# (40) 嵌合方式合成構造セグメントの薄肉化・ 幅広化における設計法の検討

佐田 崇1・石田 宗弘2・佐野 陽一3

1正会員 新日本製鐵株式会社 技術開発本部鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター

(〒293-8511千葉県富津市新富20-1) E-mail:sada.takashi@nsc.co.jp

<sup>2</sup>正会員 新日本製鐵株式会社 技術開発本部鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター (〒293-8511千葉県富津市新富20-1) E-mail:ishida.munehiro@nsc.co.jp

3正会員 新日本製鐵株式会社 技術開発本部鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター

(〒293-8511千葉県富津市新富20-1) E-mail:sano.yohichi@nsc.co.jp

都市部における交通渋滞緩和を目的とした地下道路トンネルの建設において、早期道路使用と総工事費 縮減が可能なシールドトンネルセグメントが求められ、セグメントの幅広化・薄肉化構造開発が進められ ている.このような背景の中、合成構造セグメントは幅広化・薄肉化を可能とする構造として注目されて いる.

本稿では、まず、嵌合方式合成構造セグメントの概要、断面設計モデル及び幅広化・薄肉化における課題について述べる. さらに、縮小モデル試験体を用いた構造試験結果から、幅広化・薄肉化が部材の合成 挙動に及ぼす影響を述べると共に、3次元FEM解析から、幅広化・薄肉化の影響により中詰めコンクリート の有効断面が変化する現象が確認されたので、この現象を考慮した設計法の検討を述べるものである.

Key Words:シールドトンネルセグメント,構造試験,FEM解析

# 1. はじめに

近年,社会基盤整備事業が縮小する中で,首都圏・関 西圏を中心に交通渋滞緩和を主な目的とした三大都市圏 部の環状道路整備が推進されている.なかでも,都市部 では近隣への騒音・排気ガス問題や,施工時の交通集 中・用地買収等の様々な問題が生じるために,これらの 問題を解決する手段として,道路の形態を地下道路トン ネル構造とすることが主流となりつつある.しかし,地 下道路トンネルは高架橋に比べて工事費が高価になる問 題点もある.そこで,早期道路使用と総工事費縮減を可 能とするシールドトンネル用セグメントが求められ,セ グメントの薄肉化・幅広化構造開発が進められている.

そこで、これまでに工事実績として幅1500mm,桁高 250mmの薄肉化構造を実現している嵌合方式合成構造セ グメントに着目し、更なるコスト削減が可能な嵌合方式 合成構造セグメントの薄肉化・幅広化開発に取り組んだ ので、以下に、本構造の特長の紹介、薄肉化・幅広化の 課題を述べるとともに、取り組みから得られた知見を活 かした設計法のについて報告する.

## 2. 嵌合方式合成構造セグメントの特長

図-2.1に嵌合方式合成構造セグメントの概略図を示す. また,図-2.2に嵌合方式合成構造セグメントの断面図を, 図-2.3に主桁フランジ部詳細図を示す.

このセグメントは、①嵌合構造のH形形状鋼フランジを 有する主桁、継手面版により形成される外鋼殻、②中詰 めコンクリート、補助構造として③縦リブ、④幅止め鉄 筋、⑤ひび割れ防止鉄筋にて構成されている.このよう な構造であるため、以下のような特長を有する.

- i)鋼・コンクリート合成構造であるため,高耐力・高 剛性の薄肉セグメントである.
- ii)主桁フランジ部に嵌合構造を有することにより、高 耐震性能・高真円度を有する構造である.
- iii)覆工の外周部と内周部の2層の止水機構を有し組み立 て後には4層の止水シール機構となるため、行使水性 能を有する構造である。

更に、嵌合方式合成セグメントは上記に加えて、ワン パスのボルトレス継手をピース間とリング間の両方に 有することにより、高速施工が可能とする構造である.





図-2.1:嵌合方式合成構造セグメント概略図



## 3. 断面設計モデルと薄肉化・広幅化における課題

# (1) 断面設計モデル

嵌合方式合成セグメントの断面設計モデルは,設計有 効断面を主桁部鋼材(鉄筋換算)とコンクリート全幅 (引張側無効)とし,幅方向一様に平面保持が成立する と仮定した2次元RC断面構造モデル計算としている.こ の設計法を用いている背景は,過去に実施された構造試 験結果より,この設計法を用いることで,①弾性域にお ける主桁部の応力評価及び部材剛性評価が可能であるこ と,②終局耐力の評価を安全に評価可能であることを確 認しているからである.設計有効断面を図-3.1に示す.





#### (2) 薄肉化・幅広化における課題

先にも述べたが, 嵌合方式セグメントは幅1,500, 桁 高250mm(幅/桁高=60, 以下,幅/桁高をB/Hとする.) までは工事実績がある.また,構造試験においても幅 **1,800mm**,桁高300mm (B/H=6.0)までは、これまで用いてきたRC断面設計モデルにより挙動予測が可能であることを確認してきた.

B/H=10.0までの薄肉化・幅広化を進めていく際に,嵌 合方式合成構造セグメントが有する①セグメント主断面 の両端部に離散的に剛性の高い主桁が配置されている, ②合成構造挙動が主桁部のコンクリート拘束効果により 成されている,という2点の特徴から薄肉化・幅広化に 伴い以下の挙動が想定される.

#### a) 薄肉化に伴う挙動

薄肉化を図ると、主桁部及びコンクリート部に作用す る土水圧は変化しないが、薄肉化により断面の曲げ剛性 の低下が生じ、コンクリート部の変形が主桁部に比べ先 行することでコンクリート部の曲率が大きくなる.

#### b)幅広化に伴う挙動

主桁部フランジ仕様及びセグメントの桁高を一定にし て広幅化を図ると、主桁部に比べて剛性の低いコンクリ ート部の負担荷重が増加するために、コンクリート部の 変形が先行し、コンクリート部の曲率が大きくなる.

これらの挙動より、コンクリート部の早期破壊による 耐力低下及び主桁部の負担断面力比率の増加による部材 降伏の早期発現が想定される.そこで、嵌合方式合成セ グメントの上記挙動が生じるB/Hの探索及びその原因把握を目的とし、構造試験及びFEM解析を実施した.

# 4. 縮小モデル試験

薄肉化・幅広化が合成挙動に及ぼす影響を把握するこ とを目的として, B/Hをパラメータとした縮小モデル試 験を実施した.

# (1) 試験概要

# a) 載荷概要

図4.1に載荷概要図を、写真4.1に載荷状況を示す.本 試験では、薄肉化・幅広化の影響を明確にするために、 コンクリート部のみに土水圧を模擬した等分布荷重を水 圧バッグを用いて載荷して手法を採った.図4.2に試験 体平面図を示すと共に、水圧バッグ設置位置を示す.



図-4.1:載荷概要図



写真-4.1:載荷状況



# b) 試験体概要

表4.1(a), (b)に試験体諸元を,表4.2に試験パラメータを 示す.試験体は3ケースとも試験体長さと幅を一定にし ており,長さを2,300mm,試験体幅を1,000mmとしてい る.また,図4.3(a)~(c)に試験体断面図を,表4.3~4.5に 試験体に用いた素材試験結果を示す.

表-4.1(a): 試験体諸元

CasaNo	主桁	スキン PL	アンカーリブ
Case NO.	(mm)	(mm)	(mm)
1	H-150*70*9*19	t=3.2	T=9,h=90
2	H-150*70*9*19	t=3.2	T=9,h=75
3	H-150*70*9*19	t=3.2	T=9,h=60

表-4.1(b): 試験体諸元

Case No.	トンネル軸方向鉄筋	トンネル周方向鉄筋
1	D13@125	D6@125
2	D13@125	D6@125
3	D13@125	D6@125

表-4.2試験/	ペラ	メ	ータ
		/	

Case No.	幅:B (mm)	桁高:H (mm)	B/H
1	1,000	150	6.7
2	1,000	125	8.0
3	1,000	100	10.0



図-4.3:試験体断面図

表-4.3	:	鋼板素材試驗結果
11.5	•	

	板厚	降伏強度	引張強度
	(mm)	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$
SS400		235	400
フランジ	19	288	437
ウェブ	9	351	451
アンカーリブ	/	551	151
スキンプレート	3.2	301	414

表-4.4:鉄筋素材試験結果

仅	降伏強度	引張強度
1主	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$
SD345	345	490
10	383	577
13	377	546

表45:ニ	ュンク	リー	ト素材試験結果	Ē
-------	-----	----	---------	---

	7日		試験日	3
Case No.	圧縮強度	材齢	圧縮強度	静弹性係数
	$(N/mm^2)$	(日)	$(N/mm^2)$	$(*10^{4} \text{N/mm}^{2})$
1	24.4	11	28.9	2.838
2	30.7	15	34.8	2.927
3	25.3	11	29.0	2.837

# (2) 試験概要

#### a) M- Ø 関係

図-4.4にM/Mud- $\phi/\phi$ ud関係図を示す. Mudはコンクリート部の発生圧縮縁ひずみが終局圧縮ひずみである 3,500 $\mu$ に達する設計終局モーメントを示し、 $\phi$ udは設計 終局モーメント時の曲率を示す.

結果として、B/Hの増加に伴い、設計終局耐力に対す る耐力低下前の最大耐力の比が低下するとともに、耐力 が低下する際の曲率が小さくなる傾向が得られた.



#### b) 主桁部発生ひずみ

表4.6に主桁フランジ部発生ひずみと設計ひずみの比 較結果を示す.比較荷重レベルは設計降伏荷重(引張側 フランジのひずみが設計降伏ひずみとなる荷重)である.

B/Hの増加に伴い,設計降伏ひずみに対するフランジ に発生するひずみの比が増加する傾向が得られた.また, B/H=10.0では設計降伏荷重時に発生するひずみが設計降 伏ひずみを上回る結果が得られた.これより,B/Hの増 加に伴い,主桁部の負担断面力比率が増加していること が確認された.

表-4.6: 引張側フランジ部ひずみ比較

Case No.	設計降伏荷重時 発生ひずみ(μ)	設計降伏ひずみ (µ)	比率
1	1242		0.90
2	1359	1371	0.99
3	1569		1.14

#### c) 試験体幅方向変位分布

図4.5にコンクリート部( $\delta c$ ) と主桁部( $\delta s$ )の相 対鉛直変位差( $\delta c - \delta s$ )を桁高で除した値とB/Hの関 係図を示す.相対鉛直変位差は,試験体幅中央位置のコ ンクリート部鉛直変位と,主桁部鉛直変位の平均値との 差を表している.

結果は、当初想定したようにB/Hの増加に伴い相対変 位差が大きくなる結果が得られた.



#### d) まとめと考察

等分布荷重を載荷しBHを増加させることで、当初想 定していたコンクリート部の変形が主桁部に対して進行 するとともに、早期に最大耐力が低下しフランジ負担断 面力が増加する結果が得られた.また、B/H=10.0におい てその傾向が顕著に現われる結果となった.

これらの結果が得られた原因を以下のように想定した. 図4.7に薄肉化・幅広化セグメントの変形時における 耐荷メカニズムのイメージ図を示す.セグメントが幅方 向にも変形し,試験体幅方向の曲げ曲率が異なることで, 試験体幅方向のひび割れ高さが変化する.これより,設 計では幅方向一様に分布すると仮定していた中立軸位置 が,試験体幅方向で凸形状になりコンクリートの圧縮有 効断面が減少することで,耐力低下及びフランジ負担荷 重が増加したと考えられる.



40 - 4

# 5. FEM解析

試験結果より,薄肉化・幅広化により耐力低下および フランジ負担荷重の増加の原因をコンクリート部圧縮有 効断面の減少と想定したが,試験結果ではその現象を把 握できなかった.そこで,コンクリート部圧縮有効断面 状態を把握するために,試験のシミュレート解析を実施 した.解析には,汎用ソフトであるMarcを用いた.

#### (1) 解析モデル

解析モデルは、試験体の対象性を考慮して1/4断面を 解析対象とした.図-5.1にFEMモデルを示す.また、表-5.1に解析に用いた使用材料とそのモデル化を示す.材 料の物性値は、試験と同値を用いている.



図-5.1:解析モデル

表-51	•	使田材料とそのモデル化	
1X-J.I		文川1/1/1~~~~~~~~~~	

使用材料	使用要素
コンクリート	8節点ソリッド
鋼板	4節点シェル
鉄筋	2節点はり

#### (2) 解析結果

#### a) コンクリート圧縮有効断面コンター図

図-5.2に試験体の載荷スパン中央位置における, コン クリート部圧縮有効断面コンター図を示す. コンクリー ト部圧縮有効断面とは, 主桁部中立軸位置と概ね一致す る範囲のコンクリート部断面と定義している.

結果, B/Hの増加に伴いコンクリート圧縮有効断面の 幅が狭くなる傾向が得られるとともに,断面幅方向で中 立軸位置が凸形状を示すことを確認した.

これより,試験で得られた薄肉化・広幅化が及ぼす影響の原因は,コンクリート部圧縮有効断面の減少である と考えられる.



図-5.2: コンクリート部圧縮有効断面コンター図

# 6. コンクリート圧縮有効断面を考慮した設計モデ ルの検討

試験結果より薄肉化・幅広化セグメントはトンネル周 方向・軸方向に曲げ変形を示し、2方向版の挙動を示す ことから、セグメントの断面設計にこれまであまり考慮 されてこなかったトンネル軸方向の断面仕様の検討も必 要になってくる.また、FEM解析からコンクリート圧縮 有効断面が減少する傾向も見られた.これより、先に得 られた現象を考慮可能な断面設計法を用いることで、こ れまで断面設計に用いてきた2次元 RC断面構造モデル計 算よりも合理的な断面仕様決定が可能であると考えた. そこで、セグメントの2方向版の挙動およびセグメント 幅方向の断面剛性の変化を考慮可能な、格子はりモデル を用いた断面設計を検討することとした.そこで、格子 はりモデルの適用性の検討を行うために、試験結果のシ ミュレート解析を実施した.解析には、フレーム解析用 の汎用ソフトであるSTANを用いた.

#### (1) 解析モデル

解析モデルは5主桁11横はりとしている. 図中に示す 記号は,Sが鋼材を示し,Cがコンクリートを示してい る. コンクリート部の有効断面は以下のように設定した. また,面圧荷重載荷位置は,ひび割れ剛性を用い、その 他の部分は全断面剛性を用いている.

- ①トンネル周方向コンクリート(C1, C2)
  中詰めコンクリート断面幅を等分割にし、有効 断面幅を310mmと設定.
- ②トンネル軸方向のコンクリート(C3~C6) 載荷荷重の影響を考慮し、載荷位置から支点に向 かうに従い有効幅を広く設定.

また,等分布荷重は水圧バッグ設置位置に対応する節 点に,各節点が負担する面積に応じた荷重を点荷重とし た値を用いている.



#### (2) 解析結果

#### a) 試験体幅方向鉛直変位分布

図-6.2にB/H=6.7の載荷スパン中央位置における試験体 鉛直変位分布を示す.結果,格子はりモデルは試験結果 より全体的に過小評価するが,試験体端部から試験体中 央部に向かい変位が増加する傾向はよい対応を示してい る.



図-6.2:試験体幅方向鉛直変位分布

#### b) 主桁部発生ひずみ

図-6.3に主桁フランジ部の発生ひずみ比較図を示す. 結果,格子はりモデルの算定結果は,試験結果より圧縮 ひずみが100 μ程度多く算定されるものの,曲率は試験 結果と良い対応を示す.



これらの結果より,結果に差は見られるものの比較的 より対応を示すので,薄肉化・幅広化セグメントの設計 法として格子はりモデルが適用可能であると考えられる.

# 7. まとめ

本研究では、嵌合方式合成構造セグメントの薄肉化・ 幅広化が合成挙動に及ぼす影響と原因を示した.また、 薄肉化・幅広化の影響を考慮した合理的設計法として、 格子はりモデルの適用性を検討した.

今後の課題としては、コンクリート部圧縮有効断面の 定量化を行い、より現実に近い断面剛性の設定方法を構 築することが挙げられる.



# Takashi SADA, Munehiro ISHIDA and Yohichi SANO

The road use at the early stage and the total construction expense reduction are advanced, and in the construction of the underpass road tunnel to ease the traffic jam in the city part, a possible shield tunnel segment is obtained, and the method for reduce the thickness and spread the width of the segment are advanced. In such a background, the compositional and the structure segument are paid to attention as a structure to enable to reduce the thickness and spread the width of the segment.

In this paper, the outline of the New Mechanical-Jointed Segment, the designe method and the problem of reduce the thickness and spread the width of this segment are described. In addition, reduce the thickness and spread the width of the segment from the structural examination result describe the influence on compositional behavior. And the 3D FEM analysis is executed, and because the chainging henomenon was confirmed, an effective section of the concrete is the described one according to the influence of reduce the thickness and spread the width of the segment as for the examination of the design method that consider this phenomenon.