スタッドジベルを利用した合理的な合成セグメントの開発 The development of the effective composite segment with the shear connectors

井筒 克美*	大江 郁夫*		
Katsumi Izutsu	Ikuo Ooe		
磯 陽夫**	三戸 憲二*		
Akio Iso	Kenji Mito		

要 約

近年,大深度地下トンネルでは,高水圧下での切り拡げなどで,大きな曲げモーメントが発生する箇 所に高い耐力を有する合成セグメントの採用が増えている.しかし,合成セグメントは従来のセグメン トに比べコストおよび製作工期が増大する傾向にある.このような背景の下,筆者等は,スタッドジベ ルを使用した,製作性,経済性に優れる高剛性の合成セグメントの開発を行った.本稿では,実験の結 果および解析の概要について報告する.

- 目 次
- §1. 研究の背景
- §2. 合成セグメントの開発目標
- §3. 実験概要
- §4. 3次元FEMによる非線形解析
- §5. 試験および解析より得られた知見

§1. 研究の背景

大深度地下トンネルにおける非開削切拡げ部,避難路 や横坑などの非円形または欠円断面では,高耐力のセグ メントが必要とされる.近年,高耐力のセグメントとし て用いられてきたダクタイルセグメントの国内生産が中 止されたことから,このような場面では合成セグメント が利用されるようになった.

合成セグメントの背面に止水鉄板を設置すれば,高耐 力化だけでなく,高水圧下での止水性,耐久性の向上が 期待されるが,鋼板が厚いこと,構造が複雑であること による製作性の低下などが要因で,大断面シールドトン ネルの合成セグメントは,コスト,製作工期に課題を有 している.そこで,合理的な合成セグメントの開発を行 うこととした(図-1).

§2. 合成セグメントの開発目標

本セグメントは, 主桁, 継手版, スキンプレートによる5

- * 土木設計部
- ** 技術研究所

面鋼殻で構成された鋼製セグメントとRC構造の合成構 造を基本とし、以下に留意した構造を目指すこととした.

- 高い曲げ耐力を確保するため、すべての鋼板は全断 面有効を目指す.これにより、主桁とスキンプレー トの薄肉化を図り、鋼材の加工性を確保する.
- ・鉄筋籠挿入の合理化を図るため、ジベルと鉄筋の配置に配慮する(図-2).

さらに、コストダウンを図るためにはジベル等のずれ 止めの合理的な設計が必要である.シールドトンネルで は、隣接したセグメントの拘束効果により、主桁とRC の間には大きな摩擦抵抗力が期待できるため、道路橋示 方書¹⁾等で算出されるジベル本数ほどは必要がないと考 え、大幅にジベル本数を省略することとした.

また,スキンプレートも主桁ほどではないが,5面鋼 設で覆われている拘束効果を期待し,ジベルを省略でき ると考えた.





§3. 実験の概要

実験は、2本主桁の単体曲げ試験(正曲げ)、および3 本主桁の単体曲げ試験(正曲げ・負曲げ)を行った.

3-1 セグメント

表-1,2に供試体諸元を、図-3,4に2本主桁タイ プ、図-6,7に3本主桁タイプの合成セグメントの形状 図および概念図を示す.外主桁には鋼コンクリートサン ドイッチ構造設計指針(案)²⁾による必要量の50%程度 のスタッドジベルを中立軸より内面側に設置した.中主 桁には鉄筋の位置決め用として、量販されている最小径 ϕ 13 mmのスタッドジベルを片側3本設置した.スキン プレートには300 mm間隔で ϕ 13 mmのスタッドジベル を設置した. なお,ジベルのずれ止め効果を確認するため,縦リブ や継手などずれ止め効果を発揮すると考えられるものは, 供試体に設置しないこととした.

3-2 試験方法

図-5に試験概要図を示す. 試験方法は,支持スパン 4,000 mm,載荷スパン1,000 mmの2点載荷,両端可動 支持の単純曲げ試験とし,2本主桁の正曲げ,3本主桁の 正曲げと負曲げの計3ケースを実施した.トンネル縦断 方向の拘束を模擬するため,横拘束治具(鋼材+PC 鋼棒 +テフロン版)を用いて外主桁を拘束した状態で載荷を 行った. 鋼殻,鉄筋,スタッドジベルのひずみを計測し, 鋼殻と鉄筋コンクリートの一体化による平面保持性を確 認することとした.**写真-1**に試験状況を示す.

表一1 供試体諸元(2本主桁)			表一2 供試体諸元(3本主桁)							
2本主桁			3本主桁							
外	▶ 観形状 鉄筋		外	外観形状		鉄筋				
長さ	4500 mm	本数-径	8-D25		長さ	4500 mm	本数−径	2-D29	+6-D	25
幅	1200 mm	鉄筋量	40.536	cm ²	幅	1200 mm	鉄筋量	43	.25	cm ²
厚さ	220 mm	鉄筋比	1.99	%	厚さ	220 mm	鉄筋比	2	.12	%
設計	基進強度	材質	SD345		設計基準強度		材質	SD345		
fok	18 N/mm ²	M.1	上桁スタッドジベ	11.	fick 48 N/mm ²		主桁スタッドジベル			
7+	<u>+0 10/11111</u>	汉	20	10	スキ	スキンプレート		外主桁	中	主桁
~+		住	22	mm	厚さ	6 mm	径	16 mm	- 1;	3 mm
厚さ	6 mm	高さ	130	mm	材質	SM490	高さ	130 mm	100) mm
材質	SM490	本数	30	本		主桁	本数	30 本	1	3本
	<u>主桁</u>	スキンプ	レート用スタッド	ジベル	外主桁厚さ	9 mm	スキンプ	レート用ス	タッド	ジベル
主桁厚さ	16 mm	径	13	mm	中主桁厚さ	12 mm	径		13	mm
高さ	214 mm	高さ	80	mm	高さ	214 mm	高さ		80	mm
材質	SM490	本数	50	本	材質	SM490	本数		32	本
				· · · ·						•















図-4 合成セグメント概念図(2本主桁)



		4000		
_		外面側	PL6mm	PL12mm
		₽₽₽₽₽₽₽₽	Ţ <u>ŢŢŢŢŢŢŢŢ</u>	
1	<u>スタッドジベル 2×16-013</u> h=80mm	内面側	<u>スタッドジベル 2×15-016</u> h=130mm	

図一6 合成セグメント形状図(3本主桁)



3-3 試験結果

2本主桁正曲げ試験

試験結果を表一3,図-8に示す.トラブルにより途中 で試験を終了したが,設計終局荷重は超えた.図-12に 弾性域である許容荷重および短期荷重(許容荷重×1.5) 時の鋼殻と鉄筋のひずみ分布を示す.鉄筋位置の主桁の ひずみと鉄筋のひずみが概ね一致していることから,鋼 殻とRC間のずれがなく合成構造が成立したと判断した.

さらに, せん断力を大きく受ける箇所であっても, ス タッドジベルのひずみは低レベルであった(図-15). (2) 3本主桁正曲げ試験

試験結果を表一3,図一9に示す.ひび割れ荷重はRC 構造として算出した設計値と概ね一致し,終局荷重は設 計値を超えた.図-13に許容荷重と短期荷重(許容荷重 ×1.5)時の鋼殻と鉄筋のひずみ分布図を示す.

鉄筋位置の主桁のひずみと鉄筋のひずみが概ね一致し ていることから、鋼殻とRC間のずれがなく合成構造が 成立したと判断した.図-16にせん断力が発生する箇所 のスタッドジベルのひずみを示す.外主桁,中主桁,ス キンプレートともに大きなひずみは発生しなかった.











(3) 3本主桁負曲げ試験

試験結果を表-3,図-10に示す.ひび割れ荷重,終 局荷重ともにRC構造として算出した設計値を大幅に超 えた.図-14に許容荷重と短期荷重(許容荷重×1.5) 時の鋼殻と鉄筋のひずみ分布図を示す.正曲げ試験と同 様に鋼殻とRC間のずれがなく合成構造が成立した. 図-17にせん断力が発生する箇所のスタッドジベルの ひずみを示す.引張力が発生したスキンプレートのスタ ッドジベルが機能したことが確認された.外主桁,中主 桁のスタッドジベルは,許容荷重から相当のひずみが発 生した.

表一3 試験	結果のき	ことめ
--------	------	-----

\sim		2本主桁	3本主桁			
		<u> </u>	正曲げ試験	正曲げ試験	負曲げ試験	
	ひび割れ荷重	設計	59.2 kN	59.2 kN	68.7 kN	
		試験	97.1 kN	58.6 kN	181 kN	
	效已費重	設計	613 kN	615 kN	764 kN	
	彩向彻里	試験	621 kN	732 kN	1070 kN	



図-11 ひずみゲージ設置位置(鋼殻・鉄筋)概念図







図-14 ひずみ分布図(3本主桁負曲げ)



図-15 スタッドジベルのひずみ(2本主桁)



図-16 スタッドジベルのひずみ(3本主桁正曲げ)



図-17 スタッドジベルのひずみ(3本主桁負曲げ)

§4.3次元FEMによる非線形解析

単体曲げ試験による合成セグメントの鋼殻・コンクリ ート・スタッドジベルの挙動などを検証するために,有 限要素法による解析を実施した.

解析プログラムは、「ABAQUS 6.11-1」を用い,材 料の非線形性を考慮した3次元解析を行った.

解析は3回の実験結果の中から,スタッドジベルに大 きなひずみが生じた3本主桁負曲げ試験の実験供試体を 対象とした.

4-1 解析モデル

3次元FEM解析のモデルは、供試体の構造と荷重の 対称性を考慮し、スパン方向、幅方向にそれぞれ対称軸 を考慮した1/4モデルとした(図-18, 19).中詰めコ ンクリートはソリッド要素,鉄筋、スタッドジベルは断 面積、断面二次モーメントを定義した梁要素、鋼板は厚 みを定義したシェル要素を用いた.

ジベル端部の境界条件は剛結合とした.鋼板とコンク リートの接触面は圧縮力に応じた摩擦力を考慮した.摩 擦係数はμ=0.35 とした.

4-2 材料の非線形性

(1) コンクリート

コンクリートの構成則は, 圧縮側を CEB-FIP1990³⁾, 引 張側を出雲・岡村モデル⁴⁾ とした. 物性値は圧縮強度試 験結果 (JIS1108) から設定した.

(2) 鋼板・鉄筋・スタッドジベル

鋼材・鉄筋・スタッドジベルの降伏点強度は、ミルシ ートに示された値とした.降伏基準は Von Mises の降伏 基準⁵⁾ とした.ポアソン比はトンネル標準示方書シール ド編⁶⁾ より v=0.3 とした.



4--3 計測位置

鋼板(主桁,スキンプレート),鉄筋,スタッドジベル にひずみゲージを設置し,各ひずみゲージ設置位置を解 析の着目点とした.

4--4 解析結果

主桁,スキンプレート,鉄筋,ジベルの実験結果と解 析結果を図-20~25 に示す.スキンプレート,鉄筋,主 桁(引張側)については,解析結果と実験値がほぼ一致 する結果となった.





0

2000

3000

4000

-2000



主桁(圧縮側)および主桁ジベルについては、解析値 が実験値を上回る安全側の結果となった. スキンプレー トジベルの解析値と実験値に乖離がみられること、主桁 のスタッドジベルのひずみが実験値に比べ早期に発生し ていることについては,解析では考慮していない鋼材と コンクリートの付着力, 拘束治具の効果等が影響してい ると考えられる.

解析値と実験値に一部整合がとれない箇所もあるが, 概ね FEM 解析で実験結果を再現することができた.



§5. 試験および解析より得られた知見

5-1 試験より得られた知見

- 弾性域である許容荷重および短期荷重(許容荷重× 1.5)時の主桁・スキンプレートと鉄筋の応力分布の ずれは小さく、かつ鉄筋位置の主桁と鉄筋のひずみ の差も小さいことが分かった.よって、RCと鋼材 間のずれはなく、隣接セグメントの拘束効果等を考 慮した合成構造は成立したと言える.
- ② 中主桁のない「幅/桁高=約5.5」の比較的幅広なセ グメントでも、スキンプレートと鉄筋のひずみのば らつきはなく、スキンプレートは全断面有効である ことを確認できた.
- ③ 3本主桁は正曲げ,負曲げともに終局荷重が設計値 を超えており、十分に耐荷性能を有することが確認 された。
- ④ 2本主桁および3本主桁の正曲げ試験結果より、ス タッドジベルのひずみは主桁・スキンプレートとも に小さく、正曲げに対してはさらなる合理化の可能 性が示された.

5-2 解析より得られた知見

- 鋼殻(主桁スキンプレート)によって閉じられた変形に対する拘束効果が高い合成構造について,FEM 解析によりほぼ実験時の挙動を再現できることがわかった.
- ② 主桁のスタッドジベルに着目すると、許容荷重時の ひずみは、解析値:860µ(180 N/mm²)、実験値: 650µ(137 N/mm²)である(図-26).許容荷重作 用時の実験値の応力は許容値(160 N/mm²:SS400 相当)の8割強の値を示していること、また、解析 値と実験値の差が大きくないことから、今後、詳細 な解析を行ってもこれ以上のジベルの削減は難しい と考えられる.
- ③ 実験および解析結果から、鋼コンクリートサンドイ ッチ構造設計指針(案)による必要量の50%程度の ジベル配置が最適本数と考えられる.

5—3 まとめ

スタットジベル本数,配置の合理化,スタッドジベル 配置の工夫による鋼殻内部への鉄筋かご挿入性の向上に より,コスト縮減,製作性の向上を図った.

今後は、実用化に向けて更なる検討を行い、大深度地 下トンネルの切拡げ部や、避難路、横坑などの非円形ま たは欠円断面など大きな負曲げが発生する条件下におい て当該合成セグメントの採用を提案したい.





写真-2 合成セグメント (コンクリート打設前)

謝辞:本研究は早稲田大学小泉教授のご指導を賜った. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説 Ⅱ 鋼橋編,2012年3月
- 2) 社団法人土木学会:コンクリートライブラリー 73 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案),平 成4年7月
- 3) CEB FIP MODEL CODE 1990
- 出雲淳一,他:面内力を受ける鉄筋コンクリート板 要素の解析モデル、コンクリート工学論文、No. 87. 9-1, pp. 107-120, 1987.9
- 5) 社団法人土木学会:鋼・合成構造標準示方書 総則 編・構造計画編・設計編,2007 年
- 6) 社団法人土木学会:トンネル標準示方書 シールド 工法同解説,2006年