大深度,高水圧下における複数のシールド トンネルを用いた地中拡幅工法の開発

三木 章生¹・粥川 幸司²・新原 圭祐³・ 榎原 彩野⁴・杉本 光隆⁵

- ¹正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20) E-mail:miki.akio@ad-hzm.co.jp
- ²正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20) E-mail:kayukawa.koji@ad-hzm.co.jp
- ³正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20) E-mail:shimbara.keisuke@ad-hzm.co.jp
 - ⁴株式会社安藤・間 土木事業本部技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20) E-mail:ehara.ayano@ad-hzm.co.jp

5正会員 長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡1603-1) E-mail: sugimo@vos.nagaokaut.ac.jp

シールド工法において、大深度化、大断面化、長距離化が進むとともに、道路トンネルの分岐合流部を 中心に、シールドトンネルを地中で切り拡げて構築する事例が増えつつある。そのトンネル構造も柱と躯 体で接続する構造からシールドトンネルどうしをセグメントで接続する楕円形の無柱構造が登場した。一 方、さらなる大深度、高水圧下にてより大きな空間を構築するニーズも高まっており、これらを対象とし たシールドトンネルの地中拡幅工法の開発が必要となり、本報では、これに対する開発経過について述べ る.

Key Words : shield tunneling method, underground enlargement, composite segment, presupport by shield tunnels, dynamic load model on shield

1. はじめに

シールド工法において、大深度化、大断面化、長距離 化が進み、道路トンネルにおいては、出入口やジャンク ションなどの分合流部を非開削により構築した事例が増 えてきている.

非開削で分合流部を構築した事例¹は、アーチ状の鋼 製セグメント(拡幅セグメント)で2本のシールドトンネ ルを接合することで、分岐合流部の大断面を無柱構造で 構築する工法である.また、覆工では鋼殻を主体とする ことにより、高い止水性と耐久性の確保、プレキャスト 化により狭隘空間での施工性向上と工期の短縮を図って いる(図-1).なお、工事位置の地盤特性から、都市部 山岳工法にて2本のシールドトンネル間の地山を掘削し 切拡げを行った.

これに対して, さらなる大断面化や帯水地盤, 高水圧

下での構築を目指し、事例をもとにした新しい地中拡幅 工法を開発し、その成立性について試験や解析により実 証した、本報ではこれらの開発経緯について述べる.



図-1 覆工構造(アーチ鋼殻)1)

2. 大断面,高水圧下における地中拡幅の課題

開発に際して,透水性の高い砂層や礫層などの土砂地 盤において非開削でシールドトンネルの切拡げを行うこ とを想定した.また,与条件として2本のシールドトン ネルは、大断面のシールドトンネルと,それよりひとま わり小さいシールドトンネルとし,完成時の断面は幅 30m程度,大深度,高水圧下の帯水地盤を対象とした.

これらの条件から、切拡げ時の止水性や地山の安定性 を確保できる工法であること.さらに、大深度、大断面 による大きな荷重、断面力に対応した覆工構造であるこ とが課題として挙げられた.

そこで、1章で説明した事例¹⁰の工法を基本にこれらの 課題に対応した施工法、覆工構造を開発することとした.

3. 新しい工法の概要

開発した工法の全体概要図を図-2 に示す.帯水地盤 におけるシールドトンネル間の地山掘削時には、シール ドトンネルから発進し、アーチ状に配置した小口径シー ルドとその間に造成する凍土により、拡幅部空間の地山 を先受けし、止水性を確保する.また、大きな荷重に対 する耐力が求められる覆工には、高耐力を有する特殊合 成セグメント³を採用した(図-3).

これらは、本工法の成立性を立証するために重要な要素であるが、期待される性能や施工の確実性に対して未 解明な部分もあることから、「特殊合成セグメントの構造性能」、「先受け工に用いる鉄筋コンクリートで補強した小口径シールドの曲げ特性および耐力」、「小口径シールドの三次元急曲線施工」これらの3項目について



図-2 地中拡幅工法の全体概要図

試験や解析により実証することとした.

(1) 覆工構造の概要

特殊合成セグメントは六面を鋼殻で覆い,その内部に は高流動コンクリートを充填してスタッドジベルで一体 化したもので,従来と比ベスキンプレートに最大30mm 程度の厚肉鋼板を用い,さらにフランジ(最大200mm× 100mm)を追加することで,高耐力化と薄肉化を図り, 変形の抑制とともに地中拡幅断面をコンパクトにできる.

また,六面が鋼製部材に覆われているため,コンクリートのひび割れによる漏水等がなく,長期的な耐久性, 止水性を確保できることが特徴である.

(2) 先受け工の概要(図-4)

2本のシールドトンネル内から複数の小口径シールド (外径 φ 2m級を想定)を拡幅部の上下にアーチ状に施工し 配置する.小口径シールドは2本のシールドトンネルか ら坑内発進させることで、大規模な地中発進基地が不要 となり、出水リスクの低減と工程短縮を図ることができ る.なお、坑内からの発進は斜め発進(発進角度30~ 50°)と急曲線施工(最小曲線半径10m)を行うことで、施 工範囲を最小限に抑えられ、用地に制約がある場合でも 柔軟に対応することができる.

また、この小口径シールド内を鉄筋コンクリートで補 強することにより、先受け構造としての剛性および耐力 を高めることで、切拡げ時の地中変状や地表面沈下を低 減できる. さらに、小口径シールド内には凍結管を埋込 み、数十cm間隔に配置した小口径シールド間の地盤を 凍結することで止水性を確保する.



図-4 先受け工概要

(3) 施工手順

小口径シールドの施工から地中切拡げを行う全体の施工手順を図-5に示す.





② 小口径シールド補強 (鉄筋コンクリート)



③ 凍結工 (ルーフ間および褄部)



④ 下半掘削~拡幅セグメント組立



⑤ 上半掘削~拡幅セグメント組立



⑥ インバート構築



 ⑦ 中間地山掘削,仮設部材撤去 (仮設セグメントなど)



⑧ 道路床版, 耐火, 内装工

図-5 施工手順図

まず、特殊合成セグメントの耐力、および構造計算に 用いる設計用定数を確認するため、単体曲げ試験、継手 曲げ試験,継手せん断試験を実施した.

(1) 単体曲げ試験³⁾

a) 試験概要

図-6に単体曲げ試験の概要を示す.載荷方法は二点単 純曲げ載荷である. 図-7,表-1,2に試験体の主断面構 造,材料物性値および使用鋼材を示す.

b) 理論計算

試験荷重は鋼コンクリート合成構造とし, RC理論に より引張縁側の鋼材に生じる応力度から算定した. なお, 終局荷重は圧縮側のコンクリートを等価応力ブロックと して評価し、また、鋼材すべての部材が降伏に達した際 の合力の釣合いにより設定した.



表−1 材料物性値						
材料	ヤング 係数 (kN/mm²)	設計基準 強度 (N/m ²)	降伏点 (N/mm²)	許容 応力度 (N/mm ²)		
コンクリート	29.6	48.5	-	19		
鋼材	201	_	316	155		

立[[十十	++65	幅/高さ	板厚		
日 NN J	竹貝	(mm)	(mm)		
スキンプレート	SN400B	970	22		
側板	SN400B	556	32		
フランジ	TMCP325C*	100	50		
		Nº/ (1)			

[※] SN490 同等品

c) 試験結果

荷重~たわみ曲線を図-8に示す. 理論上の降伏応力度 発生荷重6 150kNを上回る約6 500kNを越えるあたりから, 鋼材の降伏によるたわみの増加が見られた。また、降伏 後においても荷重~たわみ曲線は一定の勾配を維持し続 け、理論終局荷重8 240kNに達したことから、曲げ耐力 は理論終局荷重以上であることを確認できた.

次に、断面内ひずみ分布を図-9に示す.理論上の降伏 応力度発生荷重6 150kNを超える約6 500kNレベルまで、 断面内のひずみ分布は直線的であり、平面保持の仮定が 成り立っていると言え、鋼材とコンクリートが一体で挙 動していることを確認できた.

終局時の状態を写真-1に示す、終局時において、スキ ンプレートや側板の破断等による脆性的な破壊は確認さ れず、鋼材の延性が十分活かされた構造であることを確 認した.





写真-1 終局時の状態(単体曲げ試験)

(2) 継手曲げ試験

a) 試験概要

図-10に試験の概要図を示す.載荷方法は継手部を支 点間中央に配置した二点単純曲げ載荷である.

継手の回転ばね定数は、一般に継手面に作用している 軸力場によって異なる.そこで、このような状況を表現 するために、試験体に平行してPC鋼棒を設置し、これを 緊張して継手面に軸力を作用させることとした.セグメ ント継手の構造図を図-11に、材料物性値を表-3に示す.

本試験により、セグメント継手の回転ばね定数k_{θ} (曲げモーメントM~継手回転角 θ 曲線 **図-12**),およ び耐力を確認する.



表─3 材料物性值							
材料	ヤング 係数 (kN/mm²)	設計基準 強度 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm²)	許容 応力度 (N/mm ²)			
コンクリート	42	51	-	19			
鋼材(SM570-H)	210	-	450	270			
ボルトM39 (10.9)	210	-	940	380			

L LINEAU DA LE

		理診症	試験値(kN・m/rad)			
	軸力 (kN)	地面 (kN・m/rad)	第一 勾配	第二 勾配	第三 勾配	
		離間後	離間前	離間後	降伏以降	
ᇁ	0		637	309	71	
正 曲 げ	2500	449	2887	275	-	
	4250		3289	318	-	
占	0		1866	306	-	
見曲ば	2500	452	2925	277	-	
()	4250		4312	341	-	

表-4 継手回転ばね定数の比較

b) 理論計算

回転ばね定数の理論値は、村上-小泉の方法⁴により 算出した.また、試験荷重はRC理論にもとづき引張縁 側のボルトに生じる応力度により決定した.

c) 試験結果

導入軸力と回転ばね定数に関する理論値と試験値を表 -4に、各軸力場における曲げモーメントと回転角の関係 を図-13に示す.各軸力場において、試験値は理論値に 近い値を示しており、ボルトの複数配置による継手板の てこ反力を考慮できる村上-小泉の方法⁴で、回転ばね 定数を適切に評価できることを確認した.

一方,軸力場での回転ばね定数(正曲げ)の関係を図-14 に示すが,第一勾配は軸力場と比例関係にあると言える. これに対して第二勾配は,導入軸力やボルトの締付けに よる軸力が解放された継手板離間の後であるので,軸力 場に依らないことがわかる.





図-14 継手回転ばね定数~軸力場の関係

破壊まで載荷した導入軸力 0 kNにおける正曲げでの 各事象における曲げモーメントの理論値と計測値の比較 を表-5に示す.また,最大荷重時の試験状況を写真-2に 示す.ボルト降伏時では,試験結果が理論値よりも若干 小さかったものの,ボルトの引張破壊で終局となり,こ の際の最大曲げモーメントは理論値よりも試験結果の方 が17%程度大きい結果となり,十分な耐力を有すること を確認した.

表-5 各事象における曲げモーメントの比較

	理論値	試験値			
止田	曲げモーメント	曲げモーメント	曲げ荷重		
い守	$(kN \cdot m)$	$(kN \cdot m)$	(kN)		
許容	717	595	421		
降伏	1774	1734	1560		
最大	1962	2293	2119		



写真-2 継手曲げ試験の状況(継手曲げ試験)

(3) 継手せん断試験

a) 試験概要

図-15に試験の概要図を示す.継手せん断試験は,試験体3体を連結し,両端部のセグメント(添接(左),添接(右))を固定し,中央のセグメントを押し抜く方式で載荷した.

継手のせん断ばね定数は、一般に継手面に作用してい るセグメントの軸力場によって異なる.そこで、このよ うな状況を表現するために、試験体に平行してPC鋼棒を 設置し、これを緊張して継手面に軸力を作用させること とした.

なお,試験体はリングボルトのみとしたTYPE-A, せん断耐力を向上させるためにボルトに加えせん断キーを 配置したTYPE-B(図-16)の2種類とした.また,材料物 性値を表-6に示す.

本試験により、リング継手のせん断ばね定数k。(せん 断力Q~隣接するリングの相対変位量δ曲線 図-17),な らびに耐力を確認する.

b) 理論計算

せん断ばね定数の理論値は、継手に軸力が導入されて いる場合、文献⁹より、トンネル縦断方向の剛性を評価 した両端固定梁にモデル化し、そのたわみ量 δ よりせん 断ばね定数を算出する.また、継手に軸力が導入されて いない場合、リング間継手の構造より、図-18に示した ボルトナット部を固定端とした片持ち梁の方法によって 求まるたわみ量 δ よりせん断ばね定数を算出した.



衣→0 材料物性胆					
	ヤング	設計基準	降伏点		
材料	係数	強度			
	(kN/mm²)	(N/mm²)	(N/mm ²)		
コンクリート	42	51	-		
鋼材(SM570-H)	210	-	450		
ボルト M42 (10. 9)	210	_	940		

b) 試験結果

継手せん断ばね定数の理論値(第一勾配:鉄道設計標 準,第二勾配:ボルト片持ち梁の方法)と試験結果を表 -7に示す.また,荷重~ずれ曲線を図-19に示す.せん 断キーのない TYPE-A では,試験値はボルト片持ち梁の 方法とオーダーが一致することがわかった.しかしなが ら,継手面の摩擦の状態や後述する破壊状況より,ボル トやせん断キーによる側板ボルト孔の支圧変形によって, 結果が左右されたものと思われる.したがって,せん断 ばね定数の第二勾配については,ボルト片持ち梁の方法 と値が類似しているので,この手法でばね値を設定する のが妥当であると考えられた.

一方,軸力場での継手せん断ばね定数の第二勾配の関係を図-20に示したが,導入軸力やボルトの締付けによる継手面の摩擦が切れた後の挙動と考えられるので,軸力に依らないと言える.

せん断耐力について試験結果を表-8 に示す. 理論値 としてボルトならびにせん断キーのせん断降伏応力度に 相当する荷重を耐力として算出したが, TYPE-A, B と もに試験値を上回る結果となった. 写真-3 に試験状況 を示す. いずれの試験もボルトの曲げせん断破壊, なら びにせん断キーもせん断により破壊した.



図-18 片持ち梁の方法

表-7 継手せん断げわ定数の比較

		理調	論値	試験値		
	軸力	(kN•	m/rad)	(kN•1	m/rad)	
タイプ	(kN)	第一	第二	第一	第二	
		勾配	勾配	勾配	勾配	
	0	-	80	-	114	
TYPE-A	4000	13000	80	3671	96	
	0	-	80	-	463	
TYPE-B	4000	13000	80	7240	525	

表-8 せん断耐力の比較					
タイプ	軸力	理論値	試験値		
	(kN)	(kN)	(kN)		
TYPE-A	0	1216	1602		
TYPE-B	0	4166	4497		





写真-3 継手せん断試験の状況(継手せん断試験)

5. 先受け工に用いる鉄筋コンクリートで補強し た小口径シールドの曲げ特性および耐力の実証

(1) 先受け工の曲げ剛性実証の目的

切拡げ掘削時の先受けは、土水圧等の荷重に対する耐力を確保し、かつ、地山の緩みに繋がる変形を抑制することにあり、耐力とともに曲げ剛性の確保が必要となる、そこで、 ϕ 2m級の小口径シールドトンネル内部を鉄筋コンクリートで補強した構造(図-21)とすることとした、次に、先受け工が曲げ剛性km(曲げモーメントM~たわみる曲線(図-22))を有するとともに、RC理論解析により曲げ変形挙動を表現できることを確認する目的で ϕ 12mの縮小モデルによる曲げ載荷試験を実施することとした.

(2) 試験概要

図-23 に試験概要を示す.先受け工の曲げ載荷は,二 点単純曲げ載荷で実施した.

(3) 理論計算

本構造は、トンネル縦断方向の曲げに対して、鋼製セ グメント本体と内部の鉄筋コンクリートが一体となって 抵抗する部分(以下セグメント断面と称す)と、リング 継手面でリング継手を構成するリング継手ボルトと内部 の鉄筋コンクリートで抵抗する部分(以下リング継手断 面と称す)が直列に連なった状態で抵抗するものと考え られる.

鉄筋コンクリート部材が曲げを受けた際には,一般に 引張側のコンクリートは無視することとなる.また,リ ング継手面では引張側でリング継手面が離間することで



セグメントのスキンプレートや縦リブ,継手板のトンネ ル縦断方向の応力伝達はなくなる.このため,先受け工 のトンネル縦断方向の曲げ剛性の算出においては,コン クリートのひび割れ発生以降,セグメント断面ならびに リング継手断面で,曲げによる中立軸を境として,圧縮 側,引張側で図-24に示す部材を有効と考えることとし た(以下RC断面と称す).

なお、試験体は標準タイプの縦リブ、ボルトピッチで 構成されるTYPE-Aと、これに対して2倍の縦リブ、ボル トを配置したTYPE-Bの2種類とした.

(4) 試験結果

曲げ載荷試験結果一覧を表-9 に示す. なお,表中の 理論値は、リング継手断面の曲げ剛性の方がセグメント 断面のそれよりも小さく、曲げ挙動はリング継手断面の 剛性で支配されると考えられるので、リング継手断面の 理論値を記載した.

試験値より,鉄筋降伏時,ボルト降伏時の曲げモーメントは,いずれも RC 断面の理論値よりも大きい結果であり,設計においても RC 理論で部材の照査行うことで 十分な安全性を確保できることを確認できた.



図-24 各断面で有効な部材

表-9	各事象における曲げモー	・メ	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	トの比較
-----	-------------	----	----------------------------	------

タイプ	事象	理論値 (LN・m)	試験値 (LN・m)
	鉄筋降伏	1720	3414
TYPE	ボルト降伏	2142	3699
-A	最大モーメント	-	5236
	鉄筋降伏	2399	4748
TYPE	ボルト降伏	3829	5293
-В	最大モーメント	_	8144

破壊状況を**写真-4** に示す.最大曲げモーメントは, TYPE-Aで5236kN·m, TYPE-Bで8144kN·mであった. 破壊は TYPE-A, TYPE-B ともに等曲げ区間内のリング 継手断面で発生し,目開き発生,コンクリートひび割れ, 鉄筋降伏の後,ボルトの破断またはナットの抜け出し, 主桁の変形により終局に至った.

TYPE-A と TYPE-B の比較では、いずれの事象発生時 も TYPE-B の方が曲げモーメントが 1.1~1.6 倍程度大き く、縦リブ、リング継手ボルト数を 2 倍とした曲げ剛性 の向上の効果が認められた.

曲げモーメント~たわみ曲線を図-25 に示す. TYPE-A, TYPE-B ともに、コンクリートのひび割れ発生前ま では全断面有効の理論値の勾配(曲げ剛性)であると言 える.一方,ひび割れ発生後から鉄筋降伏時の曲げモー メント(表-9より,TYPE-Aで3414kN·m,TYPE-Bで4 748kN·m)レベルまでは、いずれも RC 断面の理論値の 勾配にほぼ平行であり、曲げ剛性を評価する上で、理論 値としてリング継手断面における RC 断面が適切である ことがわかった.図-26 に示す断面内ひずみ分布より、 鉄筋の降伏応力度発生曲げモーメントまでは、引張側鉄 筋より圧縮側でひずみがほぼ直線的であり、平面保持の 法則が成り立っていると言え、鋼製セグメントと鉄筋コ ンクリートが一体となって挙動していると言える.









(b) 等曲げ区間の状況
 (c) リング継手断面の状況
 写真-4 先受け工曲げ載荷試験の状況



6. 小口径シールドの三次元急曲線施工の実証⁶

(1) 小口径シールドの三次元曲線施工の実証の目的

小口径シールドを用いた先受け工の施工に関し、 ¢ 2m級のシールドでは、通常の平面的な急曲線で曲線半 径10m程度の実績は多数あるものの、縦断方向や斜め方 向といった三次元的な急曲線の実績はこれまでにほとん どない. そのため、このような急曲線施工の実現性の可 否を、中折れ量や余掘りなどの掘進条件を表現可能な 「シールド機動力学モデル⁷⁾」を用いて確認することと した.

(2) 小口径シールド方向制御の実証の流れ

小口径シールド方向制御の実証の流れを図-27に示す. 小口径シールドの線形を試設計した後、シールドの中折



図-28 小口径シールド発進部の線形概要図

CASE	発進角	角度	断面内	角度	曲線 半径	選定理由	
1	上向き	30°	左向き	10°	10m	S字曲線	
2	上向き	30°	上向き	0°	10m	真上向き	
3	上向き	40°	左向き	10°	10m		
4	上向き	50°	右向き	10°	10m		
5	上向き	50°	左向き	40°	10m		
6	上向き	50°	左向き	45°	10m	急勾配発進	
7	上向き	40°	右向き	50°	10m	最大斜め発進	
8	上向き	30°	左向き	5°	10m		
9	上向き	30°	左向き	30°	10m		
10	下向き	30°	右向き	5°	10m	S字曲線	
11	下向き	30°	左向き	30°	10m		
12	下向き	40°	左向き	40°	10m		
13	下向き	50°	右向き	45°	10m	急勾配発進	
14	下向き	30°	右向き	10°	10m		
15	下向き	30°	下向き	10°	10m	S字曲線	

表-10 解析ケースの選定

れ角度,コピーカッターストローク(余堀量),推力, 旋回モーメント(推力とジャッキパターンの積)を設定 し、シールド機動力学モデルによる解析を行う.解析に よりシールドの軌跡を算出し、計画線形とのずれ量を算 出する.そのずれ量が目標とする蛇行余裕量(±100mm 程度)以内に収まるようシールドを選定することで、方 向制御が可能であることを確認するものである.

(3) 解析ケースの選定

15本の小口径シールドの発進部の幾何学条件(図-28)を整理し(表-10), 真上向きに発進するCASE2, 勾配が最も急なCASE6, S字曲線となるCASE 10を解析の対象とした. なお,小口径シールドの曲線半径は全て10mである.

(4) 解析結果とシールド方向制御の確認

曲線半径10mの区間では、セグメント幅300mmで片番 4リング程度を掘進することを想定し、シールドの方向 制御を片番の掘進量1.2m毎に行うものとして、基線から ずれ量で整理した. その結果を図-29に示す.

解析の結果,いずれのトンネルも必要中折れ量13.6度, 必要余掘り量最大110mmにて,全ての場合で想定の蛇 行量(ずれ量±100mm)以内で曲線を通過でき,シール ドの方向制御が可能であることを確認できた.



7. 構造安定に関する実証

(1) 構造安定性の実証の目的

本工法における覆工は、トンネル間の地山掘削、仮設 セグメントの撤去、拡幅セグメントの設置など、施工中 に構造系の大きな変化が生じる.さらに、施工時荷重と して凍結膨張圧や先受け工からの支点反力が覆工に作用 することから、完成時だけではなく、施工時の構造安定 性についても確保する必要がある.これらを実証するこ とを目的として、構造系や荷重系の変化による施工履歴 を考慮できるはり-ばねモデルを用いた逐次解析を行う.

(2) はりーばねモデルを用いた逐次解析

a) 解析モデル

解析モデルは、セグメントの分割数やその分割位置、 セグメント継手の回転剛性、リング継手による添接効果 を忠実に反映できるはりーばねモデルを用いた. 覆工、 先行切梁、内部支保工をはり要素、インバートコンクリ ートを平面ひずみ要素、地盤をばねとしてモデル化した (図-30, 31).

b) セグメント継手, リング継手のばね定数

図-32にセグメント継手の回転ばねの設定について示 す. セグメント継手の回転ばね定数は,試験結果により 継手が離間する前と離間した後を評価したバイリニアの 関係として設定する. この際,第一勾配は継手が全断面 圧縮状態のとき,すなわち,継手は離間前の状態で回転 ばね定数を無限大とする. 第二勾配は継手が離間した状 態であり,村上-小泉の方法⁴により算出する.

図-33にリング継手のせん断ばね定数について示す. リング継手のせん断ばね定数は,試験結果により第一勾 配をセグメント本体の剛性を評価したばね定数とし,せ ん断力 S が継手面の摩擦力 S1 に達した際,ボルト孔の 遊び分だけ移動する.第三勾配はボルトの曲げ変形を評 価したばね定数を用いトリリニアの関係として設定する.

c) 施エステップ

施工ステップの状況を表-11に示す.構造系,荷重系の変化について以下のとおりとした.

- ・施工時荷重:凍結膨張圧,先受け構造の支点反力を 考慮.
- ・地山掘削 : 地盤を模擬した地盤ばね要素を撤去, ばね反力の解放.
- ・部材撤去 : 部材の保有していた応力を解放力として 再配分.



【 凡 例 】 <u>
上半拡幅セグメント</u>

衣−12 応力度照置結果						
項目	単位	方	甸工時	完成時		
最大正曲げ	kN∙m	OTED	2084			
軸力	kN	SIEP	2980		_	
応力度比/	判定	3	0.38/OK			
最大負曲げ	kN∙m	CTED	-2 282	OTED	-3 893	
軸力	kN	SIEP 7832 SIEP	16 2 39			
応力度比/	判定	4	0.45/OK	0	0.83/OK	
せん断力	kN	STEP	2 6 6 1	STEP	4 467	
応力度比/	判定	4	0.40/OK	6	0.67/OK	
		構造	E 図			
1200 35 1130 35 ・コンクリート(f _d =51N/mm ²) ・鋼材(SM570-H) スキンプレート: 30mm 側板 : 35mm フランジ : 200mm×100mm						

d) 検討結果

表-12に一例としてシールドトンネルの応力度照査結 果を示す.これらの解析結果より,仮設構造および本設 構造の各種部材を必要に応じて補強することで,施工時, 完成時における構造の安定性を確認した.

8. おわりに

さらなる大深度,高水圧下にて大断面空間を構築する 新しい地中拡幅工法について,本報では、そのトンネル 施工法を含む工法概要,工法を構成する要素技術である 特殊合成セグメントの開発,先受け工の構造実験とその 施工シミュレーション,ならびに施工中,完成時のトン ネル構造の安定性について述べた.

これらの成果を用いて、地中拡幅によって構築される トンネル構造について、複雑な施工過程を考慮した設計 を行い、現状技術で十分実現可能であることを示した. 今後,より大深度,大断面の空間構築のさまざまなニ ーズに対応して,個別要素技術や工法全体の高度化,具 体化を図っていく予定である.

謝辞

本開発に御指導ならびに御協力を頂いた関係者の皆様 に、この場を借りて厚く御礼申し上げます.

参考文献

- 1) 永井政伸,鳥越貴之,田原徹也,小倉靖之,清水真人:セ グメントもと用いた非開削切開き工法による道路トンネル 分岐・合流部の設計・施工,トンネル工学報告集第24巻,Ⅱ -11,2014.
- 三木章生,新原圭祐, 粥川幸司:高耐力特殊セグメントの 開発(構造概要と製作性),土木学会第71回年次学術講演会 第6部門, pp.175-176, 2015.
- 新原圭祐,三木章生, 粥川幸司:高耐力特殊セグメントの 開発(単体曲げ載荷試験),土木学会第71回年次学術講演会 第6部門, pp.177-178, 2015.
- 村上博智、小泉淳:シールド工事用セグメントのセグメント ト継手の挙動について、土木学会論文集第296号、1980
- 5) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 シ ールドトンネル, pp.160, 2002.
- 6) 新井祐太, SOUMPHOLPHAKDY VANNAXAY, 桑原正也, 杉本光隆,三木章生, 粥川幸司, 才川欽也:数値解析に よる地中拡幅部の先受け工に関する小口径シールド実現可 能性の検証,土木学会第71回年次学術講演会第6部門, pp. 1717-1718, 2016.
- 杉本光隆, Aphichat SRAMOON:施工実績に基づくシールド 機動力学モデルの開発, 土木学会論文集No.673/III-54, pp.163-182, 2001.

(2016.8.5受付)

DEVELOPMENT OF UNDERGROUND ENLARGEMENT METHOD USING MULTIPLE SHIELD TUNNELS AT GREAT DEPTH AND UNDER HIGH WATER PRESSER

Akio MIKI, Koji KAYUKAWA, Keisuke SHIMBARA, Ayano EHARA and Mitsutaka SUGIMOTO

Recently, in a shield tunneling method, remarkable progresses are traceable in the number of tunnels that are growing larger in diameter, going deeper, and becoming longer. And also, the number of tunnels using underground enlargement method such as branch and confluence section of road tunnels, are increasing.

Now, tunnels are constructed by an elliptic columnless structure whitch two shield tunnels are connected with segments, not a structure connected with column and reinforced concreate.

Due to the growing needs of constructing large cross section spaces at great depth and under high water pressure, it is necessary to develop a new countermeasure in the shield tunneling method of underground enlargement works. In this paper, we describe the developments of this technology.