

コンクリート中詰め鋼製セグメントの合成構造化の開発

Development of Composite Concrete Packed Steel Segment

広 沢 規 行^{*(1)}
Noriyuki HIROSAWA
三 宅 正 人^{*(1)}
Masato MIYAKE

中 島 正 整^{*(2)}
Masanari NAKASHIMA
石 田 宗 弘^{*(3)}
Munehiro ISHIDA

今 福 健 一 郎^{*(3)}
Kenichiro IMAFUKU
豊 島 径^{*(1)}
Kei TESHIMA

中 山 裕 章^{*(3)}
Hiroaki NAKAYAMA
衣 川 英 明^{*(4)}
Hideaki KINUGAWA

抄 録

都市型洪水対策としての地下河川の建設，交通インフラストラクチャの地下化等，都市の再生を目的とした地下利用を考えると，今後求められる地下空間は，より深く，大規模なものとなる。このような大深度地下トンネルの覆工を構成するセグメントには，高い断面性能や止水性能が求められる。引張り特性および止水性に優れた鋼殻と圧縮特性にすぐれた中詰めコンクリートを一体化して，大きな土水圧に対して合理的に抵抗させるために，CPセグメントの合成構造化の開発を行った。適用する荷重条件が違う2種類の合成構造CPセグメントの特徴，構造実験結果に基づくそれぞれの構造性能の評価と設計法の検証，および工事適用事例について報告した。

Abstract

To equip underground spaces with infrastructures such as underground rivers and transportation systems for the purpose of reviving urban areas, it is expected that these spaces will be constructed in a deeper underground and the size of them will get larger. Therefore, the segment which covers the surface of such structures needs to have high performance in terms of bending-resistance and water-resistance. Authors developed a new composite concrete packed steel segment, Composite CP segment, which can resist large earth and water pressure, by uniting steel with high tension resistance and water-tightness and concrete with high compression resistance. This paper describes the characteristics of two different Composite CP segments applied for different load conditions, and the evaluation of the structural performance and the design method of Composite CP segments based on the test results, and reports a construction site where Composite CP segments are being used.

1. はじめに

近年のシールドトンネル分野においては，コスト低減，工期短縮の面から工事合理化を図るために二次覆工省略の採用が多くなってきた。一方，都市型洪水対策としての地下河川や雨水貯留幹線等内水圧の作用するトンネル，地下鉄駅舎部等極めて大きな曲げモーメントが発生する非円形トンネル，活断層付近を通過する高い耐震性が要求されるトンネルなど多様なトンネルが建設され，適用されるセグメントには高度な性能が要請されてきた。

このような市場ニーズに応えるために，1990年より新日本製鐵の建材事業部門では，コンクリートに比べて引張強度，伸び，水密性に優れた鋼材の特性を活かして，セグメント外殻5面を鋼板で覆い，その鋼殻の内側に予め工場にてコンクリートを打設して製品としたコンクリート中詰め鋼製セグメント(Concrete Packed steel segment：CPセグメント)を開発し，数多くの二次覆工省略型のシールド工事に適用してきた。このCPセグメントは，鋼製セグメントと

同様の設計を行い，外荷重に対して鋼構造として設計するものである。

最近の大都市の道路下の浅深度，中深度地下では，鉄道，電気，ガス，電気通信，上下水道などのトンネルや管路が輻輳し，地下施設は益々深い地下に設置せざるを得なくなってきた。また，2001年度より“大深度地下の公共的使用に関する特別措置法”が施行され，地下を利用した都市の再生に向けた意識の高まりもあり，今後，大都市部の大深度地下開発が促進されるものと思われる。深い地下に設置されたトンネル覆工には，大きな土水圧が作用し，リング周方向圧縮力が増大するために，セグメントを鋼構造として設計すると鋼主桁断面が増大することになり，コンクリート構造に比べて不経済になる。このような背景を踏まえ，著者らは，深い深度のトンネルに対してコンクリートの圧縮強度を活用して合理的に設計できるようにCPセグメントの合成構造化の開発を進めてきた。本報告では，2種類の合成構造CPセグメントの技術開発の内容を紹介する。

*⁽¹⁾ 建材開発技術部 マネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-7774

*⁽²⁾ 建材開発技術部

*⁽³⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

*⁽⁴⁾ 大阪支店 マネジャー

2. CPセグメントの概要

2.1 CPセグメントの特徴

CPセグメント(図1参照)の主な特徴として、①鋼の優れた強度性能を活かし、RCセグメントでは覆工厚が大きくなる曲げモーメントが非常に大きい場合においても薄肉化が可能である、②二次覆工の省略による工期短縮が可能である、③鋼板で覆われているため施工時などにおけるコンクリートの割れ、欠け等の恐れがない施工性に優れたセグメントである、④止水溶接及び止水シール材の組合せによる高い水密性を確保している高品質なセグメントであることが挙げられる。

2.2 CPセグメントのメニューと位置付け

CPセグメントには、その構造特性により図2に示す3種類のメニューが揃えられている。

4主桁CPセグメントは、鋼の優れた引張耐力特性を活かし、トンネル周方向に発生する引張軸力に対して合理的に抵抗することが可

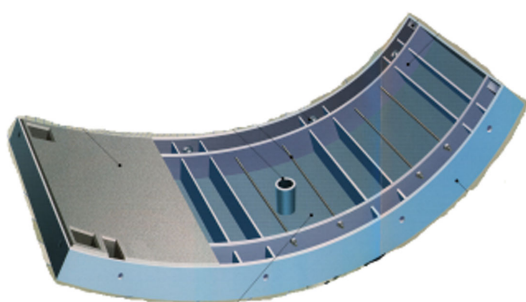
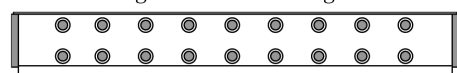


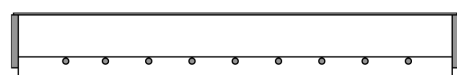
図1 CPセグメント概略図
Outline of CP segment



(a) 4主桁CPセグメント
CP segment with 4 main girders



(b) 重荷重部用合成構造CPセグメント
Composite CP segment for heavy loading



(c) 軽荷重部用合成構造CPセグメント
Composite CP segment for light loading

図2 CPセグメントラインアップ断面図
Cross section of CP segment (three types)

能であり、大きな内水圧が作用するトンネルに適している。

重荷重部用の合成構造CPセグメントは、縦リブに主鉄筋を貫通させることで、中詰コンクリートと鋼殻の一体化を図ると同時に多量の鉄筋を配置することを可能とし、極めて大きい曲げモーメントに対して合理的に抵抗する。従って大深度軟弱地盤や非円形トンネルなどに適している。

軽荷重部用の合成構造CPセグメントは、適切に縦リブを配置することで、中詰コンクリートと鋼殻の一体化を図り、簡素な構造で比較的大きな曲げモーメントに対して合理的に抵抗できる経済性に優れたセグメントである。4主桁CPセグメントと重荷重部用合成構造CPセグメントとの中間領域のトンネルに適している。

表1にそれぞれのタイプの設計法及び適応するトンネル条件を示す。

3. 合成構造CPセグメント(重荷重部用)の開発

3.1 構造の特徴

重荷重部用の合成構造CPセグメント(図3参照)は軸力と曲げモーメントが共に極めて大きいトンネル用のセグメントであり以下の特徴を有する。

- (1) 鋼殻内に鉄筋とコンクリートを配置し、縦リブに開口を設け鉄筋を挿通することで鉄筋コンクリートと鋼殻とを一体化
- (2) M字形に折り曲げた斜め引張鉄筋によりせん断耐力を向上

3.2 セグメント本体の構造特性と設計法

合成構造CPセグメントの構造特性を調査し設計法を構築するために、曲げ試験及びジャッキ推力試験を実施した。

3.2.1 曲げ試験

(1)目的

鋼殻と中詰めコンクリートが合成構造化し曲げ荷重に抵抗するかどうかを調査する。

(2)試験概要

試験概略図を図4に示す。載荷点間隔600mmの等曲げ試験を実施した。コンクリート内面を下側にした船形の試験体を用い、比較のため同一終局耐力条件で設計したRCセグメントの試験体も用いた。載荷は、ひび割れ荷重、許容荷重、降伏荷重の順に各荷重まで一度載荷した後に除荷、再載荷を繰り返し、最後に試験装置の可能な範囲まで載荷した。

(3)試験結果

図5に荷重と載荷中央部の鉛直変位との関係を示す。RCセグメントでは終局耐力到達後コンクリートの圧壊に伴って耐力が急激に低下したが、合成構造CPセグメントにおいては、終局耐力後も高い変形性能を示している。図6に載荷中央部の鋼材の桁高方向に渡る

表1 各CPセグメントの特徴
Characteristics of each CP

Type	Design method	Suitable tunnel condition		
		Depth	Ground classification	Inner water pressure
CP segment with 4 main girders	Steel structure	—	Soft	Large
Composite CP segment for heavy loading	Composite structure	Deep	Soft	—
Composite CP segment for light loading	Composite structure	Deep	Hard	Middle
		Shallow	Soft	Small

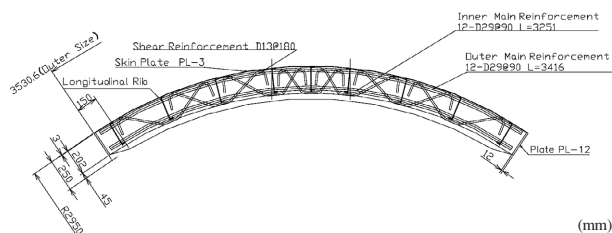


図3 合成構造CPセグメント(重荷重部用)
CP segment for heavy loading

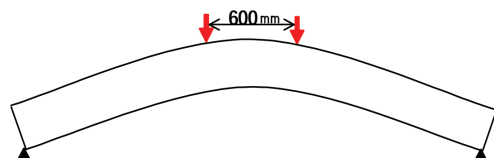


図 4 曲げ試験概略図
Outline of bending test

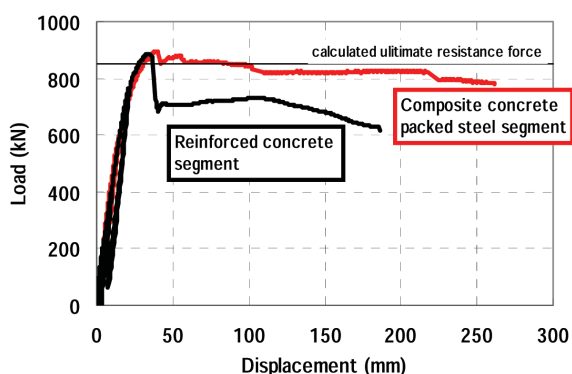


図5 変位-荷重関係
Displacement-load relationship

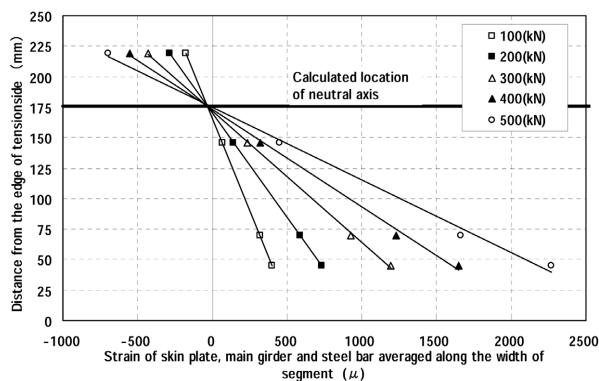


図6 鋼材ひずみ分布
Strain distribution along the height of segment

軸方向ひずみ分布を示す。平面保持が成立し、鋼殻と中詰めコンクリートとが一体となって挙動していることが分かる。このことから本セグメントは合成構造として設計できるものと考えられる。

3.2.2 ジャッキ推力試験

(1)目的

従来に無い薄壁構造セグメントのジャッキ推力に対する抵抗メカニズムを調査する。

(2) 試験概要

試験概略図を図7に示す。上下両サイドの主桁に同じサイズのスプレッダーを配置することでセグメント内部の抵抗面積の広がりを

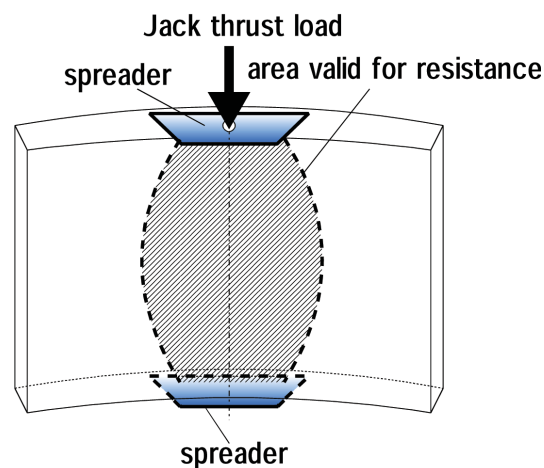


図7 ジャッキ推力試験概略図
Outline of jack thrust test

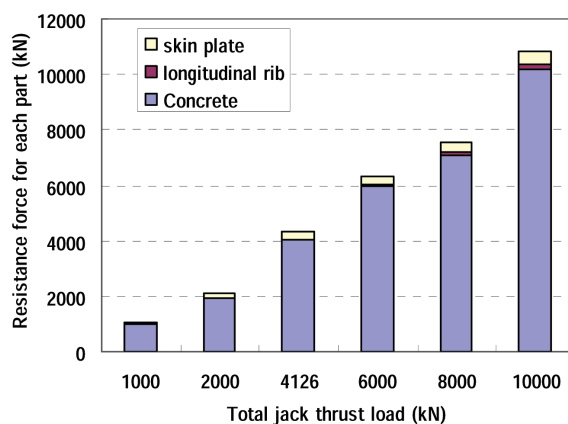


図8 ジャッキ推力荷重分担
Resistance force for each part against total jack thrust load

抑え、純粋にジャッキ一本分の抵抗力を調べた。セグメント図心より10mm内縁側に偏心した位置にジャッキ推力の重心を配置し、載荷は許容荷重到達後一旦除荷しコンクリート・スキンプレート表面の外観検査を行い、その後試験続行が可能な範囲まで継続した。

(3) 試験結果

コンクリートのみでジャッキ推力を受け持つと仮定した許容荷重(4 126kN)を上回る10 000kN程度まで載荷したが、セグメントが破壊することなく、特に許容荷重に至るまでは、コンクリート表面のクラックやスキンプレートの座屈等の発生は認められなかった。図8に各部材の荷重分担を示しているが、全荷重に対してコンクリートがほぼ90%以上負担していることが分かり、コンクリートのみでジャッキ推力を負担するものとして設計しても問題ないものと考えられる。

3.3 セグメント継手の構造特性と設計法

合成構造CPセグメントのセグメント継手は、補強継手金物を介したボルト締結構造となっている。ここでは、セグメント継手の曲げ剛性としての回転ばね定数及び継手部の耐荷性能を調査するため、継手曲げ試験を実施した。

3.3.1 継手曲げ試験概要

試験状況を写真1に示す。セグメント2ピースを定盤上で両端可動支持し、セグメント継手が純曲げ区間となるように設定した載荷点間隔1200mmの曲げ試験を実施した。載荷は、ボルトの引張降伏



写真 1 継手曲げ試験載荷時写真
Bending test for joint

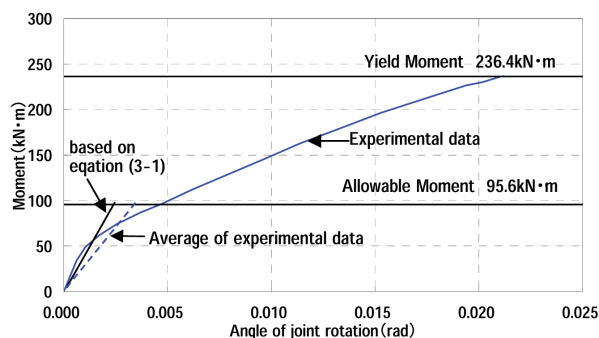


図9 モーメントー継手回転角関係
Relationship between moment and angle of joint rotation

荷重より算出した降伏抵抗荷重まで载荷した。なお、セグメント継手ボルトへの導入軸力は許容軸力の80%とした。

3.3.2 試験結果

図9に載荷荷重より算出した継手部曲げモーメントと継手部回転角の関係を示す。図中の曲線が試験値、破直線は許容曲げモーメントレベルまでの試験値の平均回転ばね定数、直線は“内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き”(財)先端建設技術センター)記載の式(1)に基づく継手ばね定数算定値である。

$$k_{\theta} = \frac{k_{\theta}^* \cdot EI}{r} = \frac{2.1 \times 51\,563}{2.575} = 42\,000 \text{ kN} \cdot \text{m/rad} \quad (1)$$

 k_{θ}^* : 無次元化した回転ばね定数

EI : セグメント単体の曲げ剛性

r : セグメントリングの図心半径

試験値に基づく許容曲げモーメントレベルまでの平均回転ばね定数と式(1)に基づく回転ばね定数はほぼ一致しており、セグメントを梁、セグメント継手を回転ばねとして考える梁-ばねモデルによる設計においては、式(1)により算出した回転ばね定数を用いることが可能であると考えられる。また、ボルトの降伏荷重まで載荷しても剛性の低下は見られず、別途計測したボルト軸力も線形に増加しており、合成構造CPセグメントのセグメント継手部が十分な耐荷性能を保有していることを確認した。

4. 合成構造CPセグメント(軽荷重部用)の開発

4.1 構造の特徴

軽荷重用の合成構造CPセグメントは、周方向曲げ／軸力比が重荷重用に比較して小さいトンネル用のセグメントであり下記の特徴を有する。

(1) 比較的大きい軸圧縮力を考慮して、5面鋼殻の中に必要最小限

の縦リブおよび主鉄筋を配置した簡素な構造

(2) 土水圧に対して、曲面板であるスキンプレートと縦リブの荷重分散効果により、RC部と鋼殻部とが一体となった合成構造として挙動

4.2 セグメント本体の構造特性と設計法

実際の地盤中において土水圧などの分布荷重が作用した場合のセグメント本体の構造特性を調査し設計法を確認するため、面圧載荷による曲げ試験を実施した。

4.2.1 面圧載荷曲げ試験概要

図10に示すように実物大のセグメント試験体のスパン中央部に設置した水圧バッグ(幅1200mm×長さ650mm)を介して面圧をかけた。載荷は、最大荷重確認後、試験装置の対応可能な撓みまで行った。

4.2.2 試驗結果

(1) 曲げ耐力

最大曲げ耐力の実験値および計算値を表2に示す。また、試験体中央部の鋼材のひずみから求めた曲率とモーメントとの関係および曲げ耐力および曲げ剛性のRC計算値および鋼構造計算値を図11に示す。なお、RC計算、鋼構造(S)計算のいずれにおいても、スキンプレーットの有効幅を全幅とする場合とスキンプレーット厚さの25倍とする場合の2ケースを計算した。曲げ耐力の実験値は $196\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、RC計算によるスキンプレーット全幅有効とした終局曲げ耐力計算値 $200.0\text{kN}\cdot\text{m}$ に概ね一致し、鋼構造計算によるスキンプレーット全幅有効とした全塑性曲げ耐力 $144.6\text{kN}\cdot\text{m}$ の1.36倍であった。

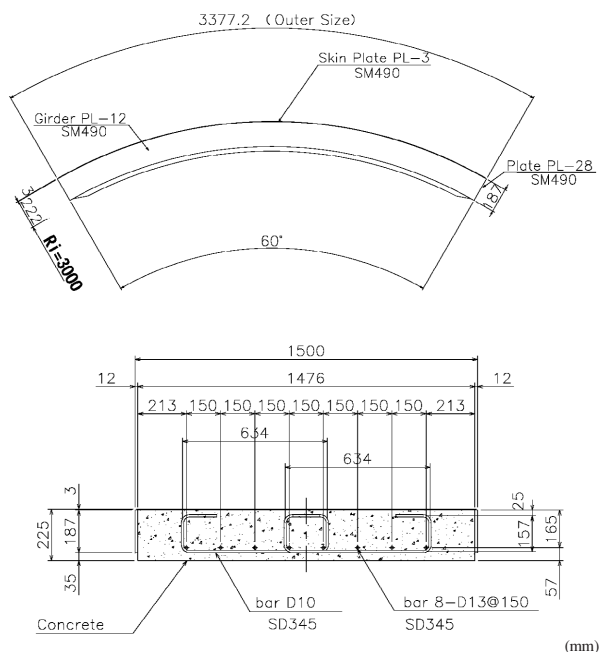


図10 合成構造CPセグメント(軽荷重部用)試験体
Specimen of composite CP segment for light loading

表2 最大曲げ耐力の実験値および計算値
Calculated and measured maximum moment

	Effective width of skin plate	Calculated		Measured
		RC	S	
Maximum Moment (kN·m)	All	200 (0.98)	144.6 (1.36)	196.2
	25 times at each girder	182.2 (1.08)	87.0 (2.25)	

* Values of inside brackets are measured moment - calculated moment ratio.

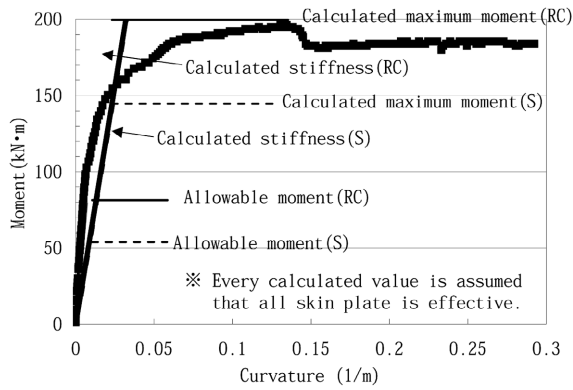


図11 モーメントー曲率関係
Relationship between moment and curvature

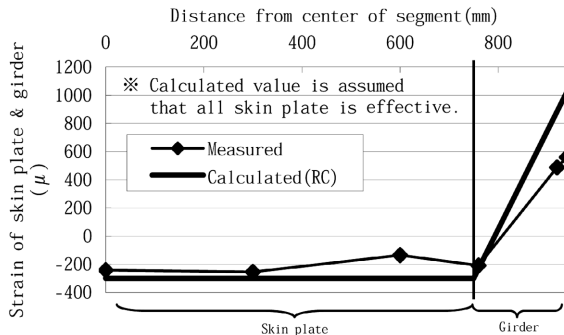


図12 スキンプレートのひずみ分布(79.2kN・m時)
Strain distribution of skin plate and girder (at 79.2kN・m)

(2)変形特性

曲げ剛性の実験値は、スキンプレート全幅有効としたRC計算値と概ね一致した(図11参照)。また、最大耐力を発揮した後も高い変形性能を示した。

(3)スキンプレートおよび主桁のひずみ分布

スキンプレートおよび主桁の周方向ひずみのセグメント幅方向の分布を図12(79.2kN・m時：RC設計の許容荷重レベル)に示す。スキンプレートのひずみは全幅にはほぼ一様に分布していること、スキンプレート全幅有効としたRC計算値とほぼ一致していることが確認できた。

4.2.3 まとめ

軽荷重部用の合成構造CPセグメントは高い変形性能を有するとともに、終局曲げ耐力・剛性はスキンプレートを全幅有効としてRC設計できるものと考えられる。

5. 工事例

5.1 大阪府寝屋川流域下水道中央(一)増補幹線(第2工区)

重荷重部用合成構造CPセグメントの工事例として、2007年8月到達予定である大阪府寝屋川流域下水道中央(一)増補幹線(第2工区)(施工：大林組、熊谷組、青木あすなろ建設、福田組、大鉄工業共同企業体)について紹介する(写真2、3、4参照)。本シールドトンネルは表3に示すように比較的深い深度の軟弱地盤に敷設されるもので、通過地盤性状より全土圧荷重にてセグメント設計を実施している。当該荷重条件下において、重荷重部用合成構造CPセグメントはRCセグメントに対してセグメント桁高を60～70%に縮減することが可能であり、総工事費の観点から本CPセグメントの採用が経済的且つ合理的であると判断された。表4にセグメント仕様を示

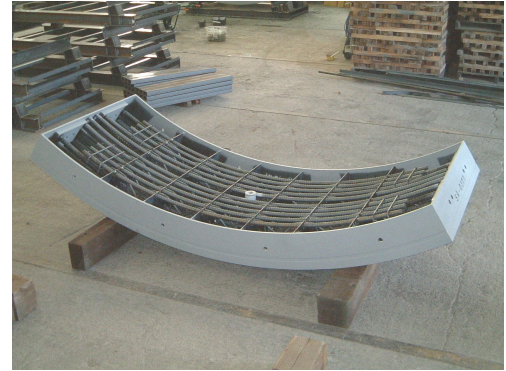


写真2 重荷重部用合成構造CPセグメント鋼殻写真
Composite CP segment without concrete

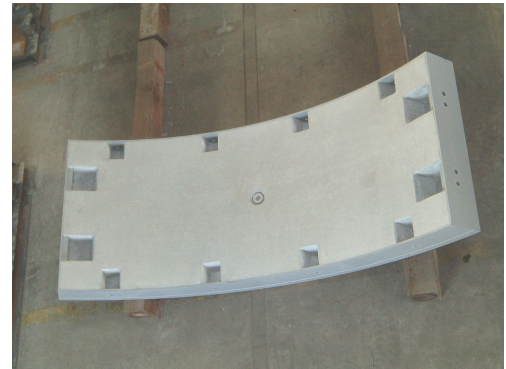


写真3 重荷重部用合成構造CPセグメント製品写真
Product of composite CP segment



写真4 中央(一)増補幹線(第2工区)坑内写真
Shield tunnel constructed with CP segments

表3 中央(一)増補幹線(第2工区)地盤条件
Ground condition of shield tunnel

Tunnel outside diameter (m)	5.4
Length (m)	2 250
Depth (m)	25-30
Ground property	Soft clay
Representative SPT-N value	5

表4 重荷重部用合成構造CPセグメント仕様
Specifications of composite CP segment for heavy loading

Segment height (mm)	250
Segment width (mm)	1 200
Main girder thickness (mm)	16
Skin plate thickness (mm)	3
Steel bar positioned inside	D29×10
Steel bar positioned outside	D29×10

す。

2007年5月現在、施工時におけるジャッキ推力、或いは組み立て時の衝撃などに起因する中詰コンクリート部の有害なひび割れ、欠け及び漏水は、セグメントが鋼殻に覆われているために全く発生していない。また、組立性も良好であり、10リング／昼夜(=12m/日)程度のスピードで順調に掘進中である。

6. おわりに

交通インフラストラクチャの地下化等、都市の再生を目的とした地下利用を考えたとき、今後求められる地下空間は、より深く、大規模なものとなり、覆工を構成するセグメントには、高い断面性能

のみならず、長期耐久性、高い止水性等、益々高度化、多様化する性能が求められると思われる。本報告で紹介した合成構造CPセグメントはこのようなニーズに応え、大深度地下空間利用の推進に大きく貢献できるものと考えている。今後も、変化し続ける需要家のニーズに対し、各方面の協力を得ながら、改善、改良開発を進めてゆく所存である。

謝 辞

合成構造CPセグメントの開発にあたり、早稲田大学創造理工学部社会環境工学科の小泉淳教授には、構造、設計法の確立に多大なご教示をいただきました。深く感謝いたします。