プレシェル工法の開発 その2 せん断特性

平野勝識 笹谷輝勝

概 要

近年,既存交通機能を保持し,かつ周辺環境に配慮した非開削による新設交通施設建設技術のニーズが高まっている。 そこで,当社では推進工法を応用しアンダーパス等の地下構造物を構築する工法(*PRE-SHELL*工法)の実用化に向け研 究を進めている。本工法の構造体は,円形鋼管を加工した鋼管エレメント内部に鉄筋を配筋後,高流動コンクリートを充填し た複合構造物である。鋼管は相互にラップさせるために欠円形に加工されており,施工時の変形防止のため鉛直に隔壁が 設けられている。従来に無い構造形態であるため,設計法の確率を目的に実験的な検証が必要である。これまで,実大の 1/3 模型の試験体に正負交番曲げ載荷を実施し,曲げ耐力は鉄筋コンクリート造と同様の取り扱いが可能であることを確認 している。本報では,曲げ実験と同様な形状の試験体を用いたせん断実験に関して報告する。実験の結果,隔壁鋼板をせ ん断補強材と扱うことで既往のせん断耐力評価式により,本構造のせん断耐力が評価できることが確認された。

Development of a PRE-SHELL Construction Method Part 2 A method-of-construction outline and the shear strength characteristic

Abstract

Recently, demands for the development of new environmentally conscientious construction technologies for traffic intersections (with non-excavation and without disturbing traffic flows) are increasing. In order to meet these demands, we have developed a construction method (*PRE-SHELL* method), expanded from tunnel jacking method, which can be applied to underground structures such as underpasses.

The main structural element of this method is a circular steel tube with longitudinal reinforcement bars inside the pipe, and the pipe is filled with high-flow concrete. And a perpendicular partition wall as a steel element is placed inside the pipe to increase stiffness and allow less deformation. At the construction site, a series of these pipes are installed into the ground partially-overlapped.

This paper reports an experimental study on the properties of the tube used for underpass construction. The testing tube was fabricated to 1/3 scale and tested by cyclic load to compare the initial rigidity, state of cracking, and flexural strength with those of a reinforced concrete tube. The tube confined in steel elements exhibited an initial rigidity and shear strength comparable to the conventional reinforced concrete beam and seismic performance superior to it.

キーワード	:	外殻鋼材, 海会構造	,	円形鋼管,	
		夜口伸起,	1	ピア0101	

§1.はじめに

近年,既存交通機能を保持し,かつ周辺環境に配慮した非開削による新設交通施設建設技術のニーズが高まっている。そこで,図1に示すような推進工法と鋼殻エレメントを利用した地下構造物の構築工法(PRE-SHELL工法)の実用化に向け研究開発を進めている^{1),7),8)}。

本工法は,複数の鋼管エレメントを圧入し,それら相互を 部材の主鋼材となる鉄筋と充填コンクリートで連結してトン ネル躯体を構築した後,内部土砂を掘削する工法である。 推進工法により掘削を行うことで,高水圧下,礫層地盤, 崩壊性地盤で施工可能という利点を有する。

構造体は図3の構造形式に示すように,欠円形鋼管エレ メント同士を突き合わせとし,鋼殻エレメントに設けた貫通 孔に鉄筋を配し,高流動コンクリートを充填した複合構造 物である。写真2は,鋼殻エレメントの施工実験の状況で ある。これまでに曲げ特性に関しては,既存のRC構造物 と同様の取り扱いが可能であることが確認された¹⁾。しかし, 本構造のせん断特性については,既往の知見がないこと から,本複合構造のせん断耐力,変形性能,ひび割れ性 状の検証と評価法の確立を目的に実験を実施した。

§2.非開削工法の現状

現在,道路下や鉄道軌道下に非開削工法を用いて地下 構造物を構築する場合,シールド工法以外にMMST工法 ²⁾,URT工法³⁾,HEP&JES工法⁴⁾等の外殻先行型工法 が採用されている(表 1)。

これまで開発された外殻先行型工法は,外殻を構造物 構築時の山留め材,型枠,構造材を兼用する工法として 開発されている。



図 1 PRE-SHELL 工法のイメージ



写真1 PRE-SHELL 工法の施工実験

	【函体推進・けん	引(箱型ルーフ工法)】	【エレメント推進】			【シールド工法】		
	BR工法	SC工法	URT工法	HEP&JES工法	PRE-SHELL工法	MMST工法	シールド工法	
工法名称	BR : Box Roof	SC:Sliding Culvert	URT: Under Railway/ Road Tunneling	HEP:High Speed Element Pull Method JES:Jointed Element Structure Method	外殻先行式 任意断面トンネル工法	MMST: Multi Micro Shield Tunneling		
構造形式		RC造	複合構造(コンクリート、鋼管)			複合構造 (コンクリート、鋼管)	RC造(RCセグメント)	
掘進工法	鋼管推進(牽引)	鋼管推進(元押し)	鋼管推進(元押し)	鋼管推進(牽引)	鋼管推進(元押し)	専用シールド(矩形複数)	専用シールド	
鋼材の 扱い	仮設	:順次撤去		本設:コンクリート後充填		本設:コンクリート後充填	本設	
工法手順 工法詳細	上部にFCプレート と箱型ルーフを推進 側部にパイプルー フ打設 水平ボーリング・先 進導坑によりPC鋼線 を地中に配置 本体を横で積築 し、フロンテジャッキ 江法で地中にけん引	上部および側部にFC ブレートと箱型ルーフを 推進 本体を手前で構築 元押しジャッキで後方 から押して地中に推進 (順次、箱型ルーフを撤 去)	横綿 数 工法の 場合 鋼製角型エレメント を順次推進 エレメント内部にコン ケリート充填 横断方向に P C ケー ブルで緊結を行い一体 化 内部の 掘削	基準エレメントの挿 入 継手をガイドに一 般エレメントを挿入(上 床版、側壁、下床版の 順で施工) 裏込め注 入 継手部グラウト充ン 有 エレメント内部コン クリート充填 内部の 掘削	単体または複数の鋼 管エレメントを順次推 横断方向に鉄筋、P C鋼線等の鋼材を設置 エレメント内部にコン クリートを充填し一体化 内部の掘削	鋼製セグメントを用いた 矩形シールド機で順次掘 削 シールド間(接続部)の 掘削および配筋 鋼殻内部にコンクリート を充填し一体化 内部の掘削	例えば、下図のような 特殊な復円形状の断 面を確保するシールド [DOT (Double'O'Tube)工 法」もある。また、離隔 を確保して2本のシー ルドを構築する方法も 考えられている。	
概要図							\bigcirc	

表1 非開削工法の分類

また,多くの場合,オーガーまたはシールド機を使用し て掘削する。シールド工法以外の工法においては,外殻 鋼材の接合は特殊な継ぎ手あるいはPC鋼材を介して行 われ,曲げ耐力は設計上鉄筋コンクリート構造物(RC構 造)として考える場合が多い。これらの外殻先行型工法は,施工時の周辺環境への影響も少なく,また,施工時の地 盤沈下等の影響が極めて小さく,既存交通を確保したまま 施工可能という特徴がある。しかし,高水位の地下水があ る場合,補助工法である薬液注入などによる地盤改良が 必要となる。

§3. プレシェル工法の概要

本工法は、図1に示すように構造物の輪郭に沿って複数 の鋼管エレメントを推進工法により施工するものである。施 エフローを図2に示す。鋼管エレメント推進後に、鉄筋によ りエレメント相互を連結し、鋼殻エレメント内部を高流動コ ンクリートで充填する。躯体構築後、内部空間の土砂を掘 削する工法である。

鋼殻エレメントは,円形エレメント,片側・両側欠円エレメント(図3)を組合せて使用する。

施工機械は,玉石混じり礫層対応の汎用サイズの密閉 型推進機を使用し,数mから数十mの土被りの高透水,崩 壊性地盤で,低コストで施工可能という利点を有している。 また,鋼殻エレメントが円形であるために,水平・垂直の構 造体だけでなく,図4に示すような任意の斜め方向への連 結が可能であり,計画自由度の高い構造物を構築すること が可能である。

§4. 実験計画

4.1 実験目的

これまで設計法の確立を目的として,本構造試験体をR C造と仮定した曲げ耐力と同等であるRC構造試験体の曲 げ実験を実施してきた^{1),7),8)}。以下は,本構造の曲げ性状 に関する知見である。

RC 構造と同等の初期剛性および曲げ耐力を有し,鋼 殻エレメントにより,かぶりコンクリートの剥落が防止され ることで,エネルギー吸収能の高い,耐震性に優れた変 形性能となる。

主筋降伏までは RC 構造と同等の最大ひび割れ幅であ る。主筋降伏以降は鋼殻エレメント連結部にひび割れが 集中する。

以上のように,既報の曲げ実験により,本構造が既存の RC構造物と同様の取り扱いができることが確認できた。し かし,本構造のせん断特性に関しては,既往の知見がな いことから,実験的に確認する必要があった。そこで,本 複合構造のせん断耐力,変形性能,ひび割れ性状の検 証と評価法の確立を目的に実験を計画した。



図5 試験体

4.2 試験体

試験体を図5に示す。試験体規模は,曲げ実験と同じ実 大の約1/3 縮尺とした。

試験体は,いずれも幅を 400mm, 鋼殻エレメント径を 609.9mm(t=6.4mm)とし, せん断破壊先行とするため主 筋としてD25 の総ネジPC鋼棒を圧縮側2本,引張側5本 配置とした。また,コンクリートは高流動コンクリートの使用 を想定し 50N/mm²とした。使用材料の素材試験結果を表 2に示す。

B1 試験体は,曲げ試験体と同等に,鋼殻エレメントを鉄 筋コンクリート(RC)で連結し,片側欠円エレメントの隔壁 鋼材をせん断補強鋼材(t=3.2mm)とみなし,せん断補強 筋は配置していない試験体であり,鋼殻エレメントのラップ 率(H/D:Hはラップ部の部材高さ,Dは鋼殻エレメントの 外径)を曲げ実験と同様に 2/3 とした。

A 試験体は,部材高さを B1 試験体のラップ部の部材高 さと同じ400mmとし,B1 試験体とせん断耐力が同等にな るようせん断補強鉄筋(D10)を均等に配置(@50mm)し た RC 試験体である。B2 試験体は,せん断スパン比(a/d) の影響を検討するための試験体である。また,C 試験体は, ラップ率(H/D)の影響を検討するための試験体であり, H/Dを1/2とした。

4.3 実験方法

載荷装置を図6に,加力サイクルを図7に示す。加力は, 1点集中の片側繰り返し載荷とした。せん断スパン比は, 鋼殻エレメント連結部の性状および隔壁の性状を確認で きるよう設定した。せん断スパン比(a/d)は,A 試験体,B1 試験体が4.12,B2 試験体が2.74,C 試験体が4.60 であ る。

加力サイクルは,荷重制御によりひび割れ発生荷重の 50%,ひび割れ発生荷重,せん断ひび割れ発生荷重で 各々除荷し,最大荷重後は変位制御で破壊性状が確認さ れるまで載荷を行った。変位計測は,載荷点変位の他に, B1,B2試験体およびC試験体は連結部のせん断ずれを 計測した。ひずみは,主筋,せん断補強筋,鋼殻エレメン ト外周部,隔壁鋼板,補強鋼板にひずみゲージを貼付し 測定した。

§5 実験結果および考察

5.1 变形性状

荷重と鉛直変位の関係を図8に示す。せん断スパン比 (a/d)が同じA試験体とB1試験体は,せん断ひび割れ発 生時の200kN(変位8mm)までほぼ同じ初期勾配である。 本構造の初期剛性は,構造形態の違いに関わらず鋼殻ラ ップ部の断面積が重要であると思われる。

A 試験体は 147kN(4.9mm)でせん断ひび割れが発生 した。密なせん断補強筋のため,変位 22mm までひび割 れの進展はなく耐力が増大した。その後せん断ひび割れ 幅が増大し,耐力が急激に低下した。

表2 使用材料の素材試験結果

a)鉄筋·PC鋼棒

鉄筋	鎦種	降伏点	引張強度	弾性係数	伸び		
PC鋼棒	到到小王	(N/mm^2)	(N/mm^2)	$(\times 10^{5} \text{N/mm}^{2})$	(%)		
D10	SD295	359	508	2.03	26.4		
D25	B種1号	1,018 1,154 1.98		13.4			
b)鋼材							
種類	鋼種	厚さ	降伏点	引張強さ	伸び		
		(mm)	(N/mm^2)	(N/mm ²)	(%)		
鋼殻	STK400	6.4	370	512	35.3		
隔壁	SS400	3.2	.2 315 435		40.0		
c)コンクリート							
試験体	養生	圧縮強度	割裂強度	弾性係数	ポアソン		
		(N/mm^2)	(N/mm^2)	$(\times 10^4 N/mm^2)$	比		
A,B1	封かん	61.8	4.50	2.91	0.21		
B2, C	封かん	59.6	4.30	2.90	0.22		



図6 載荷装置



B1 試験体は,185kN(6.1mm)時にせん断ひび割れが 発生した。その後も鋼殻エレメントがせん断ひび割れ幅の 増大を抑制し,せん断破壊を防止するため,最終的には 主筋がせん断変形し,鉛直変位 56mm 時に耐力の増加 が緩やかになった。なお,B1 試験体は試験装置の関係か ら,この時点で加力を終了した。また,B2 試験体および C 試験体は,B1 試験体と同様にせん断ひび割れ発生後も 鋼殻エレメントがせん断ひび割れ幅の増大、せん断破壊 を抑制し,最終的には主筋がせん断変形し耐力が低下し た。

以上より, RC 構造に比べ本複合構造は, 脆性的なせん 断破壊を生じることなく, エネルギー吸収能に優れている ことを確認した。

5.2 最大耐力

せん断耐力一覧を表3に示す。また,図9にせん断スパン比と実験値と計算値の比の関係を示す。計算値は鉄道 構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物⁵¹(以下,鉄 道標準と呼ぶ)のせん断耐力算定式,鉄道標準の解説の 二羽らの式およびHEP&JES工法におけるせん断耐力 評価式⁴¹を用いて算定した。なお,算定にあたり材料係数 mおよび部材係数 bを1.0とした。

図9より, B1, B2 およびCの各試験体のせん断耐力は, RC 部材を対象としたせん断耐力算定式である鉄道標準 式および二羽らの式で評価可能であることがわかる。一方, HEP&JES 式は,無筋コンクリートのせん断耐力式を用

いているため、本構造と想定破壊機構が異なり適用できな

5.3 ひび割れ性状

いと判断できる。

図 10 に最終ひび割れ発生状況を示す。せん断補強筋 を 50mm ピッチに配筋した A 試験体は, 20kN で曲げひ び割れが発生し, 147kN 時にせん断ひび割れが発生し た。その後,曲げひび割れおよびせん断ひび割れが進展 し,最終的には 513kN 時にせん断破壊を生じた。

B1 試験体は,各エレメントにコンクリートが充填され鉄筋 によって連続化されているため,隔壁鋼材の付着ひび割 れが発生した後(22kN時)に各鋼殻エレメントで上下主筋 間にせん断ひび割れが発生している 185kN。しかし,鋼 殻エレメントによりコンクリートが拘束されているため,コン クリートのせん断破壊後もせん断ひび割れ幅の進展を抑 えるため,鉄筋に沿った付着ひび割れが発生するとともに 主筋のせん断変形が進行しないと耐力が低下しない機構 となっている。

また, B2 試験体および C 試験体も, B1 試験体と全体的 なひび割れパターンが同じであり, 耐力低下メカニズムは 主筋のせん断変形である。

これより,今回の実験範囲における a/d(2.74~4.60)および H/D(1/2~2/3)の範囲において,本構造は同様のひ び割れパターン,破壊形式を示すことがわかった。



図9 せん断スパン比と実験値/計算値の関係

表3 せん断耐力一覧

試驗休夕	演田式	計算値(kN)			実験値	実験 / 計算
山家中白	週用式	Vcd	Vsd	Vyd	V(kN)	V/Vyd
A	鉄道標準式	167	293	460		1.12
	二羽らの式	182	293	475	513	1.08
	HEP&JES式					
B1	鉄道標準式	169	256	425		1.22
	二羽らの式	184	256	440	517	1.17
	HEP&JES式	445	403	403		1.28
B2	鉄道標準式	169	256	424		1.60
	二羽らの式	212	256	468	677	1.45
	HEP&JES式	444	403	403		1.68
С	鉄道標準式	146	153	299		1.56
	二羽らの式	154	153	307	465	1.52
	HEP&JES式	211	403	211		2.20
ここで、						

鉄道標準式 Vvd= Vcd1 + Vsd

二羽らの式 Vyd= Vcd2 + Vsd(a/d 2.5の場合)

 $\mathsf{HEP}\,\&\mathsf{JES} \exists\,\mathsf{Vyd} \texttt{=} \mathsf{min}(\mathsf{Vcd3},\mathsf{Vus})$



図10 最終ひび割れ発生状況

5.4 各部のひずみ

図 11,12 に A 試験体のせん断補強筋のひずみとせん 断力の関係を示す。せん断ひび割れが通過しているせん 断補強筋は,0.2%を越えるひずみが発生した。

図13~図16にB1試験体の隔壁鋼材および鋼殻エレメントのひずみを示す。図13,14より,A 試験体と同様にせん断ひび割れが通過している隔壁鋼材には0.2%を越えるひずみが発生していることがわかる。一方,図15,16に示すように,隔壁鋼材と隣接する鋼殻エレメントには最大で0.03%程度のひずみが発生しているが,せん断ひび割れ発生状況から,鋼殻エレメントはせん断力をほとんど負担しない機構となっていることがわかる。

なお, B2試験体, C試験体とも各部のひずみはB1試験体と同様の傾向を示した。

以上より,本構造のせん断耐力機構はコンクリートと隔壁 鋼材からなることを確認した。

§6.まとめ

本構造の既報および本報の一連の構造断実験より,以 下の知見を得た。

- (1) 本構造(複合構造)は,RC 構造に比べ,曲げ変形性 能,せん断変形性能ともに優れている。
- (2) 鋼殻の拘束効果により,かぶりコンクリートの剥落が防止され,RC構造と同等の曲げ耐力を有する。
- (3) 本実験範囲では, せん断耐力は RC 構造と同様に鉄 道標準式および二羽らの式で評価可能である。

謝 辞 本研究にあたり,ご指導ならびにご協力を賜りました(財)鉄道総合研究所 小西真治博士,村田清満博士, (株)コムスエンジニアリング 土屋智史博士に厚く御礼申し 上げます。

参考文献

- 1) 平野, 笹谷: プレシェル工法の開発 その1工法概要と 力学的特性, フジタ技術研究報告, No.38 号, pp13-18, 2002
- 2) 柄川ほか: MMST 工法実用化の検討, トンネルと地下, Vol.28, No.1, pp47-53, 1997.1
- 3)大庭ほか:施工目地のあるPC梁のせん断破壊性状に 関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.18, No.2,1996
- 4) 鉄道 ACT 研究会, HEP & JES 工法技術資料, 2001.1
- 5)鉄道総合技術研究所,鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物,1998.7
- 6)鉄道総合技術研究所,鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物,1992.10
- 7)山口ほか:鋼殻で拘束された鉄筋コンクリート部材に関 する実験的研究,構造工学論文集, Vol.49A, pp1185-1192,2003.3
- 8)山口ほか:外殻鋼材で拘束された鉄筋コンクリート部材

の力学的性状に関する実験的研究,コンクリート工学年 次論文報告集, Vol.28, No.1, 2001





から決まった形態ですが,構造的 にも合理的な面を持っています。 色々と小細工するよりシンプルな 形態が一番なようです。材料の性 能を効果的に引き出す難しさを感 じています。