があげられたと考えている。		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。

1. 地盤掘削・埋め戻し解析手法の開発

(1) 数値解析手法の概要

本テーマでは、農村工学研究所が実施した 3500mm 管埋設実証試験（図-1.1）を対象として解析手法の検証と妥当性の確認を行った。解析プログラムは PLAXIS Professional Ver8 を用いた。解析には 2 次元有限要素法を用い、地盤は平面ひずみ要素、パイプは梁要素を適用した。地盤の材料モデルには モール・クーロンの破壊基準を適用し、土質試験結果をもとに材料特性値を設定した。地盤の掘削・埋め戻し過程は、要素を削除・追加することにより、掘削を層厚約 2m で 4 段階、埋め戻しを層厚約 30cm で 23 段階に設定し、各過程の構造系を連続的（応力平衡計算）に解析した。施工時の転圧過程は、転圧機械の締固めエネルギーを静的荷重（既往文献を参考に 174kPa）で評価した。その载荷は、各施工過程における転圧面をタンパー打撃板幅に分割し、タンパー打撃荷重を転圧面で移動させながら载荷・除荷を繰り返した。以上の解析手法にて、施工過程の影響、転圧の影響を検討した。

(2) 解析の結果

管埋設実証試験と解析によるパイプのたわみ量を図-1.2 に、埋め戻し完了時のパイプ周辺の変形結果を図-1.3 に示す。解析では、施工過程考慮・転圧考慮（解析モデル①）、施工過程考慮・転圧無視（解析モデル②）、施工過程を考慮しない一様解析（解析モデル③）について検討した。実験結果では、管頂部までの埋め戻し過程で管側部の転圧の影響によりパイプは縦長に変形し、管頂部より上部の埋め戻し過程でパイプは横長に変形し、パイプの最終形状は縦長の変形となっている。解析モデル①では、図-1.2 に示す通り管頂部までは変位が増大し、その後は低減するパイプの変形挙動について解析結果（赤線）は実験結果（青線）を概ね再現できている（埋め戻し過程のパイプの最大たわみ量は鉛直で解析 12.5mm/実験 11.8mm、水平で解析-10.7mm/実験-11.3mm、埋め戻し完了時のパイプのたわみ量は鉛直で解析 5.2mm/実験 2.8mm、水平で解析-4.6mm/実験-5.3mm）。しかし、解析モデル②では管頂部までの埋め戻し過程でパイプは縦長の変形とならず埋め戻し完了まで横長の変形が続く結果となり、また、解析モデル③ではパイプは横長の変形となることから、施工過程や転圧過程を考慮しない解析手法では、パイプの変形挙動を評価できないといえる。

(3) まとめ

本検討における施工過程と転圧過程を考慮した解析結果は、実験結果のパイプの変形挙動を概ね再現できており、解析手法として妥当性が得られたと考える。また、数値解析によりパイプの変形挙動を予測するためには、転圧を含めた施工過程を考慮した非線形解析が必要であることを確認した。

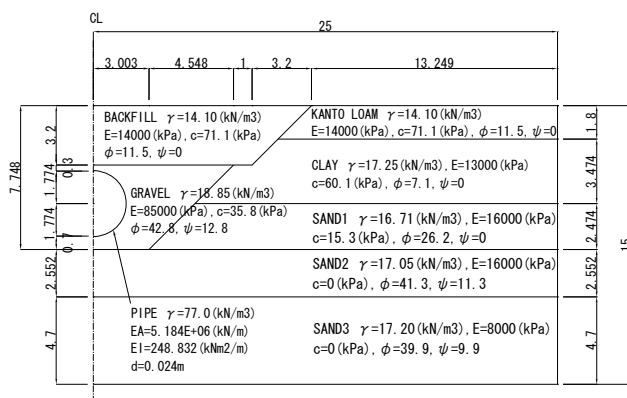


図1.1 解析対象

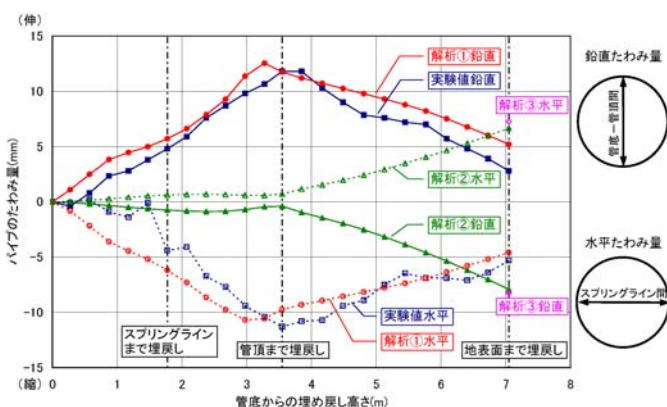


図1.2 パイプのたわみ

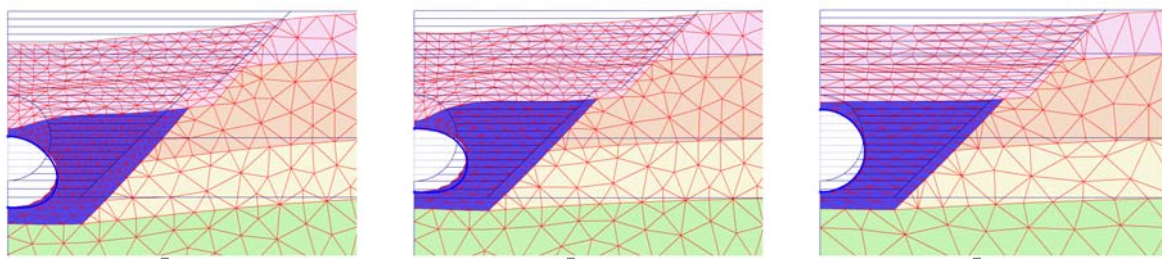


図1.3 全体変形図（左：モデル① 中：モデル② 右：モデル③）

2. 矢板引き抜きによる地盤の挙動解析モデルの開発

2.1 概要

矢板引き抜き跡に残る空洞は、周辺地盤の応力解放や密度低下を生じるため隣接するパイプが大きく変形する場合がある。このような施工過程で生じる挙動については、設計基準では地盤の反力係数として陰に見込んでいるが、本質的なパイプの挙動を評価することができていない。

そこで、施工過程を忠実に再現したパイプの挙動を明らかにすることを目的として有限要素法によるパイプの矢板引き抜き中の挙動予測モデルを開発し、その解析能力について検証した。

2.2 解析結果と実験的検証

開発したモデルは、有限要素法で用いられる①要素掘削手法と②ベリシェコらが提案したピンボールアルゴリズムを弾塑性有限要素解析手法に導入して、地盤中の応力解放と空洞などの不連続面が接触する現象を考慮できる数値解析モデルである。

図 2.1 に示すような模型（直径 130mm のパイプ）を用いた実験を実施し、矢板溝幅（350mm、750mm）と矢板厚さ（3,15,30mm）の影響を確認した。図 2.2 に示すように①溝幅が狭く矢板がパイプに近いほど、②また矢板の厚みが大きく発生する空洞幅が広いほど、パイプは大きく変形する。特に矢板の先端部がパイプの側部を引抜け上がる時に大きく変形する傾向がある。

図 2.3,2.4 には数値解析結果を示す。密な地盤ほど矢板引抜による変形の増加は小さいことがわかる。また、矢板の引抜が進むに伴って地盤の応力解放領域が拡大しパイプの側部まで達するとたわみが急激に進行していることがよく表現できており、図 2.2 のパイプ変形の進行とも整合する結果である。

2.3 まとめ

- ① ピンボールアルゴリズムと要素掘削手法を用いた手法によって矢板引抜現象を解析できる。
- ② 実際の空洞規模などのデータ分析が進めば、応力解放領域の大きさとパイプとの距離などの関係から、矢板引き抜きがパイプに与える影響を整理できる(図-2.2 の結果より)。
- ③ 空洞を最小限に留める施工方法の有効性などを数値解析によって検証することも可能である。

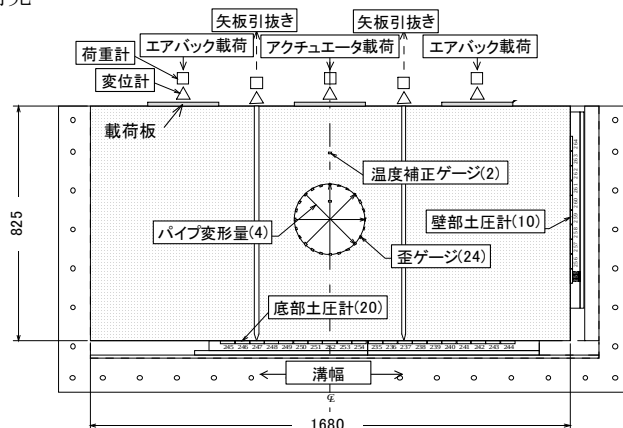


図2.1 実験土層とパイプ配置

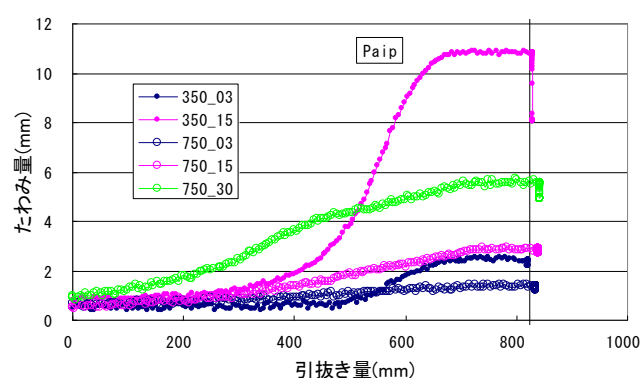


図2.2 矢板間隔とパイプの変形

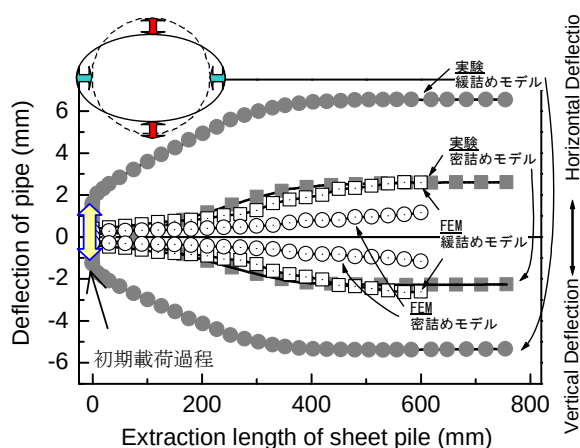


図-2.3 パイプ変形量の数値解析との比較

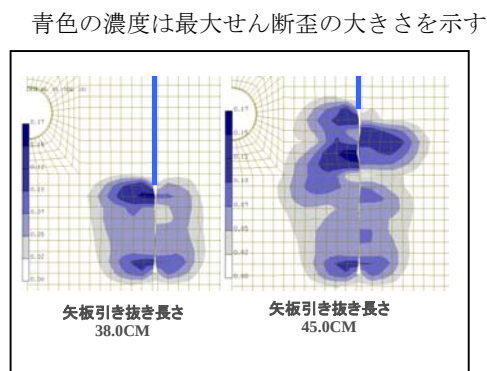


図-2.4 パイプ周辺地盤の最大せん断歪

3. 水路内に設置される構造物の挙動解析モデルの開発

3.1 解析手法について

- (1)既設トンネルおよび FRP 管や中込材などを含む複合断面を二次元モデル化
- (2)クラックは不連続面であり健全な要素よりも剛性が小さい弱要素として表現する。
- (3)水平方向に軸対称な形状である場合は半断面形状のみのモデルとする。右図は要素分割メッシュに拘束条件および上載荷重を追記したものである。赤色の矢印が拘束方向を示し、白抜きの矢印が上載荷重を示す。このようにモデルの側面を水平方向拘束、底面を鉛直方向拘束し上面より面荷重を与える。
- (4)材料ごとに特性パラメータを（表-3.1）与えるとともに Explicit 解法(陽解法), Implicit 解法(陰解法)を選択する。

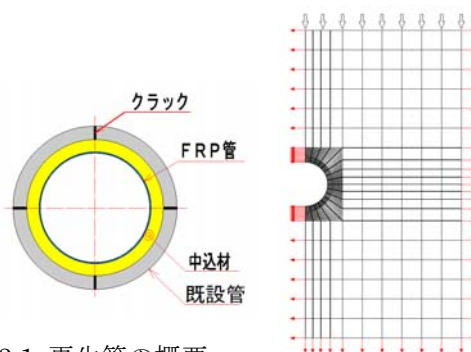


図-3.1 更生管の概要

図-3.2 解析モデルの概要

表-3.1 参考パラメータ

	地盤 (標準砂)	中込材 (エアモルタル)	FRP管	既設管 (鋼管)	クラック
ヤング率(kgf/cm ²)	100	16300	150000	2100000	5
ポアソン比	0.2	0.15	0.3	0.3	0.3
単位体積重量(kg/cm ³)	0.0016	0.0011	0.002	0.0078	0.001
初期せん断弾性係数G ₀	60	800	58000	800000	2

3.2 解析の照査

解析の有効性は模擬試験による実験結果と比較することで確認を行った。模型土槽試験と同条件において FEM 解析を行い、そのたわみ量の差異により数値解析モデルの妥当性を検証した。その結果、図-3.4 の青線(4-鉛直(試験値))が最大荷重 200kPa 時(土被り約 10m 相当)で約 1.8mm のたわみに対して、紫線(4-鉛直(解析値))のたわみは約 3.2mm と大きい(差は管径に対して 1%程度)こと等が示しているように模擬試験と比較し解析値が上回る設計上安全側の結果が得られたことで解析の有効性が確認された。

図-3.5 に示したクラック数 0 の場合も同様に有効性が確認された。

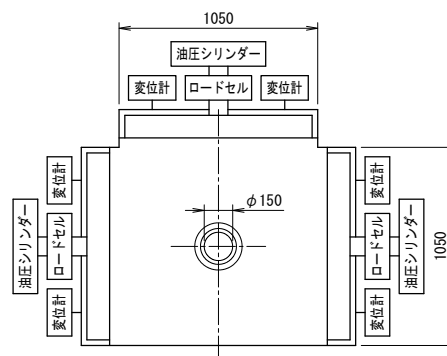


図-3.3 模型実験の概要

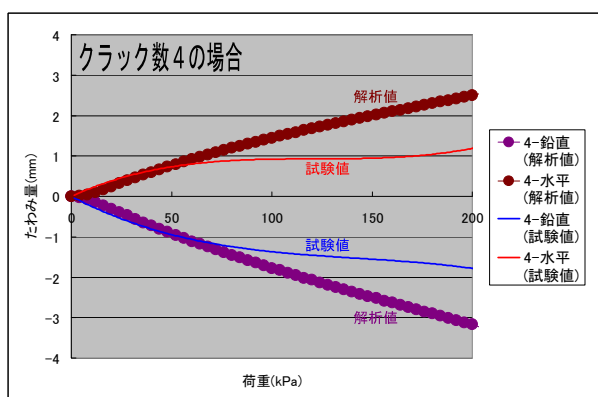


図-3.4 模型土槽試験結果と解析値の比較（その1）

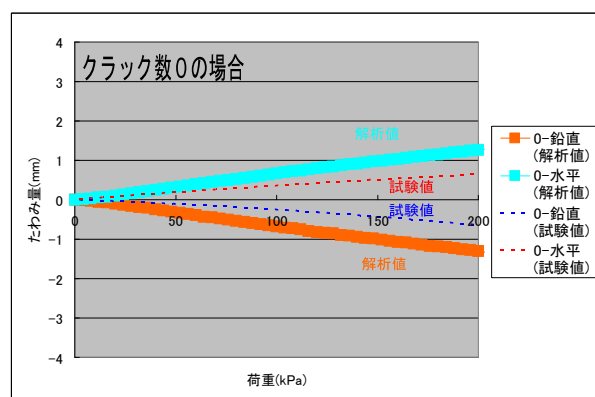


図-3.5 模型土槽試験結果と解析値の比較（その2）

3.3 クラックの解析的検討

クラックの数や位置の影響を確認するために円周上のクラック数を増し解析を行った。図-3.6 にその解析結果例を示す。凡例の頭の数字は円周上のクラックの個数を示し、その後の水平や鉛直という

文字はパイプのたわみ量測定の方角を示す。この場合、クラック数が増加するとともにたわみ量が増加するのではなく、ある程度のクラック数以上は発生たわみ量の差異が少ない結果が得られたことを示す。

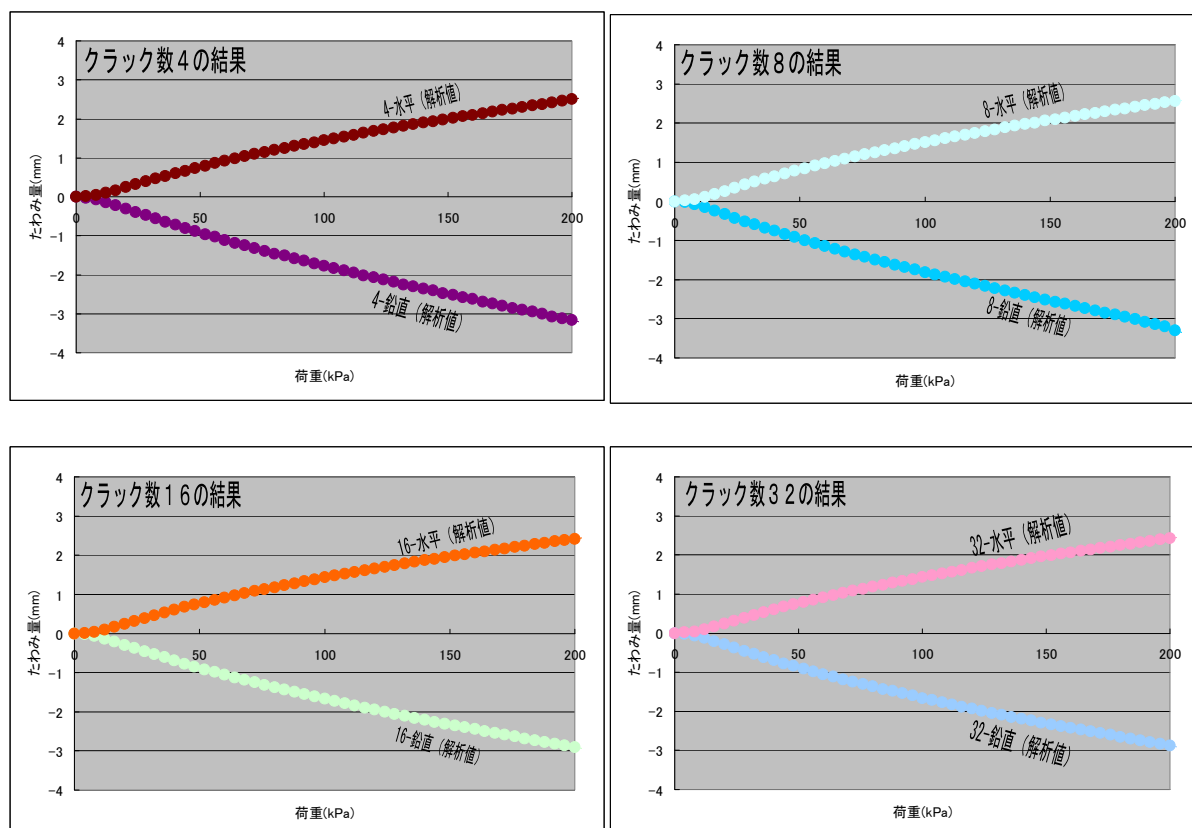


図-3.6 クラック数増加時の結果

3.4 まとめ

老朽化した水路、更生管、中込材といった複合断面の解析モデルを提案した。老朽化水路のひび割れや接触面のすべりのモデル化など試験結果と比較、検討し解析モデルの有効性を検証した。

このようなクラックの数や位置の違いによる老朽管の挙動の予測は、更生管を用いた補修の必要性の判断を行う際の一助となる。

4. 曲線配管部の挙動解析モデルの開発

4.1 数値解析モデルの概要

継手を含む曲線布設管路の解析手法として、3次元シェル～バネ要素による線形弾性解析を用いる。この手法では内圧負荷に伴う管路挙動に着目してパイプと継手だけをモデル化し、周辺地盤の特性はバネ定数で表現する。したがって解析モデルの作成は比較的容易であるが、結果は地盤パラメータの設定に依存することとなり、その評価が重要となる。

そこで本テーマでは地盤の非線形材料特性を考慮した2次元弾塑性解析を併用し、地盤材料の物理試験結果を反映したパイプ断面方向の詳細な検討を行うこととした。

パイプの水平変位量と背面土圧について、実験結果、2次元弾塑性解析結果、3次元線形弾性解析結果の照合を行うことにより、管路挙動の把握と解析に用いるバネ定数等の妥当性を評価する。

4.2 実験および解析結果

(1) 小口径管路模型実験による結果の比較

φ250mmFRP管による曲線布設の実験結果(図4.1の模型管路を埋戻して水圧を負荷)と数値解析結果の背面土圧分布を比較して図4.2に示す。3次元解析モデルは継手位置(Joint1, 2, 3)における背面土圧の変化など土圧分布形状を示しており、実験結果と整合している。また2次元解析モデルは図4.3に示すように実験では得られない断面内の水平土圧分布を把握でき、背面土圧を詳細に評価できる。2次元モデルで地盤条件に応じたバネ定数を設定し、3次元モデルで継手構造を評価する併用手法で曲線布設管路の土中挙動を予測し、設計等に反映できる解析手法として適用が可能と考えられる。



図 4.1 小口径模型実験管路

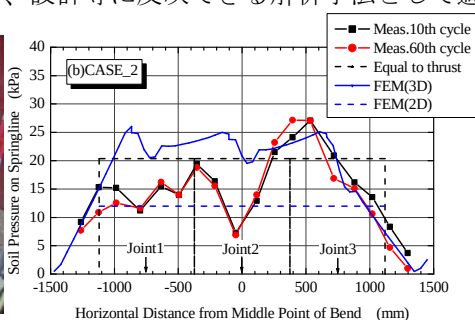


図 4.2 背面土圧分布 (実験&FEM)

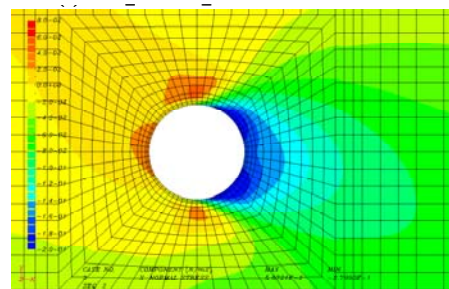


図 4.3 水平方向土圧分布 (2DFEM)

(2) 中口径管路模型実験

小口径での実験と比べて①高剛性, ②大口径, ③高水圧(2MPa)の条件を設定し、φ400mmDCI管路を用いた埋設実験を実施した。試験条件は異なるが、管路の変位量および背面土圧の分布状況は継手の屈曲状態に応じて(1)と同様の傾向を示すことが明らかとなり、3次元モデルの解析結果とも符合している。既往の設計施工指針(案)(図4.5の水色線で示す背面土圧計算値の適用性等)が確認できた。



図 4.4 中口径模型実験管路

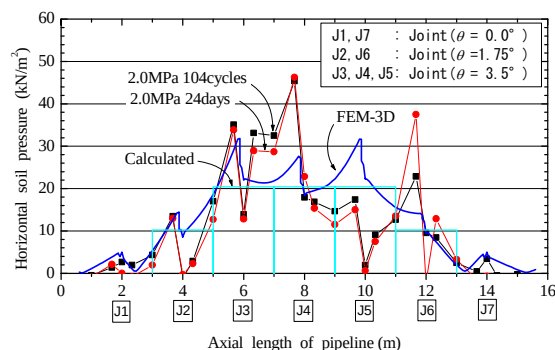


図 4.5 背面土圧分布 (実験, 計算&FEM)

4.3 設計上の留意点

既往の設計施工指針(案)が適用できるか否か判断できない場合、数値解析の援用を検討することになる。設計実務を進める上で数値解析面からの検討が必要と考えられる事例としては、曲線布設管路の背面側が盛土法肩部の場合や、背面側に空間・構造物が存在する場合などがあげられる。

5. 路線横断工法の挙動解析モデルの開発

5.1 技術的課題と従来の設計手法

(1) 先受ルーフ工法と技術的な課題

- ・コスト削減、工期短縮を考慮し、浅土被りで既設線路や道路を供用したまま直下に農業用排水路（ボックスカルバート）を構築できる施工方法を提案（図-1）。
- ・技術的な課題として、①先受ルーフと地盤の支持力の関係の評価、②掘削時における地盤の挙動メカニズムを解明し周辺地盤へ及ぼす影響を評価する必要がある。

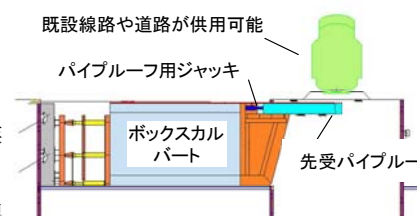


図-1 工法概要図

(2) 従来の設計手法で本工法を適用

- ・切羽（掘削面）の安定計算：力のつり合いによる古典安定解析（図-2）
 - ・変形計算：線形弾性体による変形解析
 - ・ルーフ仕様決定：地盤を弾性バネとした梁-バネモデル
- ⇒しかし、従来の設計手法では1)地盤と構造物の相互作用、2)掘削による地盤の支持力・進行性破壊の評価、3)現場計測のフィードバック（情報化施工の適用）を表現できず新たな解析手法の確立が必要となる。

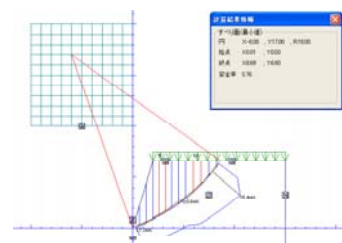


図-2 従来の設計例（斜面安定）

5.2 数値解析モデルの概要

(1) 地盤と地中構造物（ルーフ・函体）を一つの系とした解析

剛性の大きく異なるもの（地盤、ルーフ・函体）を一つの系で解析するために、**非線形解析手法に The implicit-explicit 混合型の動的緩和法採用**し計算の収束性・安定性の向上をはかる。

(2) 地盤の水平掘削に対し、初期変形から破壊に至るまでの連続した解析

破壊に至るせん断変形の再現性を向上するために、有限要素に**選択減退積分を用いた4節点アイソパラメトリック要素**を採用し、さらに地盤の初期変形から破壊までを表現し、破壊時の変位を的確にもとめるために、構成式に**せん断帯へのひずみ局所化を考慮したひずみ硬化・軟化弾塑性モデル**を採用する。

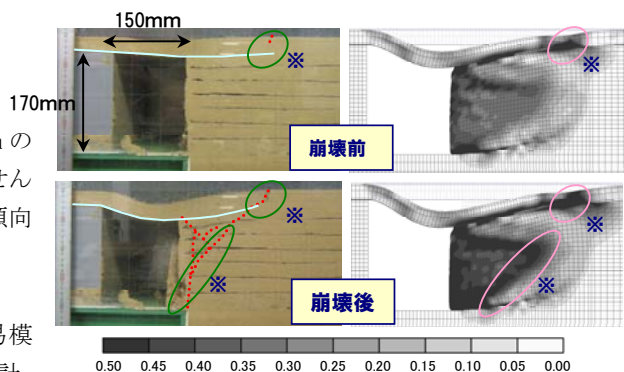
5.3 実験結果と解析結果

(1) 簡易型土質模型実験による結果の比較

先受ルーフ工法を簡易的に模擬した土質模型実験（高さ17cmの函体を引抜く模型実験）と解析結果を図-3に示す。実験でのせん断帯の発生機構と計算結果の最大せん断ひずみ分布は同様の傾向を示すことがわかり、数値解析モデルの再現性が確認できた。

(2) 拡大土質模型実験と解析結果

地盤掘削を模擬した拡大土質模型実験（函体高さ50cm=簡易模型の約3倍、地盤を人力掘削）を実施し、地表面沈下計、土圧計、傾斜計による計測を行った。実験結果は、簡易型模型実験と同様の地盤の破壊モード（ルーフから切羽足元へのせん断帯の発生）であり（図-4左）、傾斜計と土圧計（図-5）に地盤崩壊前の顕著な挙動が確認できた。



※の箇所に表示されるように解析結果の最大せん断ひずみの集中領域が実験でのせん断帯（せん断破壊面）と同様の傾向を示す

図-3 実験結果と解析結果（最大せん断ひずみ）

以上の結果（図-3、図-4）から、数値解析モデルがスケールの違う2種類の実験結果を再現可能であることより、提案した数値解析モデルは路線横断工法へ適用可能といえる。

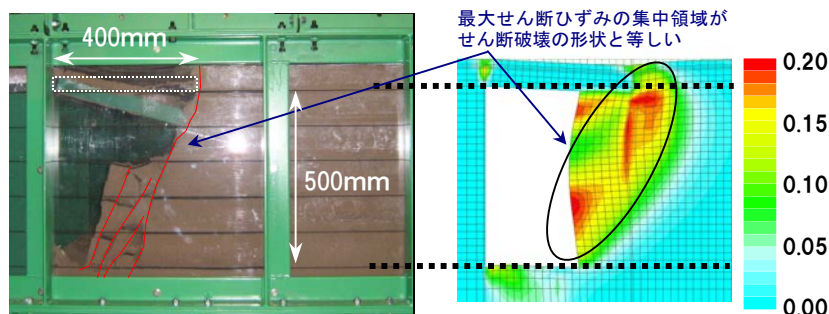


図-4 実験結果（左）と解析結果（右）26cm掘削時

5.4 まとめ

本研究により本手法の適用性が確認できた。地盤条件に応じてルーフの剛性や先受け長さを決定する1つの設計手法として提案できる。また、土圧計や傾斜計を利用した計測手法も安全施工を確保する情報化施工の手法として提案できる。

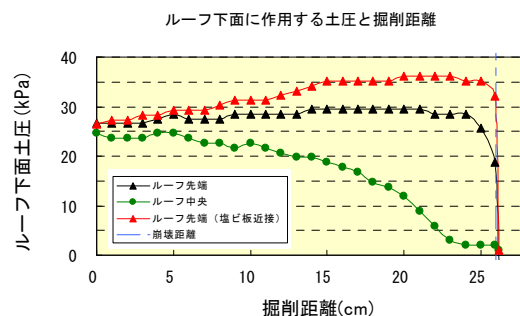


図-5 実験結果（土圧計）

6. 路線横断工法を対象とした実証試験について

6.1 実証試験の概要

路線横断工法の挙動解析モデルに関する実証試験を実施する。対象現場として、路線横断工法の一つである R&C 工法を採用している現場に実証試験を適用する。実証試験は、R&C 工法の施工ステップの中で、地盤の掘削～ルーフ・函体推進時における地盤状態の再現計算を目的とする。図-1 に実証試験のフローを示す。同図からわかるように、実証試験は「現場計測」、「土質要素試験」、「数値解析」の3種類から構成される。現場で不撓乱土を採取し、室内要素試験により、地盤の物性値を決定する。得られた物性値を解析モデルの入力パラメーターとし解析を実施する。一方、現場において、これまでの室内模型実験と数値解析により得られた知見をもとに、計測器を設置し、計測を実施する。最後に、解析結果と現場の計測結果を比較して、数値解析モデルの評価を行う。

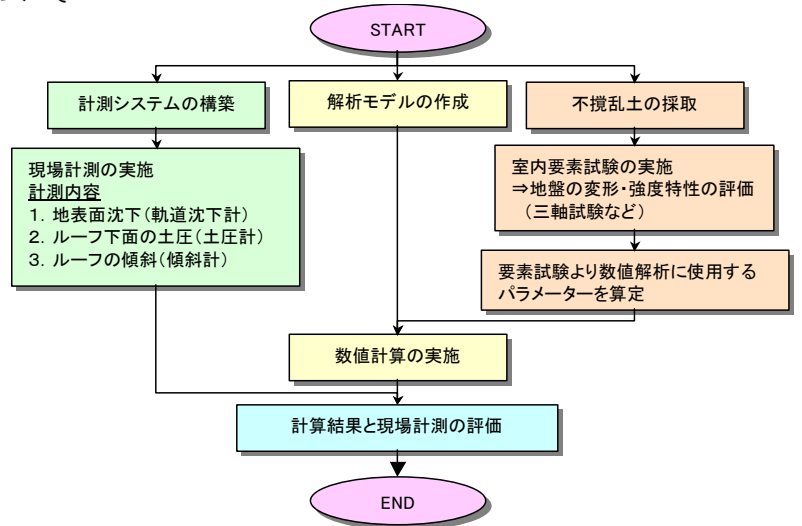


図-1 実証試験フロー図

6.2 現場の概要と計測による挙動把握

対象現場の全景写真を、図-2 に示す。当現場は、既設路線直下にボックスカルバートを構築するもので、ボックスカルバートの寸法は、幅 19.3m×高さ 7.66m×長さ 18.00m（鉄道盛土直下延長 10.4m）である。土質条件は、主にロームと粘土混じり砂礫（N値：2～38）から構成される。

現場での計測縦断面図を図-3 に、横断面図を図-4 に示す。計測内容は、これまでの室内模型実験と数値解析の結果から、地盤の挙動を把握するためには、ルーフに作用する土圧とルーフの傾斜を測定することが望ましいとの結果を得ており、これらのことを踏まえて、図-3・4 に示すように土圧計と傾斜計をルーフ内部セット（図-5）する。さらに、地表面の沈下を測定するために、沈下計をレールに併設する。計測器設置箇所は、縦断及び横断とも3箇所ずつ設定し、計9箇所の計測ポイントを設置する。

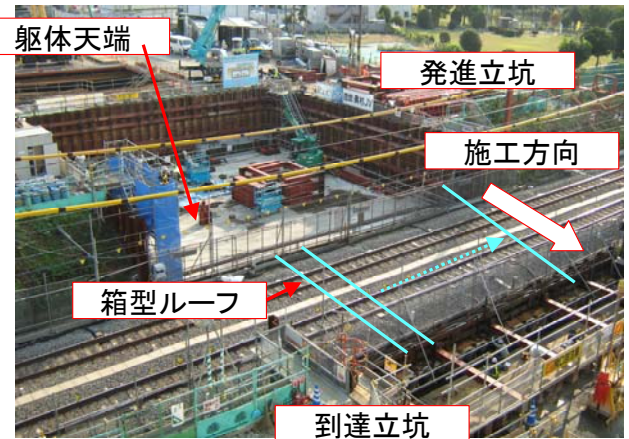


図-2 対象現場全景

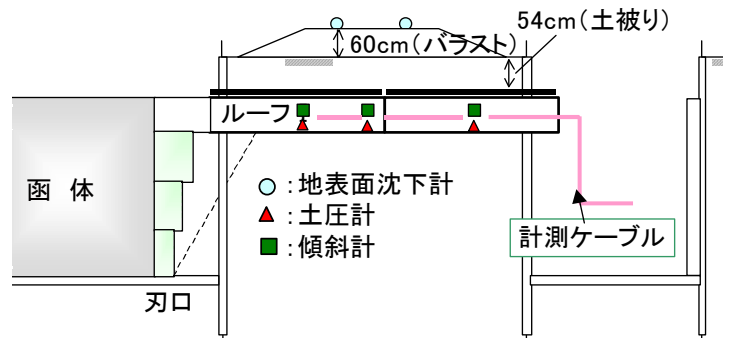


図-3 計測配置縦断面図

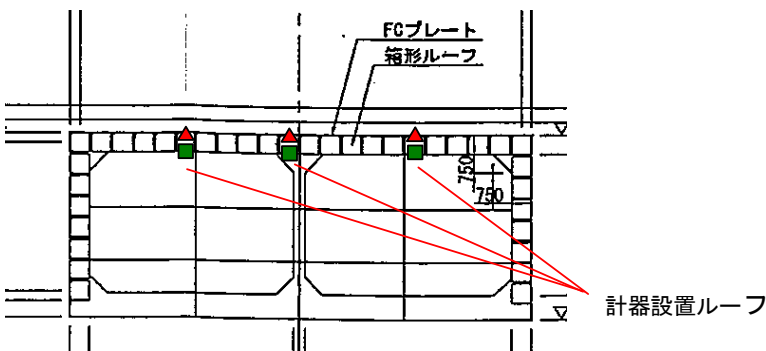


図-4 計測配置横断面図



図-5 土圧計・傾斜計設置状況

土圧計に関しては、ルーフ下面から下向きに受圧面を設置することでルーフに作用する土圧を測定する。図-6 に示すように、ルーフ下部に開口を設け、土圧計を設置する。なお、土圧計設置後、開口部を補強することで、開口によるルーフの性能低下を防止する。

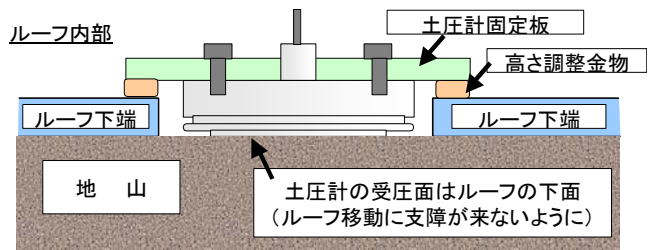


図-6 土圧計設置図

6.3 計測結果

計測結果の例として、2009年12月16日～18日までの一連の施工ステップにおける計測結果を示す。施工フローは、夜間の0:00～4:00の間にルーフ・函体を推進させ、昼間の8:00～18:00に地盤の掘削を行う。掘削は上部からの段階施工を行い、掘削完了後直ちに切羽に土留めを設置する。8:00から12:00は上段掘削と土留め、13:00～18:00は中・下段掘削と土留めの手順となる。

図-7 に計測結果を示す。上から土圧変化、横断方向のルーフの傾斜、縦断方向のルーフの傾斜、地表面沈下を示した。以下に考察に述べる。

[土圧]

- ・ 同図の※1 の箇所からもわかるように、ルーフ・函体推進時に土圧の増加が見られる。これはルーフ推進に伴い、ルーフと地盤の間にせん断が働いたためと推測できる
- ・ 上記については、解析結果と照査し議論する。
- ・ 上段地山掘削時において、ルーフに作用する土圧が低下していることがわかる（※2）。これは、掘削により掘削周辺地盤の応力が開放されたためと考察できる。
- ・ 上段掘削・土留め完了後、土圧の低下がなくなり、場合によっては上昇するケースも見られる（※3）。これは、上段掘削後、切羽面に土留めをすることで応力開放を抑制したためと考えられる。
- ・ さらに、土圧が上昇したケースは、切羽面から地盤へ土留めによる圧力がかかり、ポアソン効果によりその圧力がルーフに作用したものと見える。
- ・ 中・下段掘削時には、土圧の低下は見られず、上段掘削時が最も周辺地盤に影響を与えることが推測できる。しかし、これらの土圧変化は、最大3kPa程度の変化であるので、全体を通して安定した施工であることも判断できる。

[傾斜計]

- ・ 傾斜計は、横断方向、縦断方向ともにほとんど変化が見られず、最大で0.1minの変動が確認できる。
- ・ ルーフ長が6m*2本=12mであるので、最大で0.2mm程度でのたわみが生じたと考えられるが、非常に小さな値であり、ルーフに変状はほとんど生じていないといえる。

[地表面沈下]

- ・ 本工事で施工をしていない18:00～0:00の間に変位が生じている。（※4）
- ・ 土圧計や傾斜計の変動傾向とは全く違う変動を示している。
- ・ 以上のことから、地表面沈下に1mm程度の変動が生じているが、この変位は本施工法に起因するものではない。
- ・ 本施工と並行して、昼夜を問わず線路の補修やバラストの入替え工事が行われており、地表面の変動の原因を特定することはできない。

なお、1月末に施工が完了し、現在、解析による照査を実施中である。

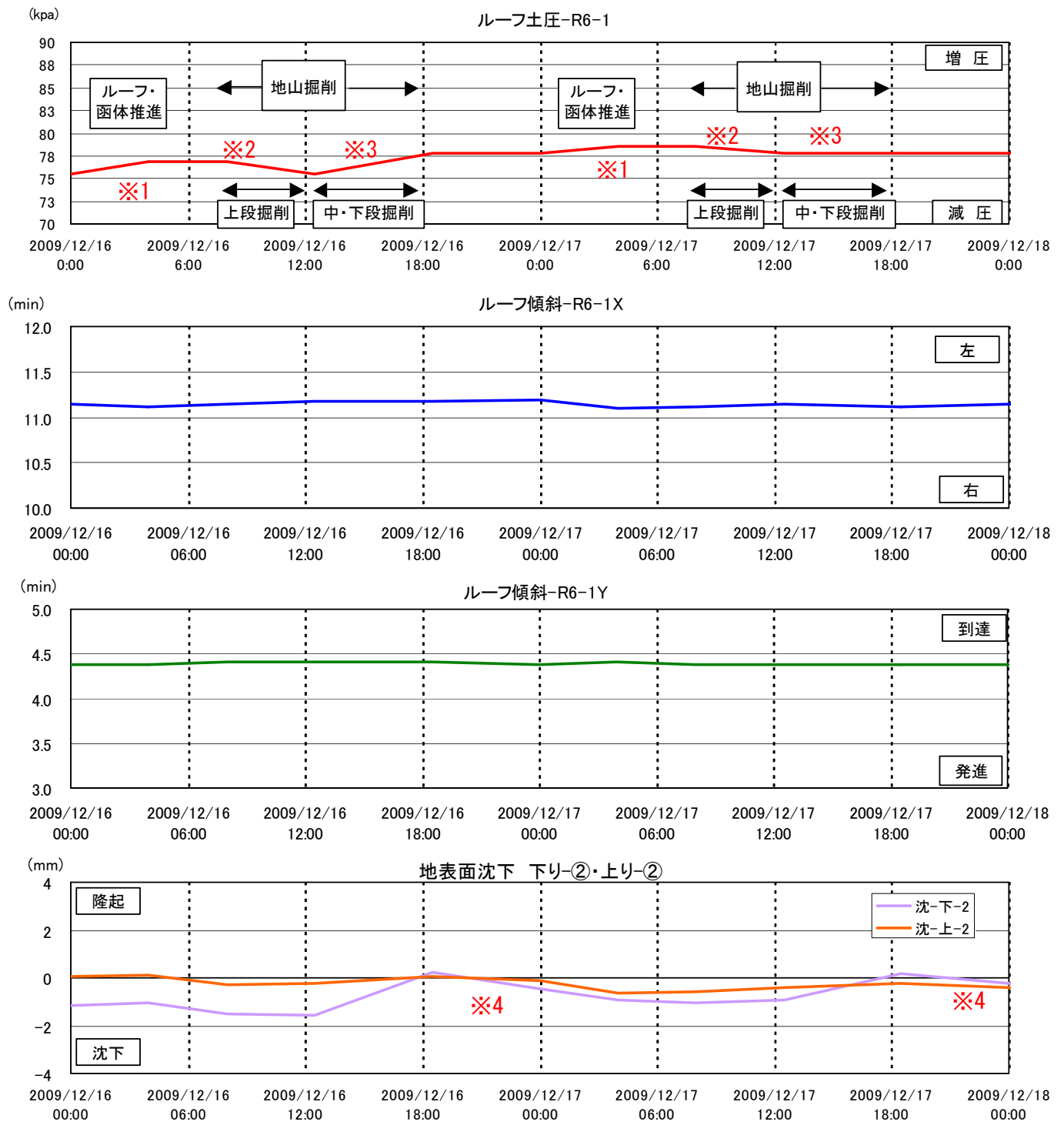


図-7 計測結果一例

6.4 数値解析条件・結果

(1) 計算条件

解析には2次元弾完全塑性有限要素法を用い、構成式として降伏関数にはMohr-Coulomb型モデルを、塑性ポテンシャルには π 平面上に特異点を持たないDrucker-Prager型モデルを適用する。地盤は弾完全塑性体で平面ひずみ要素を適用し、土質試験結果をもとに材料特性値を設定する。ルーフ・函体は弾性体の平面ひずみ要素でコンクリート・鋼材の一般的な値を用いる。

解析の手順を以下に、解析モデルを図-8に示す。

- ① 自重と列車荷重（180kN M-18の各軸重に相当）により初期応力を設定。
- ② ルーフの推力（300kN）を作用。（施工のルーフ推進に相当）
- ③ 掘削に相当する要素の応力値を節点外力に作用。（切羽の掘削長0.5mの応力開放に相当）
- ④ 切羽土留めに相当する荷重（50kN）を載荷。（切羽の土留めジャッキ圧に相当）

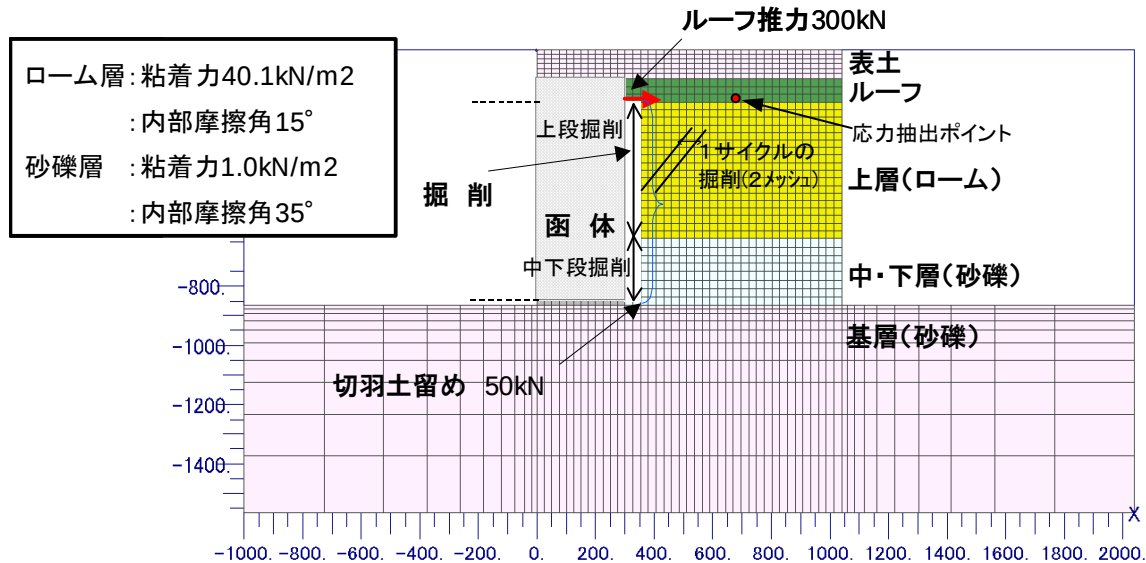


図-8 解析モデル

(2) 計算結果と考察

図-9に土圧の計測値（図-7）と解析結果の比較を示した。以下に考察を示す。

- ・ ルーフ推進時の土圧増加という定性的な変動は計測と解析で一致しているが、計測値の1.5kPaに対して解析ではほぼ2倍の3.0kPaとなっている。
- ・ 上段掘削時の土圧減少は定性的な変動は計測と解析で一致しているが、ルーフ推進時の増加と同様に計測値の1.5kPaに対して解析ではほぼ2倍の3.0kPaとなっている。
- ・ 中下段掘削時の土圧変動は、解析では変動が見られないが、計測では約2.5kPaの増加している。
- ・ 中下段掘削時の差は施工における上段掘削後のジャッキ圧によるもので、解析の想定荷重を上回る荷重が施工では載荷されたためと考えられる。
- ・ 2サイクル目の土圧変動では、解析ではほぼ1サイクル目と同じ変化を示しているが、計測ではルーフ推進と上段掘削時は定性的な変動は変わらないが、変動量が減少している。
- ・ 2サイクル目の中下段掘削時には計測は解析と同様に変化が見られない。1サイクル目とは異なり、施工のジャッキ圧が解析で想定した荷重と考えられる。
- ・ 計測で2サイクル目の土圧変動が減少した原因は不明であるが、数値的に小さな変動でありルーフの推進によって地山との接触面の緩みが影響したと考えられる。

図-10には解析による2サイクル目の掘削完了時（12月17日）の最大せん断ひずみ分布を示した。以下に考察を示す。

- ・ 土層境界部の切羽面から地表面に向けて、ひずみが集中していることがわかる。
- ・ 下層の砂礫層は比較的堅固な地層（平均N値が38で、内部摩擦角が35°）であり、上層のローム層に大きなひずみが発生したと考えられる。

- ・ 切羽上面から下方へ向かうひずみの集中も見られるが、これは模型実験でも見られた傾向であり、切羽における変形モードに起因するものと考えられる。
- ・ 上層ローム層に局部的に最大せん断ひずみが 30%に達しているが、ルーフに伸展するひずみは 5%程度であり、すべり破壊に至るものではなく安全と言える。
- ・ ルーフに伸展するひずみ分布が確認されており、安全性を確保するためにはせん断ひずみの伸展を防止することが必要と考えられる。

(3) まとめ

本テーマで開発した数値解析手法を R&C 工法における地盤の掘削～ルーフ・函体推進の実証試験に適用した。解析結果は、計測結果の施工ステップに応じた土圧変動を一定評価できており、実現場への適用性が実証できた。解析結果の最大せん断ひずみの分布において、すべり破壊が発生しないことが確認できており、施工法の安全性が検証できたと言える。また、切羽下部からルーフに伸展するせん断ひずみ分布が確認されており、せん断ひずみの伸展を防止することで安全性を確保する手法として有効であることも確認できた。

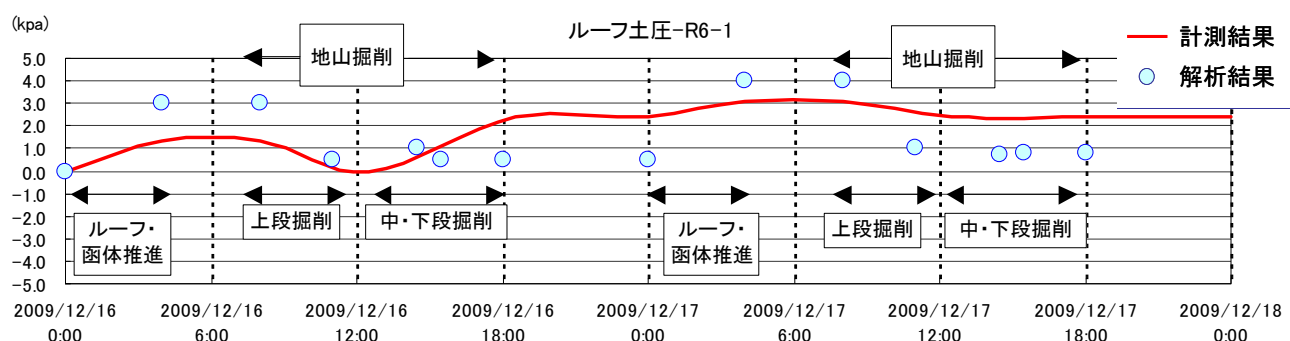


図-9 ルーフに作用する土圧変動（実証試験結果と解析結果）

