

研究成果報告書

研究課題名	水路改修用 FRPM 特殊形状工法の開発
研究開発組合代表者名	栗本化成工業株式会社 代表取締役社長 荒木悦夫

1. 研究目的

農業用排水施設は、施工後数十年を経たものが多く、いずれ老朽化の時期を迎え施設の補修・改修の困難さに直面するものと考えられる。水路（トンネル・暗渠・サイフォン）内に何らかの異常が発生した場合、水路としての機能低下や上流水位の上昇により、周辺地域に被害を及ぼす恐れがあり、補修・改修など更新技術の向上が望まれている。

本研究では、改修工法の1つとして馬蹄形断面を有する FRPM 製特殊形状製品を用いた挿入工法の開発を行い、その設計及び施工方法を確立する事を目的とする。

2. 研究内容

外圧作用時における馬蹄形管の挙動確認及び座屈強度の検証を土槽試験(室内)並びに FEM による構造解析により検証する。また、中込材の選定及び変形係数の評価、馬蹄形管の製品性能及び施工性までを含めた課題について室内またはフィールド試験により検証し、工法としての確立を図る。さらに実証試験を実施し、実用化を目指す。

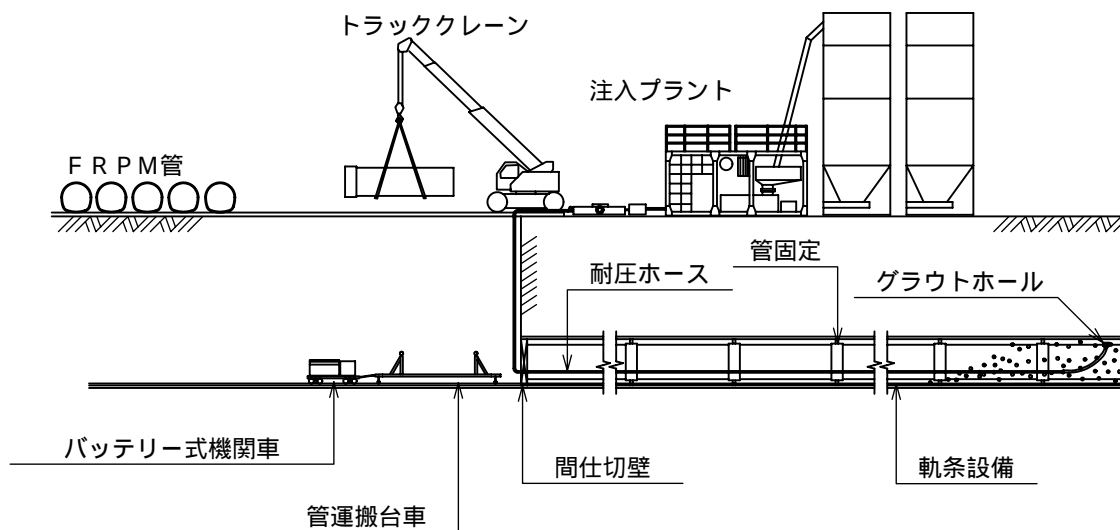


図 工法のイメージ

3．目標とする成果

1)計画流量の確保

従来の円形管を用いた挿入工法と比較して，馬蹄形管を使用することにより大きな通水断面を確保する。

2)安全性の高い施工法の確立

管体性能試験及び模型土槽試験により，馬蹄形管の挙動を把握するとともに、管体の安全性について評価し，実証試験において配管施工性及び施工時の安全性を確認する。

3)工事期間の短縮及びコスト縮減

汎用台車を使用して既設トンネル内に既製管を挿入する工法を用いることにより，従来の円形管による挿入工法と同等の施工性を生かし，既設トンネルを取り壊すことなく水路を更生する。

4．研究成果の状況

設計への適用を図るため，土槽試験機及び模型管を製作し，外圧作用時における馬蹄形管の挙動把握及び座屈挙動の確認を行った。また，実用化に向けて模擬管路を構築し，実際に配管及び中込材の充填確認を行い，その施工性と安全性を評価した。

一方で，最終目標である実証試験工事(1650 - 2r 馬蹄形 × 500m)を実施し，その施工性，安全性及び妥当性を検証した。安全性及び妥当性については，継続してデータ計測を行い(~平成 17 年 3 月完了)，長期の安全性を確認した。

1)基礎試験及び評価

模型による外圧作用時における管体の(座屈)挙動把握

模型による覆工及び中込材を含めた複合体による管への影響を把握

管体製品の性能評価

中込材の要素試験による性能評価

～ の項目について F E M 解析による評価

2)実用化試験及び評価

模擬管路による施工性及び施工時安全性の確認

実証試験による施工性及び長期安全性の確認

F E M 解析による設計手法の確立

5．今後の課題

長期にわたる工法の信頼性や安全性の確認について引き続き調査を行い，データ計測終了後にこれらについても言及する。

研究全般において，馬蹄形に限定して進めてきたが，角形やその他の形状及び開水路部への適用などについて，引き続き検討を行う予定である。

【別紙】実施内容

個別研究テーマ	模型土槽試験
サブテーマ	1. 土圧載荷試験
実施年度	平成 14 年度～平成 15 年度

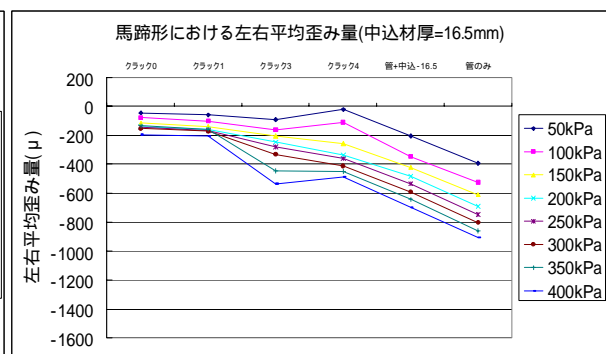
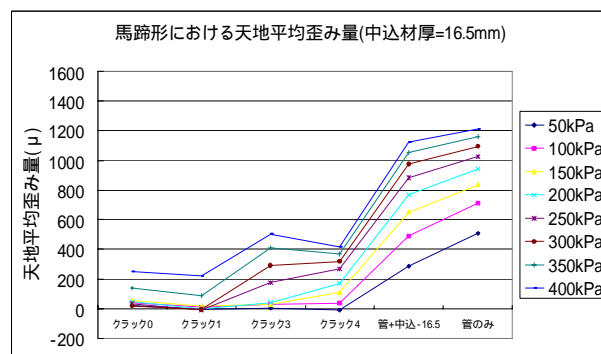
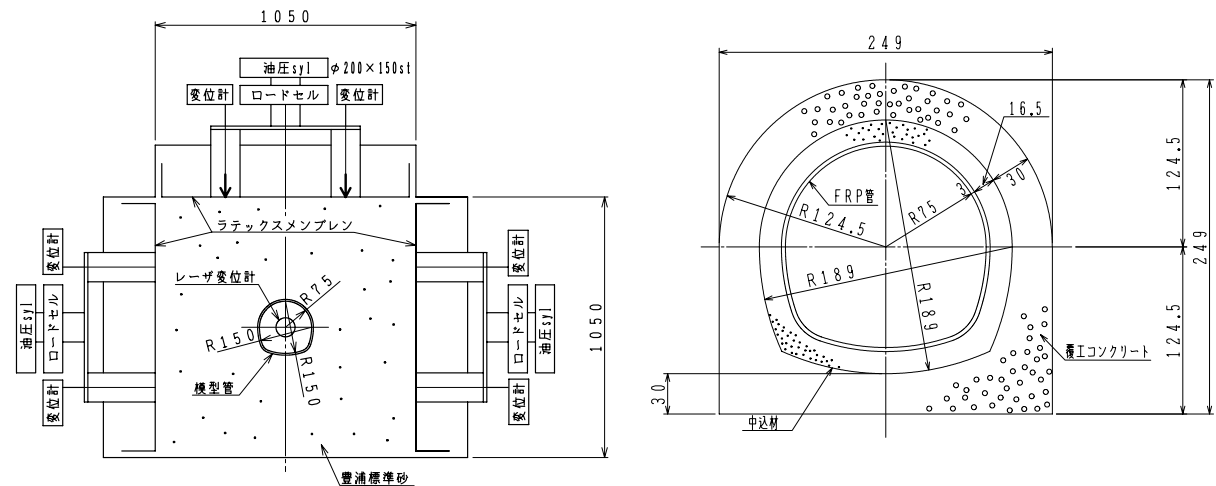
目的

馬蹄形管と円形管との挙動の違いを明らかにするとともに、トンネル内施工断面において、管の安全性を調査するために模型管(呼び径 150)を製作し検証を行う。

トンネル内壁と管との隙間に充填する中込材の厚みやその種類の違いによる管体への影響について確認する。

内容概略

下図に示すような土槽試験装置を製作し、呼び径 150 の模型管を使用して試験を行う。試験は、標準砂の地盤に馬蹄形 FRP 管単体や覆工付模型管を配置し、中込材の厚みや覆工のクラックの有無等により複数パターンについて確認する。



実施成果

・円形管は鉛直方向よりも水平方向に発生する歪みやたわみ量が若干大きくなる。一方、馬蹄形管は鉛直方向が水平方向よりもかなり大きな値を示す結果となった。これは形状の違いから、管体に働く水平土圧の分布の違いが影響していると考えられる。また、覆工が存在する事で、クラックの有無に関わらず、FRP 管に作用する載荷圧が軽減され、たわみ、ひずみともに小さくなる傾向が確認された。

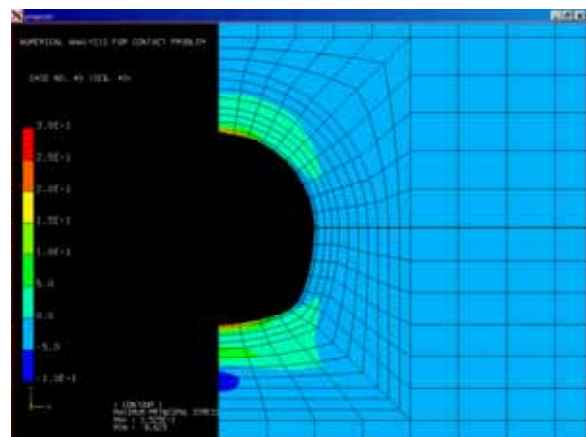
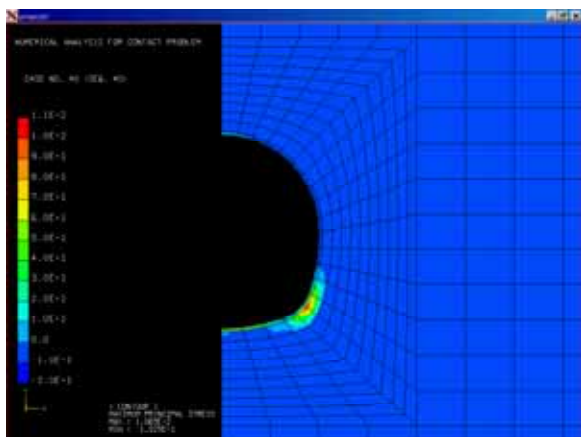
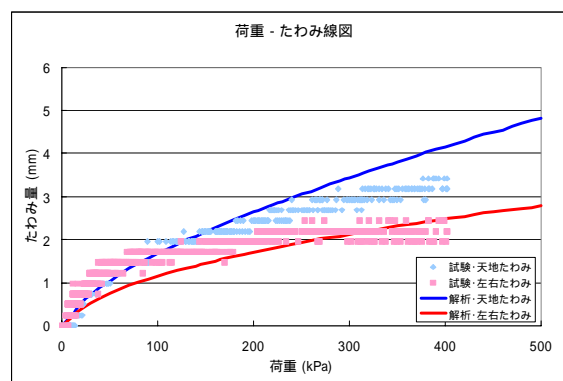
個別研究テーマ	模型土槽試験
サブテーマ	2. FEM 解析(土圧载荷試験)
実施年度	平成 14 年度～平成 15 年度

目的

FEM による構造解析を行うことにより，馬蹄形管に作用する土圧分布及び覆工や中込材を含めた管体の挙動について模型土槽試験と比較，検証を行う。

内容概略

FEM プログラムは，東京大学・田中教授の研究室で開発された「Nonsolan」を使用する。本プログラムは幾何学的非線形に対応し，大変形問題に強い特徴を有する。本プログラムを用いて試験結果との比較，検証を行い，覆工及び中込材の有無による管体付近の応力分布の違いなどの挙動について確認する。



実施成果

模型土槽試験結果と解析結果との比較を行い，同様の傾向が得られ良い一致を示す事が確認された。また，管体下コーナー部の応力集中は覆工及び中込材により緩和される様子が確認された。

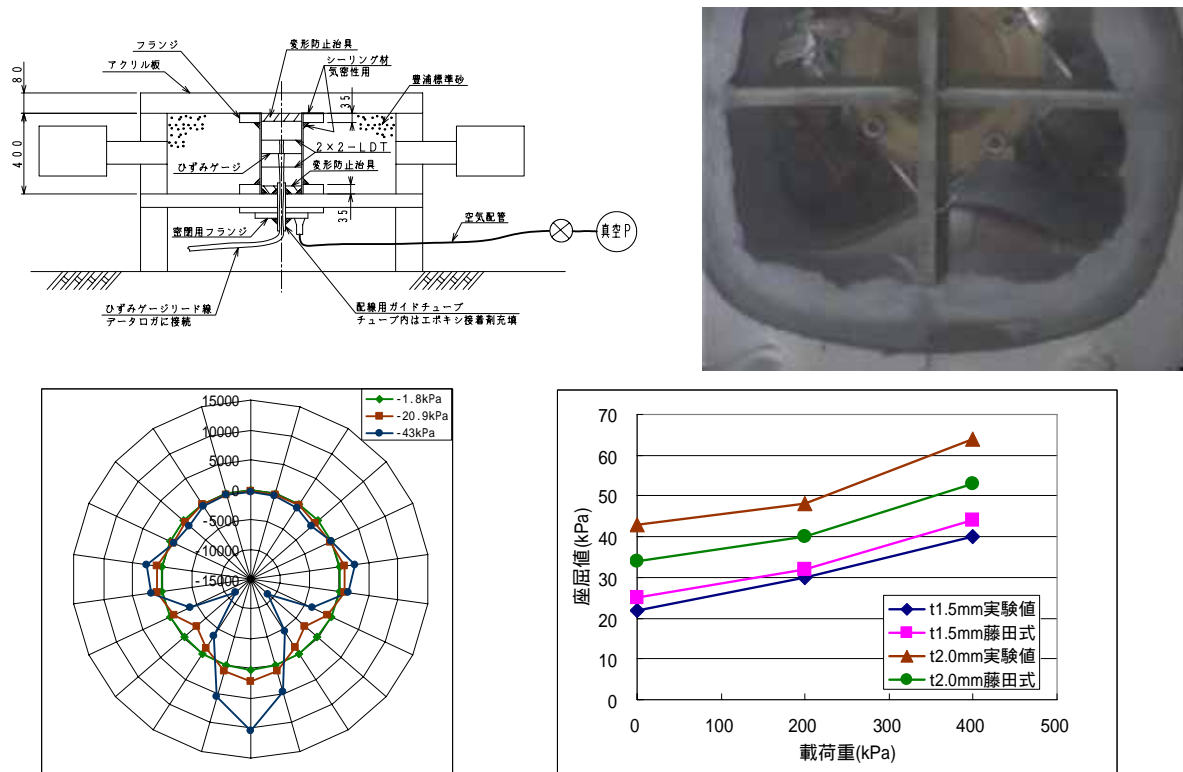
個別研究テーマ	模型土槽試験
サブテーマ	3. 負圧載荷試験
実施年度	平成 15 年度

目的

更生管に作用する外力として、載荷重以外に外水圧が挙げられる。外水圧が作用した場合の馬蹄形管の座屈挙動を明らかにし、管の安全性を調査するために模型管(呼び径 150)を製作し検証を行う。

内容概略

試験は水圧ではなく真空ポンプを使用して、負圧による載荷試験を行う。装置全体は下図に示すとおりであり、管材として塩ビ管を使用する。管は両端の拘束力の影響をなくするため、5 分割したものを使用する。また、密閉状態を保持するために、管体の周囲はラテックスメンブレンを被せた。管の歪み量及びたわみ量を測定し、負圧(外水圧)載荷時における座屈挙動について調査する。



実施成果

座屈はインバート部のみが急激に管内面側に膨らむ現象が確認でき、厚みが 1.5mm のものは大半が割裂的に破壊した。また、土圧による載荷重が大きいほど、座屈荷重が大きくなる傾向が確認された。

個別研究テーマ	模型土槽試験
サブテーマ	4. FEM 解析(負圧荷重試験)
実施年度	平成 15 年度

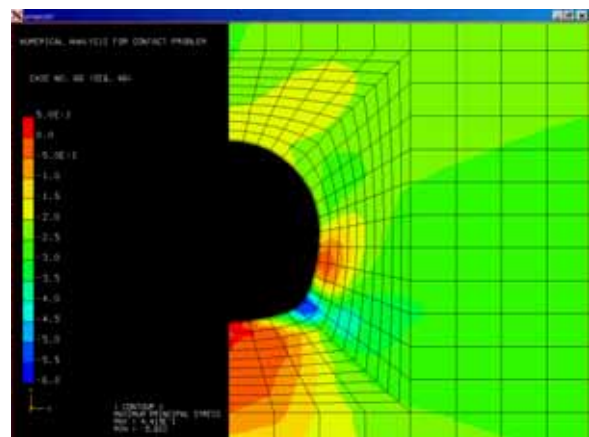
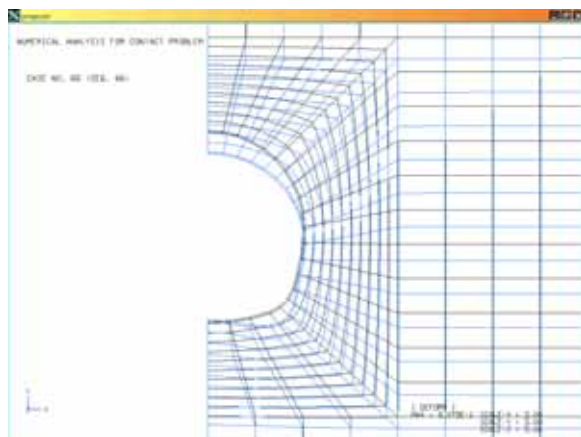
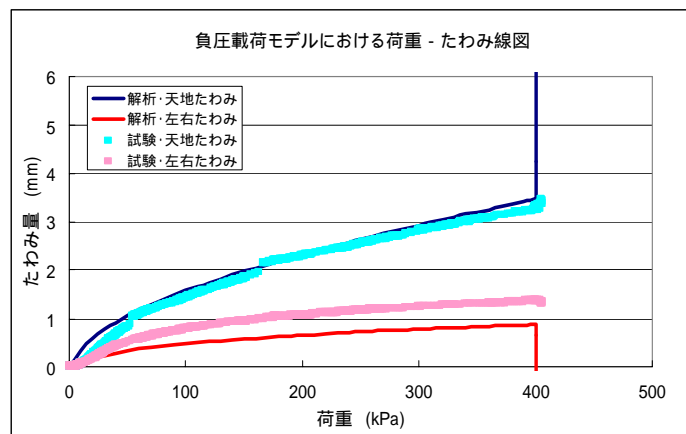
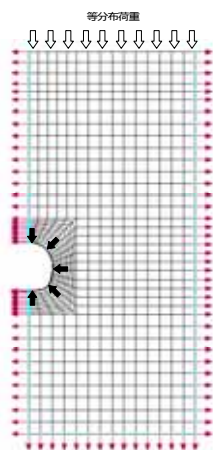
目的

FEM により構造解析を行い,負圧荷重時における馬蹄形管に作用する応力分布の確認及び座屈モードのシミュレートを行い,試験結果との比較,検証を行う。

内容概略

負圧荷重解析は,下図の半断面モデルにおいて白抜き矢印が示すように上載荷重を載荷し,載荷重を維持した状態で黒矢印が示す負圧を載荷する。(赤矢印は拘束条件を示す)

上載荷重及び負圧荷重を載荷した時の管体のたわみ発生状況及び座屈モードについて,試験結果との比較,検証を行い,応力分布及びひずみ分布の状態を確認する。



実施成果

負圧荷重モデルにおける試験結果との比較は,グラフに示すとおり良く一致する事が確認できた。また,応力分布を見ると,管底のインバート部が変形する事により,底部付近の管体及び周辺の地盤に応力が発生している様子が確認された。

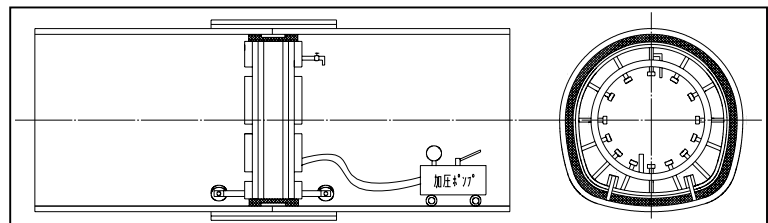
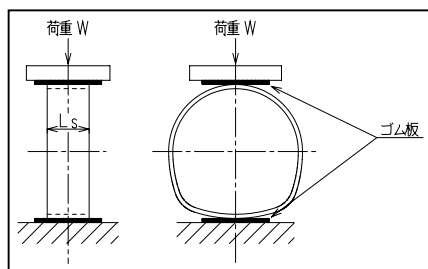
個別研究テーマ	管体製品の性能評価
サブテーマ	管体性能試験
実施年度	平成 15 年度

目的

工法の実用化に向けて管体製品を製作し、その基本的強度及び継手性能を調べる。製品は JIS A 5350 強化プラスチック複合管と同様の断面構造及び肉厚とし、許容差もそれに準拠する形とする。また、製品性能の試験目標値は最終用途を考慮し、上記 JIS に規定される種類のうち内圧 5 種管程度とする。

内容概略

管体強度については、JIS に基づいて試験を行い、同口径の円形 FRPM 管と同値の外圧強度を有することを確認する。また、継手性能については、農林水産省構造改善局 土地改良事業計画設計基準設計「パイプライン」に示す継目試験により確認を行い、水密性及び曲げ性能について確認する。



実施成果

形状が $2r$ 馬蹄形の場合、外圧強度は円管と大差ないことから、馬蹄形の外圧強度を規定する場合は同呼び径の円管と同値とする。また、継目部の水密性は用途の必要性から 0.2MPa で試験を行い、全く問題ないことが確認された。

個別研究テーマ	中込材の性能評価
サブテーマ	要素試験
実施年度	平成 15 年度

目的

馬蹄形 FRPM 管と既設水路トンネルとの間に注入する中込材の性能を評価し規定することを目的とする。

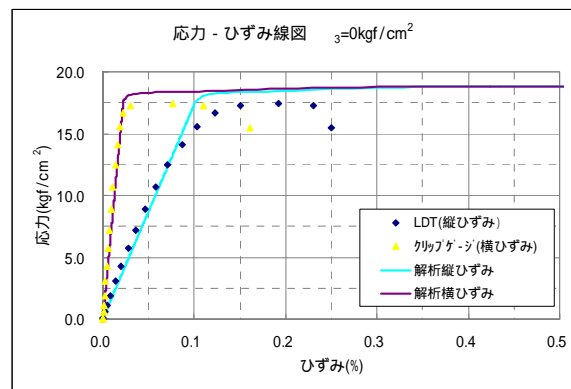
内容概略

中込材の性能評価を行うため、一軸圧縮試験を行う。本試験より圧縮強度、弾性係数及びポアソン比を算出する。なお、縦ひずみは外部変位計と LDT の 2 種類で測定し、横ひずみについてはクリップゲージまたは非接触変位計を用いて測定を行う。また、FEM 解析を行い、試験結果との比較、検証を行う。



圧縮強度(N/mm ²)	中込材の名称
0.1	低強度モルタル(s-soil)
1.0	エアミルク
1.0	JETMS (可塑材入り)
1.0	フィルコンSB-Q
3.0	Rフィルグラウト
5.0	フィルコンR

	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 N/mm ²		ポアソン比	
		LDT	外部変位計	LDT	外部変位計
エアミルク	1.51	683	57	0.15	0.01
	1.40	648	52	-	-
平均	1.46	666	55	0.15	0.01
JETMS	1.39	547	178	0.25	0.08
	1.30	661	181	0.31	0.09
平均	1.35	604	180	0.28	0.09
s-soil	0.13	17	12	0.40	0.27
	0.12	27	13	0.43	0.18
平均	0.13	22	13	0.42	0.23
フィルコン	11.99	2117	3070	0.07	0.07
SB-Q	10.15	2123	2550	0.08	0.06
平均	11.07	2733	3380	0.10	0.10
	11.07	2325	3000	0.08	0.08
Rフィル	24.95	3129	6456	0.08	0.14
グラウト	25.60	3936	6306	0.10	0.14
	26.16	3391	6270	0.07	0.13
平均	25.57	3485	6344	0.08	0.14
フィルコン	59.55	10838	15833	0.06	0.10
R	67.21	11988	16976	0.07	0.10
	63.01	12765	16195	0.09	0.09
平均	63.26	11863	16335	0.07	0.09



実施成果

6 種類の中込材について検討を行った結果、強度及び経済性を考慮して、エアミルクを採用することとした。ただし、一般的なエアミルクではなく、本工法における施工性を考慮して、高流動性及び水中分離抵抗性を有するエアミルクを開発した。また、FEM による解析を行い、比較的良く一致する結果が得られた。

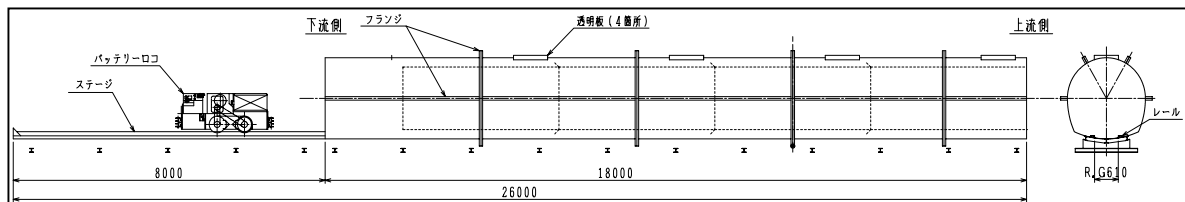
個別研究テーマ	施工性及び施工時安全性の確認
サブテーマ	模擬管路試験
実施年度	平成 15 年度

目的

模擬管路による試験施工を行うことにより、配管施工性及び施工時安全性を確認する。配管後、中込材の流動性及び充填性を確認し、硬化後の強度特性を確認する。


内容概略

全長 18m の鋼製模擬トンネルを構築し、搬送台車を使用して配管施工を行い、搬送台車の走行性や配管歩掛りなど施工性を確認する。中込材注入時における充填製の確認は、上部に設置した透明板により行う。また中込材の硬化性については、硬化温度の測定及び硬化後の一軸圧縮試験により確認する。



実施成果

配管施工については特に問題なく、円形管と同等の施工性を有することが確認された。また、中込材については、当初予定していた管 1 本ずつ移動し注入する予定を、移動せずに 4 本分注入可能であることが判明し、施工性が向上することが確認された。

個別研究テーマ	現地実証試験
サブテーマ	大和平野国営幹線水路等改修工事
実施年度	平成 15 年度
<p>目的</p> <p>馬蹄形 FRPM 管を用いる場合の設計・施工方法を検証するとともに、改修工法としての有効性を確認する。</p> <p>施工中に得られたデータから、歩掛などの確認を行う。</p> <p>施工完了後の経時的な変化から、既設管、中込材及び FRPM 管に作用する土圧、外水圧を計測する。</p>	
<p>内容概略</p> <p>当該水路トンネルは、無圧トンネルとして無筋コンクリートで築造されたものであり、45 年以上経過している。トンネル上部には様々な上載荷重が作用し、トンネルの損傷は大きい状態であった。このような状況下において、水密機能 耐荷機能 施設管理面の 3 点について回復を試みるため、本改修工法を実施した。</p> <p>当該工事における施工断面及び施工過程は以下に示すとおりである。なお、計測データとして、土圧、外水圧、管発生ひずみ及び管内変位量を測定し、配管施工時及び施工後の安全性を確認する。</p>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 20px;">   </div>	
<p>実施成果</p> <p>平成 16 年 3 月～平成 17 年 3 月の期間、管内計測を行い、安全性を確認した。</p>	

個別研究テーマ	FEM 解析による設計手法の確立		
サブテーマ			
実施年度	平成 15 年度		
目的 馬蹄形断面の構造計算を FEM 解析を用いて行う設計手法を確立する。			
内容概略 円形管と異なり，馬蹄形断面を有する本工法の構造計算は難解であるため，解析計算により対応する。主な解析手法は下表に示すとおりであるが，本設計においては，FEM による解析を使用する。その中でも地盤，トンネル覆工，中込材及び管を含めた複合断面を評価できる「NONSOLAN」を採用し，設計を行うこととする。「NONSOLAN」は東京大学の田中教授の研究室で開発された解析プログラムであり，強い非線形性を有する地盤の挙動や地中埋設構造物の挙動を解析するのに適している。			
	解析手法名	適用性	プログラム名
	骨組解析	いわゆるフレーム解析であり，簡易性に優れる。	SAP(鉄道総研)等
	有限要素法	塑性材料，非線形性についても詳細に検討が可能である。	ABAQUS(HKS Inc) NONSOLAN(Mr.Tanaka)
	不連続変形法解析	覆工のひび割れ発生により不連続な挙動を示す場合や，大変形を追跡する場合に有効である。	DDA(Shi-Goodman)
なお，本研究における解析による検討項目は，下表に示すとおりである。			
	区分	検討項目	詳細
	施工後	・土圧に対する管の安全性	・鉛直たわみ量
		・管内空虚時の外水圧に対する管の安全性	・円周方向応力
	施工時	・中込材打設時の管の安全性	・座屈圧力
			・円周方向応力
			・軸方向応力
			・座屈圧力
実施成果 材料試験(標準砂，中込材，FRP 管)との対比，模型土槽試験との対比及び実寸モデルとの対比により，「NONSOLAN」を用いて設計可能なことを確認した。			