

大深度地下空間構築建材の開発

Materials Development for Construction of Tunnels and Underground Openings at Great Depth

鱈田 実⁽¹⁾ 田崎 和之⁽²⁾ 石田 宗弘⁽²⁾ 佐野 陽一⁽³⁾
 Minoru INADA Kazuyuki TAZAKI Munehiro ISHIDA Youichi SANO
 今福 健一郎⁽⁴⁾
 Kenichirou IMAFUKU

抄 録

大深度地下空間利用技術の開発は、国土の狭い日本の土地の有効活用や過密化が進む都市インフラストラクチャの整備を効率的に進めていく上で重要なキーテクノロジーの一つとなっている。大深度地下空間に大規模な構造物を無駄無く安全に構築していくには、高強度で高機能な建材が必要となる。新日本製鐵は、鉄の特性を活かした高品質で高性能な建材商品の開発を通じ、地下構造物建設のトータルコスト削減及び大深度地下空間の利用促進を目指している。その一例として、鋼製地中壁構築部材(NS-BOX)、一次覆工方式鋼製セグメント(CPセグメント)、高機能RCセグメント用継手部材(高剛性継手)の技術開発について紹介した。

Abstract

The development of technologies in making use of deep underground spaces is significant as key technologies when utilizing effectively Japan's limited spaces available or when providing infrastructures in overpopulated urban area. To construct large scale underground structures at large depth safely and effectively, high-quality construction materials with high-strength are indispensable. Nippon Steel Corporation aims to develop high quality steel products to reduce overall construction costs of deep underground structures and subsequently to promote the effective use of deep underground spaces. For the purposes mentioned above, we hereinafter introduce some examples of new technologies developed; such as steel diaphragm wall (NS-BOX), primary lining system of steel segment (Concrete Packed Steel Segment) and joint member for high functional reinforced concrete segment (High Stiffness Joint for Segments).

1. はじめに

規制緩和による経済構造改革、土地の取引活性化と有効利用、魅力ある事業環境の実現にむけて、“21世紀を切り開く緊急経済対策”が1997年11月に政府決定された。そこで、都市部における地下利用の促進が大きな政策課題と位置づけられている。また、“経済構造の変革と創造のための行動計画”でも今後成長が期待される15分野のうち“都市部環境整備関連分野”において、大深度地下空間開発技術の開発の必要性が示されている。更に、政府部内でも、“臨時大深度地下利用調査会”において大深度地下の定義、技術、安全、環境面での課題、法制面での調査審議が行われ、1998年5月には大深度利用に関する最終答申が出されたところである。

新日本製鐵の建材営業部門においても、このような情勢のもと、地下空間の建材開発に関する全体システム概念を作り、その中で、立坑、地下室等の面的な開発対象と、トンネル等の線的なものに

整理した。それに基づいて、新たな鉄の利用技術拡大を目指し、広く鉄の知見を導入した建材開発を進めている。

面的な地下構築建材としては、狭隘な用地での立坑、大深度空間壁の構築に適用可能なNS-BOXをメインに開発を進めている。一方、線的な構造物としては、シールドトンネル覆工を中心に取り組んでいる。この中で、大深度対応、内水圧対応、円形以外の断面形状対応等、種々のニーズに適応した鉄系のセグメントの研究、開発を進めてきた。さらに、鉄系覆工だけに係わらず、RCセグメントに用いる高剛性継手金物の商品化開発も実施してきた。今後、道路トンネル等で、より大規模な大断面空間構築工法の研究開発が進められており、それらに向けた開発も一層推進していく体制を整えているところである。

本報はこれらのうち、NS-BOX、CP鋼製セグメント、高剛性継手の三つの商品について技術開発の内容を紹介する。

⁽¹⁾ 建材開発技術部 グループリーダー
 東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-7764

⁽²⁾ 建材開発技術部 マネジャー

⁽³⁾ 建材開発技術部

⁽⁴⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 研究員

2. 鋼製地中連続壁(鋼製連壁)工法

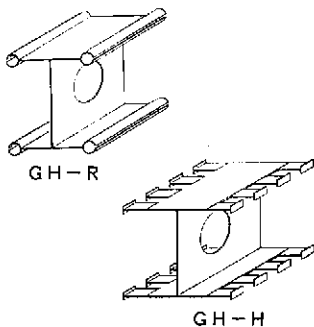
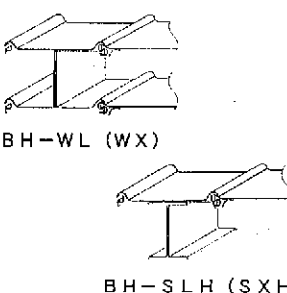
2.1 製品概要

鋼製の土留め壁は鋼矢板、鋼管矢板などが従来からあるが、都市部の大深度土留め壁では深さ30m~100mが要求され、この需要に対応できる鋼製部材はなかった。また、深さ30m以下の土留め壁でも薄壁化要求により、鋼矢板形状で、剛性、耐力のある製品が求められる傾向がある。新日本製鐵では前者の大深度需要に対応できるNS-BOX(GH)を、中低深度土留め壁用に鋼矢板上廻り剛性をもつNS-BOX(BH)を開発した。GHとBHの概要および深度別土留め壁の種類を表1、図1、写真1~3に示す。このNS-BOXシリーズは薄壁化、現場省スペース化が可能でプレファブ施工できることが特長である。特にGHタイプではコンクリートを充填するため(図2参照)、仮設兼用本体地下壁として利用できること

製品, 工法	鋼矢板	鋼管矢板	NS-BOX BH	NS-BOX GH	混合攪拌 処理工法	コンクリート 連壁
都市部需要	○	△	◎	◎	◎	◎
港湾河川需要	◎	◎	◎	△	△	△
適用 深度	10m					
	20m					
	30m					
	40m					
	50m					
	60m					
	70m~100m					

図1 深度別土留め壁の型式

表1 NS-BOX(GH)、(BH)の概要

製品名	NS-BOX (GH)	NS-BOX (BH)
構造		
特徴	○薄壁化 ○現場省スペース ○省力化、短工期	○高剛性 ○薄壁化 ○現場省スペース
用途	①地下鉄 ②地下道路 ③立坑 ④下水処理場 ⑤地下駐車場	①護岸 ②土留め壁 ③立坑等 [鋼矢板の高剛性仕様]
施工法	安定液掘削工法 [コンクリート連壁と同様]	・打撃工法 ・柱列壁工法 ・圧入工法 ・TRD工法

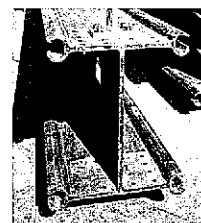


写真1 NS-BOX (GH-R)

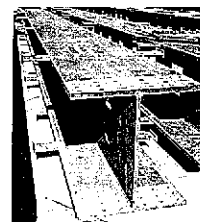
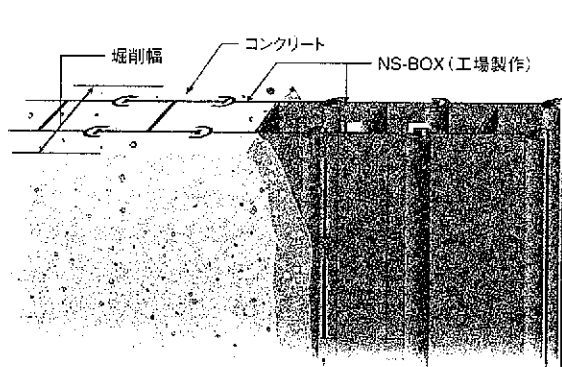


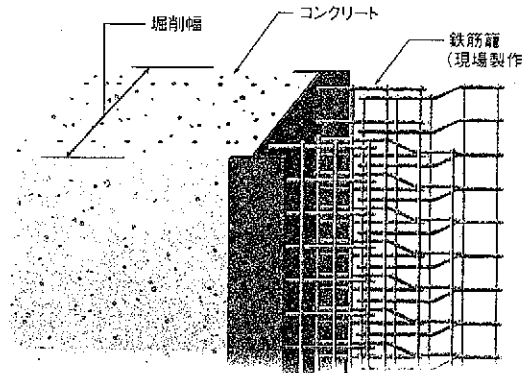
写真2 NS-BOX (GH-H)



写真3 NS-BOX (BH-WL)



鋼製地中連続壁



従来工法(コンクリート地中連続壁)

図2 地中連続壁イメージ図

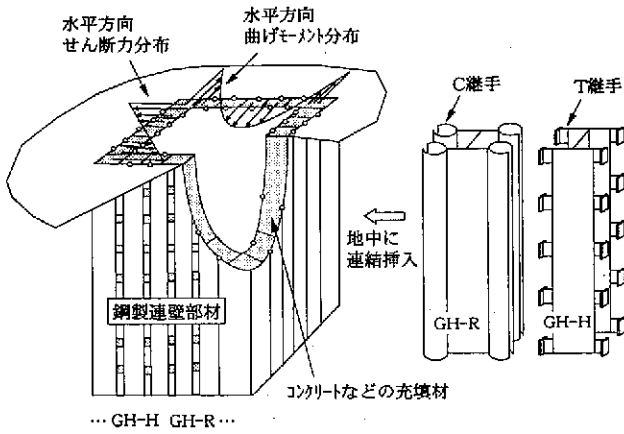


図3 矩形立坑のイメージ図

が従来の鋼製土留め壁と異なる。本報では矩形立坑で要求されるGHタイプの水平方向の曲げモーメント、せん断力(図3参照)に対する二方向版構造を開発した。

2.2 二方向版構造開発

2.2.1 嵌合継手引張性能の解明

鋼製連壁の嵌合継手は、パイプ状のC継手とT字状のT継手とが充填コンクリートを介して連結している。従って、水平方向に対して嵌合継手に応力を伝達させることで、鋼材とコンクリートとの合成構造部材と考えることができる。そこで、嵌合継手部の引張特性を解明するために図4に示す実大引張試験を実施した。継手諸元のパラメータを、C継手パイプ厚(t_p)、T継手先端幅(b)、嵌合状態、C継手材料強度(f_y)、充填材強度(f_c)とし、荷重、嵌合継手間の相対変位、鋼材ひずみを測定した。

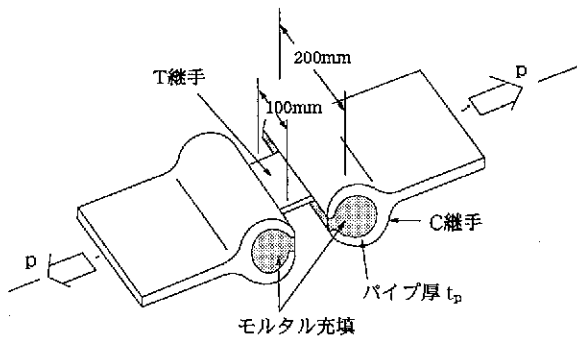


図4 嵌合継手引張試験

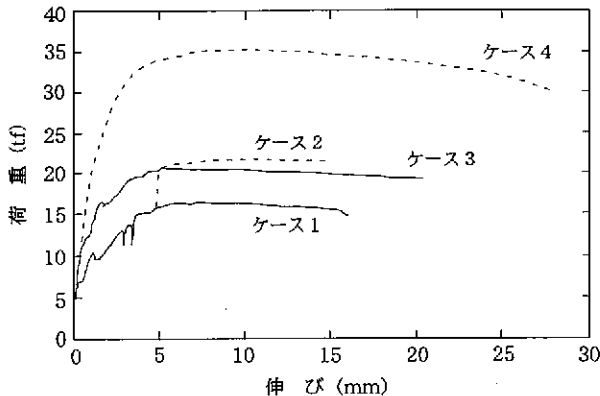


図5 荷重-変位曲線

図5に荷重-変位曲線を、表2に試験供試体諸元及び試験結果を、図6に嵌合継手の破壊状況を示す。荷重の増加に伴い充填材にひびわれ破壊面が形成され、充填材を介して引張力と曲げモーメントが作用することでC継手パイプ部が塑性化し、T継手がC継手から抜け出す形で終局状態を迎えた。従って、嵌合継手の引張耐力(P_u)は t_p の2乗および f_y に比例するとし、継手引張試験結果を基に回帰計算することで継手耐力性能を定めた。表3に嵌合継手設計耐力を示す。嵌合継手の許容引張耐力は回帰算定値の1/3とし、六角鋼補強継手は施工時の嵌合状態のばらつきによって引張耐力が増減するため10%割引いた値を設計値とした。

2.2.2 水平方向部材曲げ性能の解明と曲げ設計法の確立

嵌合継手を有する鋼製連壁水平方向部材の面外曲げ耐荷性能について検討を行うために、純曲げ区間に嵌合継手を有する梁部材の4点曲げ試験を行い、荷重、変位、鋼材およびコンクリートのひずみを計測した。図7に供試体概要図、図8にコンクリートの主応力図を示す。嵌合継手部のコンクリートの主応力状態は、供試体圧縮縁部においてコンクリート応力ブロックが形成されており、RC(鉄筋コンクリート)構造的な応力状態が観測された。図9に嵌合継手軸

表2 代表的な試験供試体諸元および試験結果

試験体	パイプ厚 (mm)	C継手強度 (N/mm ²)	T継手先端幅 (mm)	モルタル圧縮強度 (N/mm ²)	嵌合状態	引張耐力 (kN)
ケース1	12	403	58	25	中立	161
ケース2	16	406	58	32	中立	213
ケース3	12	403	68	32	中立	201
ケース4	16	406	68	32	中立	343

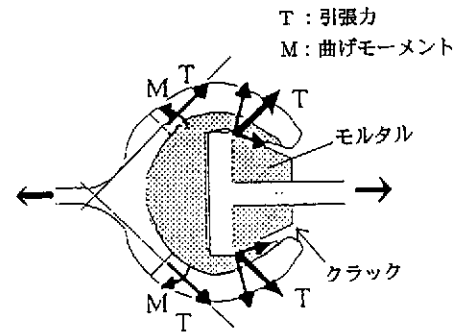


図6 嵌合継手の破壊状況図

表3 嵌合継手設計耐力 (kN/1か所)

パイプ厚	規格	許容引張力			
		C継手補強なし		C継手補強有り*	
		T継手A	T継手B	T継手A	T継手B
12	SS400	31.4	44.1	61.8	82.4
	SM490	42.2	59.8	82.4	110
16	SS400	55.9	79.5	109	146
	SM490	74.6	106	132	206
19	SS400	78.5	112	132	206
	SM490	105	149	132	207

*C継手補強はC継手先端部内側に六角鋼を取付けるA,BタイプのT継手を使用

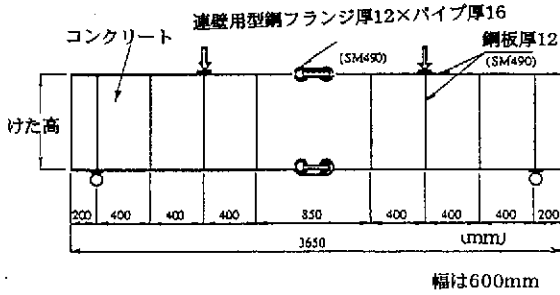


図7 供試体概要図(M-1, M-2)

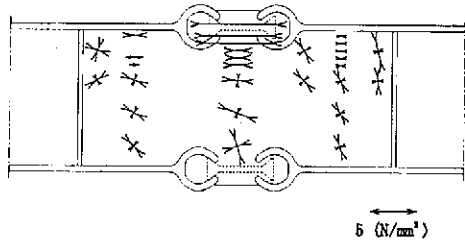


図8 コンクリート主応力図(M-1: P=561kN)

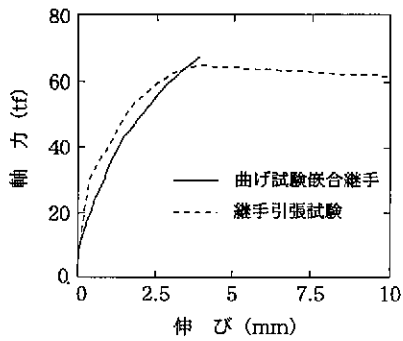


図9 嵌合継手軸力と伸びの関係

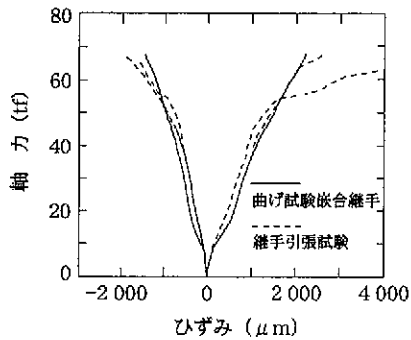


図10 嵌合継手軸力とひずみの関係

力と伸びの関係を、図10に嵌合継手軸力とひずみの関係を示す。引張側嵌合継手部の引張伸び特性およびひずみ関係は、嵌合継手引張試験の結果とよく一致している。図11に荷重—変位曲線、表4に試験結果一覧を示す。試験最大曲げ耐力は、引張側の嵌合継手を、引張耐力をもとに換算した鋼材量に置き換えた単鉄筋RC部材の算定式で安全側に算定できる。ここで、引張側の嵌合継手の換算断面積は以下の式で算定する。

$$A_s = T_a / f_{sa}$$

A_s : 等価引張耐力嵌合継手換算断面積(mm²)

T_a : 嵌合継手許容引張耐力(N)

f_{sa} : C継手許容引張応力度(N/mm²)

図12に曲げモーメントと曲率の関係を示す。水平方向部材の曲げ剛性は、嵌合継手を引張剛性で換算した鋼材量を用いて単鉄筋RC断面として行う。図13に嵌合継手強度と換算板厚の関係を示す。嵌合継手引張試験結果を継手引張強度と換算引張剛性板厚で整理する

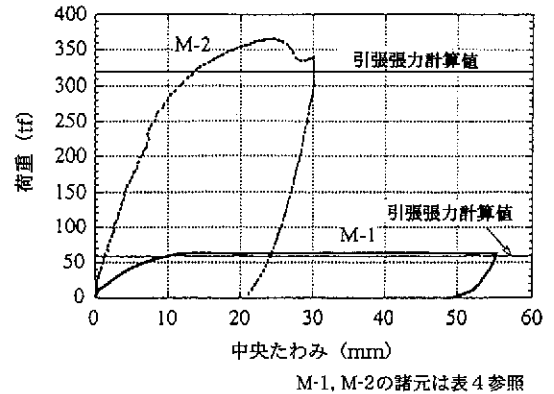


図11 荷重—変位曲線

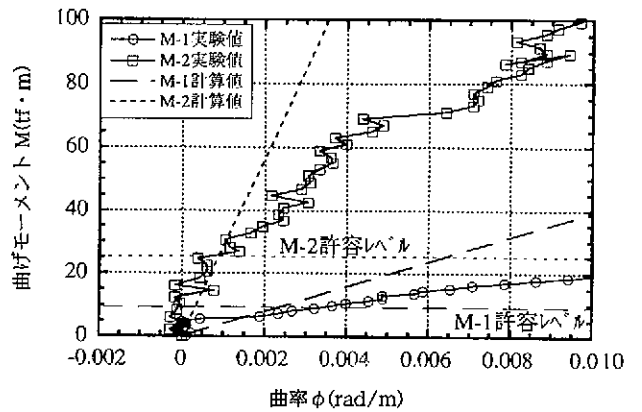


図12 曲げモーメントと曲率の関係

表4 試験結果一覧

試験ケース	フランジ厚 (mm)	けた高 (mm)	継手引張強度 T_{um} (kN/m)	コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm ²)	test Pu*1 (kN)	calPu1*2 (kN)	calPu2*3 (kN)	$\frac{\text{testPu}}{\text{calPu1}}$	$\frac{\text{testPu}}{\text{calPu2}}$
M-1	16	400	1055	21	624	574	633	1.09	0.99
M-2	12	700	3188	28	3600	3139	3345	1.15	1.08

*1testPu: 試験最大荷重, *2calPu1: 引張張力計算値, RC単鉄筋部材として算定, *3calPu2: 引張張力計算値, 鋼構造として算定
M-1の継手は $t_p=16$ (SM490), T継手Aを使用, M-2の継手は $t_p=16$ (SM490), T継手B, 六角鋼補強を使用(表3参照)

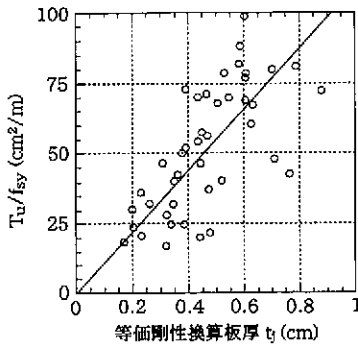


図13 嵌合継手強度と換算板厚との関係

と、それらの間には以下のような関係が回帰的に求められる。

すなわち、

$$T_u/f_{sy} = 1.0385 \times 10^{-1} t_j$$

T_u : 単位長さ当たりの嵌合継手引張強度(N/m)

f_{sy} : C継手の降伏引張応力度(N/mm²)

t_j : 単位長さ当たりの等価引張剛性嵌合継手板厚(mm)

と表される。従って、許容応力度設計における水平方向部材の曲げ剛性は、以下の式を用いて等価鋼材量を求め、RC断面計算によって算定することとする。

$$t_j = T_a / 5.885 \times 10^{-2} f_{sa}$$

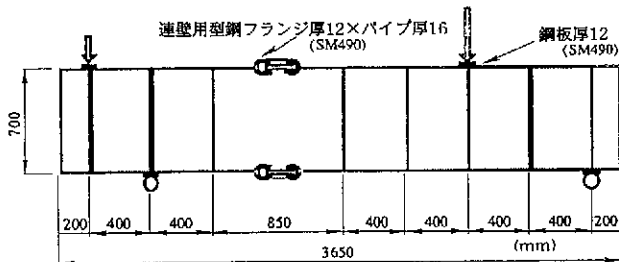
$T_a (=T_u/3)$: 単位長さ当たりの嵌合継手許容引張強度(N/m)

$f_{sa} (=f_{sy}/1.7)$: C継手の許容引張応力度(N/mm²)

2.2.3 水平方向部材せん断性能の解明とせん断設計法の確立

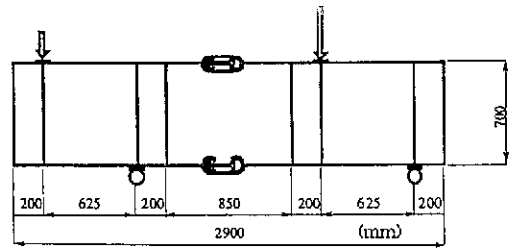
鋼製連壁の水平方向部材のせん断耐荷機構は、嵌合継手を有するフランジおよびウェブからなる鋼殻と、それに囲まれたコンクリートとの鋼コンクリートサンドイッチ合成構造と見なして評価することが考えられる。そこで図14、図15に示すような供試体を用いて水平方向部材の曲げせん断試験を実施し、土木学会“鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)”の本構造に対する適用可否についての検討を行った。

図16に荷重—変位曲線を示す。いずれの供試体もフランジおよびウェブが交差する対角線方向にコンクリートの斜めひび割れが発生し、隅角部フランジの降伏或いはコンクリートの圧壊により終局状態を迎えた。表5に試験結果一覧を示す。試験最大荷重は、上記指針案に基づく算定値を約10~40%上回った。図17にコンクリートの主ひずみ図を、図18に荷重とフランジおよびウェブの軸力との関係を示す。終局直前の中詰めコンクリートの主圧縮ひずみは、対角方向に紡錘状に形成されている。一方、フランジおよびウェブの



幅は600mm, MS-2の継手部は12厚鋼板使用

図14 供試体概要図 (MS-1, MS-2)



幅は600mm, S-2の継手部は12厚鋼板使用

図15 供試体概要図 (S-1, S-2)

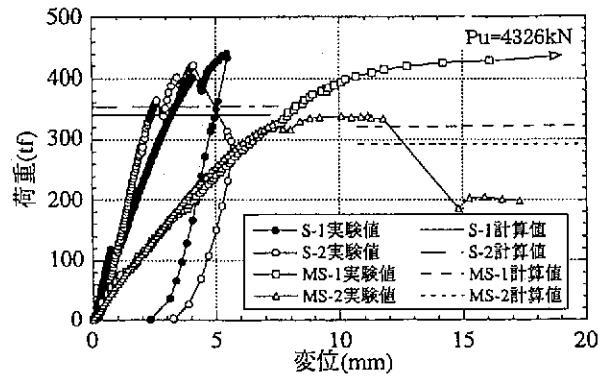


図16 軸直角方向せん断試験体の荷重—変位関係

表5 せん断試験結果

試験ケース	継手仕様	コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm ²)	せん断破壊荷重(kN)		①/②
			実験値①	計算値②	
S-1	1717kN/m	29	4316	3345	1.29
S-2	12mm厚鋼板	31	4130	3463	1.19
MS-1	3188kN/m	25	4326	3159	1.37
MS-2	12mm厚鋼板	21	3316	2865	1.16

S-1の継手は $t_p=16$ (SM490), T継手Bを使用

MS-1の継手は $t_p=16$ (SM490), T継手B, 六角鋼補強を使用

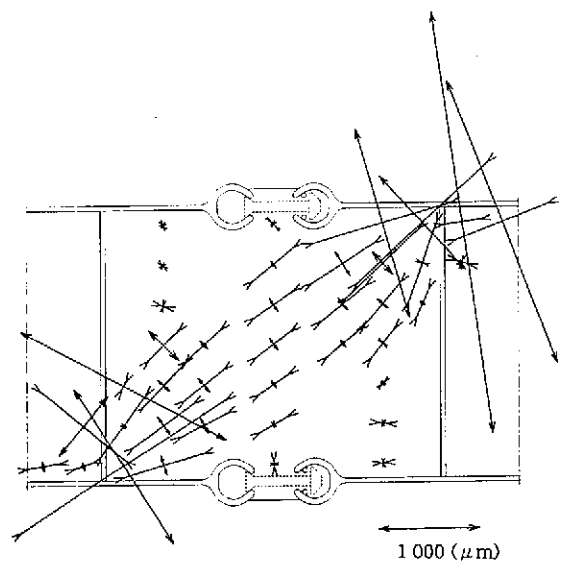


図17 コンクリートの主ひずみ図 (MS-1: P=4326kN)

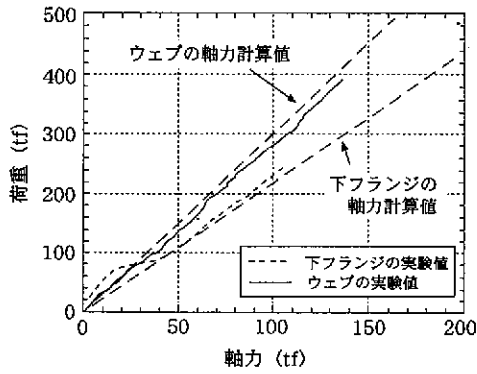


図18 荷重とフランジおよびウェブの軸力との関係

鋼材ひずみより換算した軸力算定値は、トラス機構を仮定する鋼コンクリートサンドイッチ構造の算定値とよく一致している。

以上より、鋼製連壁の水平方向部材のせん断耐荷機構は、上記指針を適用することで説明が可能であり、せん断耐力は本指針の算定式で安全側の評価ができる。また、水平方向鋼製連壁部材のせん断設計では、設計の汎用性を図るために、上記指針をもとに“コンクリート標準示方書”と同等の安全率を有するように、限界状態設計法から許容応力度設計法へと算定式の書き換えを行った。つまり、対角方向のコンクリートの斜めひび割れ破壊強度 ($0.6\sqrt{f'_{cd}}\beta_d\beta_p\beta_s$) をコンクリート標準示方書の τ_{a2} と同等の安全率 (2.61~2.92) を有するようにコンクリートの許容せん断応力度を τ_{aa} として定めた (表6参照)。すなわち、 τ_{aa} は下式のように定義できる。

$$\begin{aligned} \tau_{aa} &= (0.6\sqrt{f'_{cd}}\beta_d\beta_p\beta_s) / 4\sqrt{f'_{cd}} / \tau_{a2} \\ &= 0.15\beta_d\beta_p\beta_s\tau_{a2} \end{aligned}$$

τ_{aa} : コンクリートが斜めひび割れ破壊をする場合の許容せん断応力度(N/mm²)

τ_{a2} : 斜め引張鉄筋を計算する場合の許容せん断応力度の上限値(N/mm²)

表6 コンクリート標準示方書の $4\sqrt{f'_{cd}}$ と τ_{a2} の関係

	(N/mm ²)						
コンクリートの設計基準強度 f_{ck}	18	20	24	26	29	34	39
コンクリートの設計圧力強度 f_{cd}	14	15	18	20	23	26	30
斜め引張鉄筋を計算する場合の許容せん断応力度 τ_{a2}	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
腹部コンクリート斜め圧縮破壊強度 $4\sqrt{f'_{cd}}$	4.6	4.9	5.3	5.7	6.0	6.4	6.9
$\kappa = 4\sqrt{f'_{cd}} / \tau_{a2}$	2.61	2.61	2.72	2.75	2.76	2.86	2.92

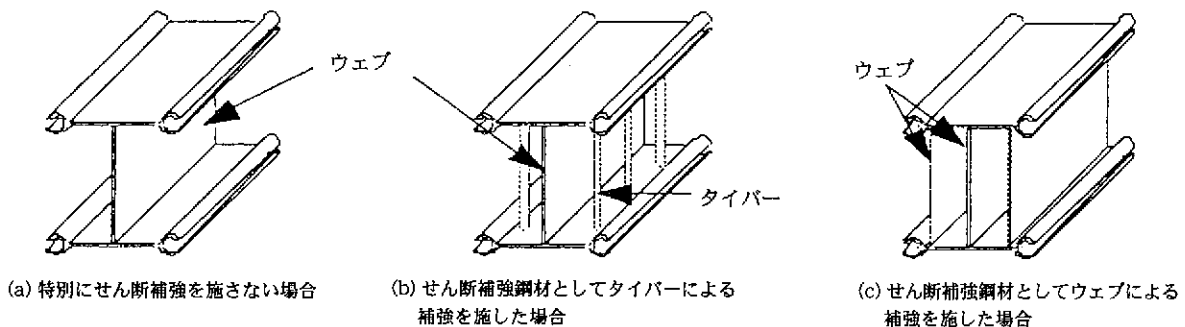


図19 タイバーおよびウェブ補強図

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²)

$\beta_d, \beta_p, \beta_s$: コンクリートのせん断破壊強度を求めるための係数

また、コンクリートのせん断応力度が許容せん断応力度 τ_{aa} を超える場合に備えて、タイバー或いはウェブを設けることでコンクリート耐力の増加を図っている。タイバー或いはウェブを付加する場合は、せん断補強の実大試験結果に準じてコンクリートの許容せん断応力度の割り増しができる。これらによって、特に断面力が卓越する矩形立坑等の隅角部への対応が可能である (図19参照)。

2.3 施工実績と今後の展開

NS-BOX (GH) を使用した鋼製連壁工法は1992年に鋼製地中連続壁協会 (現会員34社) を設立して以来、需要が急増している (図20参照)。主な用途はトンネル発進・到達立坑、地下道路、地下駅であり、本体利用が全体数の75%を占めている。施工深度の実績は15m~92mで40m以深が55%を占めている。主な施工状況を写真4に示す。

今後は公共投資縮減、環境問題にも対応できるように、鋼製連壁の低コスト化、産業廃棄物処理量の軽減を図ると共に用途拡大を目指して改良開発を実施中である。

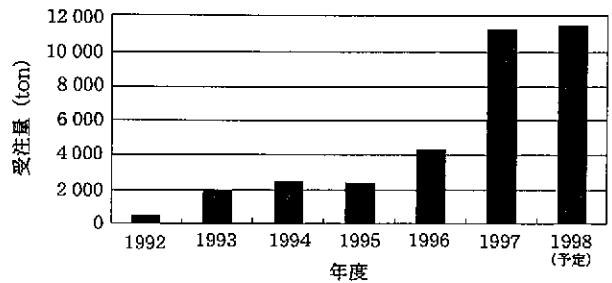
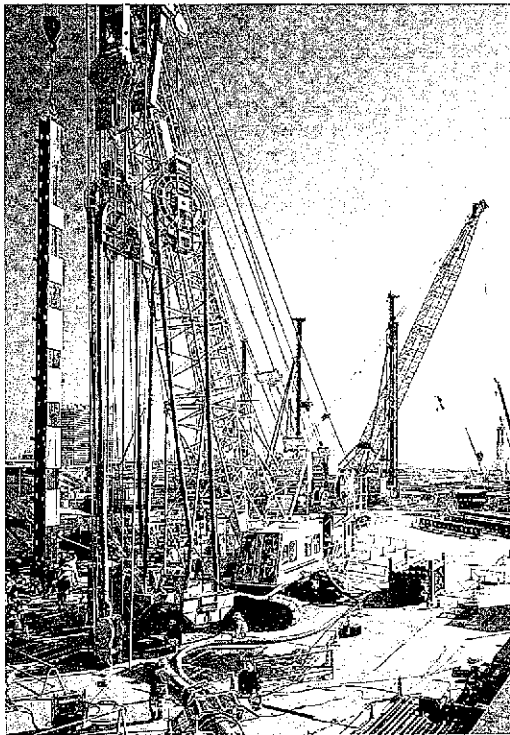


図20 NS-BOX受注量



NS-BOX建込み状況



現場継手ボルト締め

本受け状況

写真4 MM21高島駅(仮称)現場

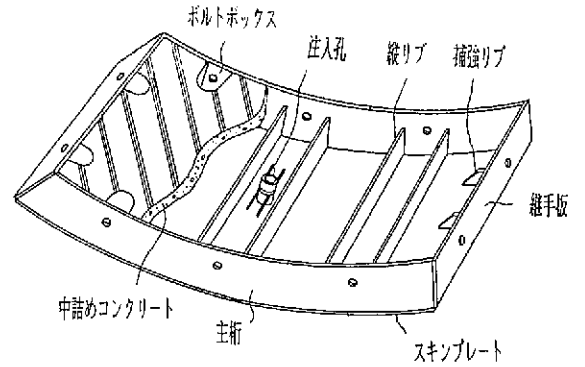


図21 コンクリート中詰め鋼製セグメントイメージ図

3.2 CP鋼製セグメントの狙いとした特長

狙った特長の主なものを次に示す。

- (1) 鋼製セグメントの特長である覆工厚の薄肉化が図れ、トンネル外径の縮小が出来る。
- (2) セグメント本体が鋼殻で覆われているため、本体の完全水密性が確保できる。また施工時のコンクリートの欠け、割れ等の恐れがない。
- (3) 中詰めコンクリートが鋼殻鋼材内部の防食の役割を果たす。
- (4) シールド機のジャッキ推力を中詰めコンクリートに負担させることが出来、鋼製セグメント特有の縦リブを省略でき、鋼材の重量を減らす事が出来る。
- (5) 二次覆工のプレハブ化と見なすことが出来、建設工期の短縮が図れる。

3.3 CP鋼製セグメントの強度特性

コンクリートを中詰めした鋼製セグメント本体の曲げ強度特性を把握するため実施した単体曲げ試験結果を図22に示す。供試体の寸法は外径4,200mm、セグメント幅B=1,200mm、主桁高さh=145mm、主桁厚t=12mm、6分割のA型ピースを用いた。中詰めコンクリートの設計基準強度 $\sigma_{ck}=28\text{kN/cm}^2$ である。

図22のように、鋼殻の中に詰められたコンクリートと鋼殻が一体となった、いわゆる合成構造的な挙動を示している。鋼製セグメン

3. コンクリート中詰め鋼製セグメント(CP鋼製セグメント)

シールドトンネルの二次覆工の役割は、一次覆工を主体とする場合、蛇行修正や防振の他、防食、防水、内装等、長期耐久性に大きく寄与しており、一次覆工(セグメント)を補強する効果も考えられ、特に鋼製セグメントの場合は必須である。近年、覆工の解析技術、精度の向上、荷重の正確な把握、施工精度の向上と相まって、二次覆工の役割を見直す動きが出てきた。セグメントの設計において、これら二次覆工の機能を本体に持たせる仕様することによって、二次覆工省略化、トンネル外径の縮小を図り、結果建設コスト縮減に寄与できるようにしたものがCP鋼製セグメントである。

3.1 CP鋼製セグメントのコンセプト

CP鋼製セグメントは、鋼製セグメントの鋼殻内部に工場であらかじめコンクリートを中詰めしたセグメントである(図21参照)。外観的には内面側がコンクリート面で、残る五面(主桁、継手板、スキン)は鋼板面となる。

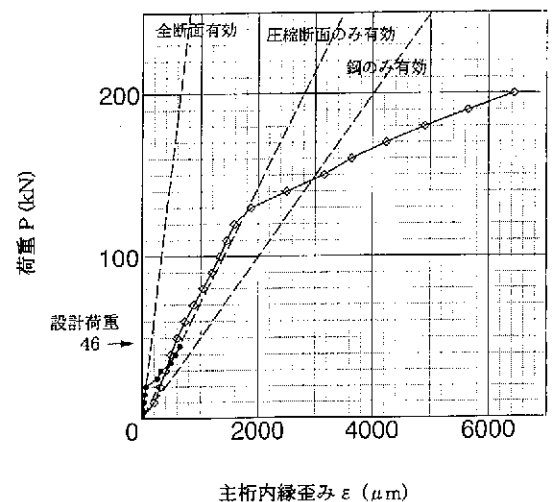


図22 単体曲げ試験結果、荷重一ひずみ関係

トとして設計した場合は、セグメントを補強する効果大であり、また、この合成構造としての性能特性を生かした設計法を確立することにより、より合理的な設計が可能であると言える。

3.4 内水圧対応型C P鋼製セグメント

トンネルに大きな内水圧が作用する場合、また大きな偏荷重が作用する場合等に、継手部に引張力が発生するトンネルに対応した4本主桁タイプのC P鋼製セグメントを開発した。構造イメージを図23、24に示す。構造の特徴として、リング間は継手ボルトを中主桁で固定する長ボルトタイプを基本としている。トンネル軸方向の力の伝達をこのボルトと中主桁間を繋ぐ鉄筋を介して図る構造にしている。一方、セグメント間は、外主桁と中主桁間を角鋼等の剛性の高い部材で結び、それをボルトで繋ぐことによりボルト引張力を継手板を介さずに直接主桁に伝達させる構造としている。これにより、いわゆるてこ反力を発生させない、高剛性の継手性能が得られるようにしている。

3.5 内水圧対応型C P鋼製セグメント強度特性

外径4,500mm、セグメント幅1,200mm、セグメント厚150mm 4本主桁、6分割のセグメントを設計試作して各種構造性能試験を実施、特性を把握した。

3.5.1 単体曲げ試験

主桁 $t=16\text{mm} \times 4$ 本、中詰めコンクリート $\sigma_{ck}=28\text{kN/mm}^2$ である。

強度、剛性とも合成構造的な挙動を示している。(図25、写真5参照)

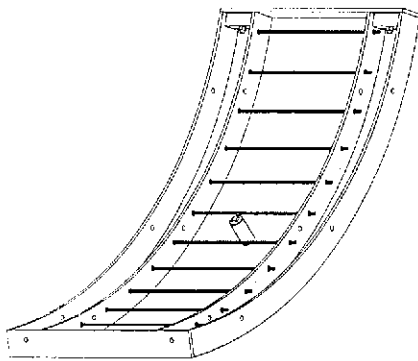


図23 鋼殻イメージ図



図24 製品イメージ図

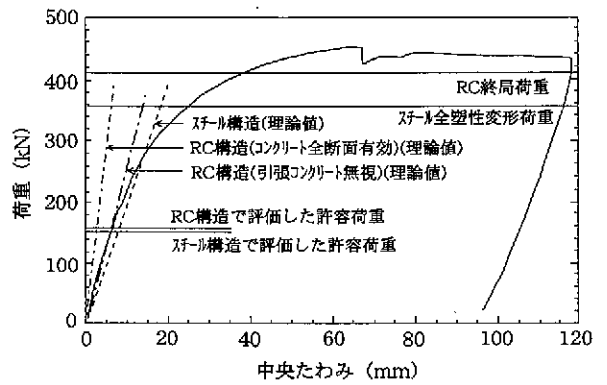


図25 単体曲げ試験、荷重—たわみ関係

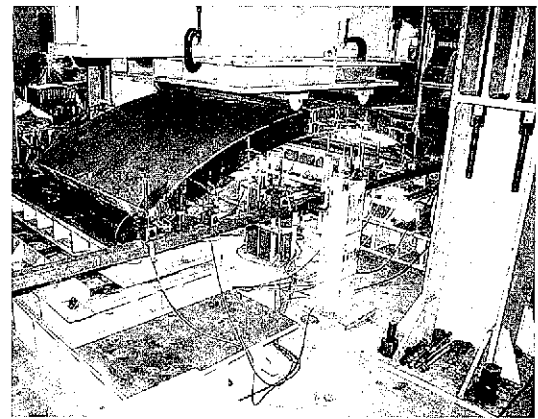


写真5 単体曲げ試験状況

3.5.2 継手曲げ試験

継手部の構造特性を把握するため継手の曲げ試験を実施した。外主桁 $t=12\text{mm} \times 2$ 本、中主桁 $t=25\text{mm} \times 2$ 本、中詰めコンクリート $\sigma_{ck}=30\text{kN/mm}^2$ である。当初想定した高い継手剛性が得られている。継手の剛性を評価する無次元化回転ばね定数の値も6.1と高い値となっている。また継手部の目開き状況もほぼ一様で、てこ反力の影響は認められなかった。(図26、図27、写真6参照)

3.6 内水圧対応型C P鋼製セグメントの長期耐久性確保

C P鋼製セグメントは、前述したように鋼殻の防食機能を中詰めコンクリートに持たせているが、中に水を流す場合などは、いわゆるかぶりの範囲には鋼殻に重防食塗装や特殊皮膜を施すことによ

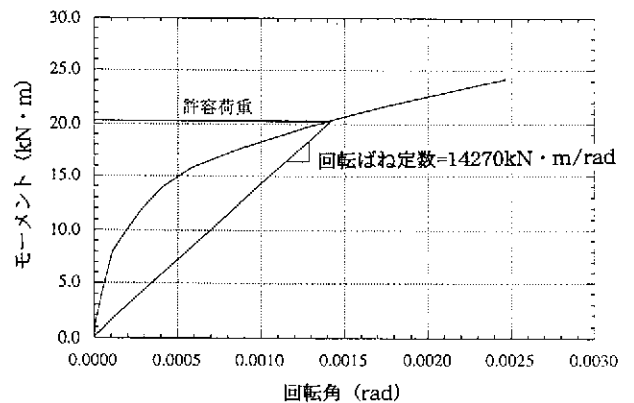


図26 モーメント—回転角関係

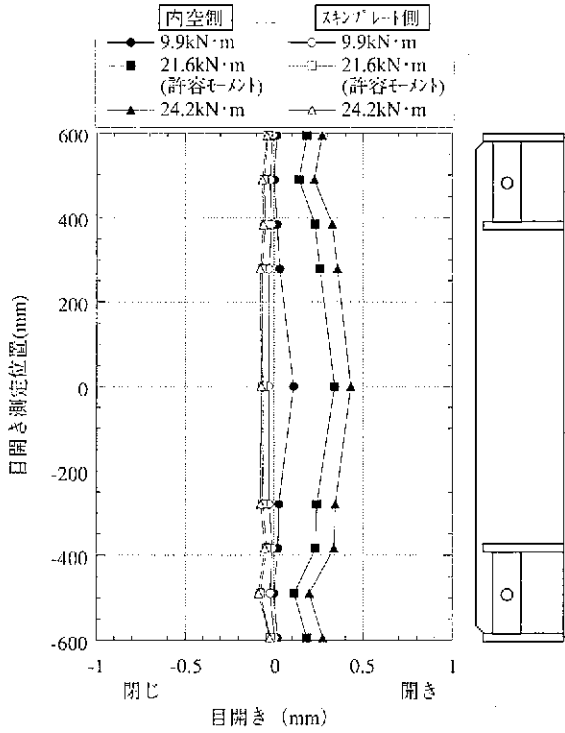


図27 継手部目開き状況

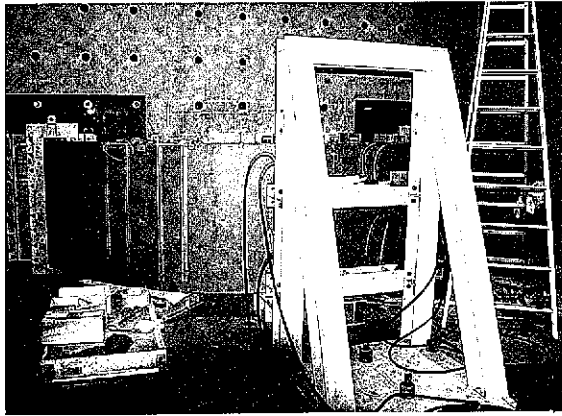


写真6 継手曲げ試験状況

力が作用するトンネルを建設するケースが増大している。この場合、従来に増して剛性及び強度の高い継手が必要となる。

こうしたニーズに応えるため、低コストで高性能なセグメント継手として高剛性継手の開発に取り組んできた。本高剛性継手は、中が中空のドーム状となった三次元タイドアーチ構造により、薄肉軽量でありながら大きな剛性、強度を発揮できるダクタイル製のセグメント継手である(図28参照)。

4.2 高剛性継手の原理と特長

セグメント継手は、剛性および強度がセグメント本体と比較してかなり小さいのが一般的である。そのため、弱い継手ではリングとしての強度不足、止水性能の低下をきたし、さらにリングの変形過大に伴う組立施工性や地盤沈下への影響が懸念される。特に、トンネルが軟弱地盤内を通過する場合や内水圧を受ける場合は、セグメント継手に大きな曲げモーメントや引張力が作用するため、高剛性を有した継手構造でリング全体の剛性を確保する必要がある。

本高剛性継手は、アーチ部を通じてボルト軸力をスムーズに継手のアンカー筋に伝達できるため、継手面板の変形を極めて小さい状態に保持可能である。このため、ボルト孔周辺に応力が集中して比較的低い荷重レベルでも継手板に変形が生じる従来継手に比べ、継手剛性および強度を4～5割程度向上することができる(図29参照)。

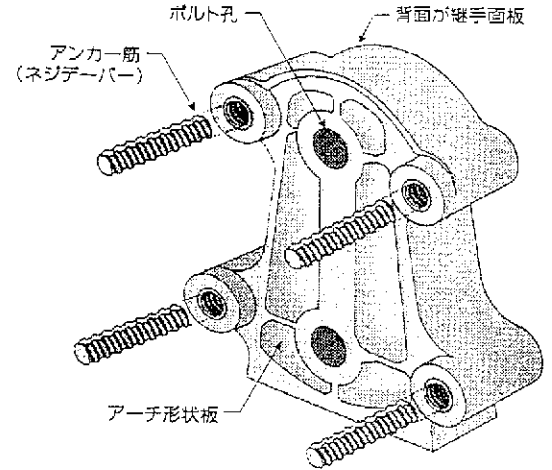


図28 高剛性継手概要図

り、より高い防食性能を確保することが出来る。また中詰めコンクリートの種類をより高い耐久性を有したものにすることで、求められるニーズに種々対応できるようにしている。

3.7 CP鋼製セグメントの今後の展開

二次覆工の機能をセグメントに持たせた本製品の一層のブラッシュアップを図り、シールドトンネルセグメントの高機能化、コスト縮減に一層寄与していく所存である。

4. 高剛性継手(高機能セグメント継手部材)

4.1 概要

セグメントをリングに組立する連結部材であるセグメント継手は、セグメント製作費全体の約1～2割を占めている。このため、継手の合理化、低コスト化は、シールドトンネルの建設コスト縮減における重点課題の一つとなっている。一方、シールドトンネルは、技術の目覚ましい進展に伴い、軟弱地盤内を通過する大口径の地下鉄トンネルや内圧型地下河川トンネル等、セグメント継手に大きな断面

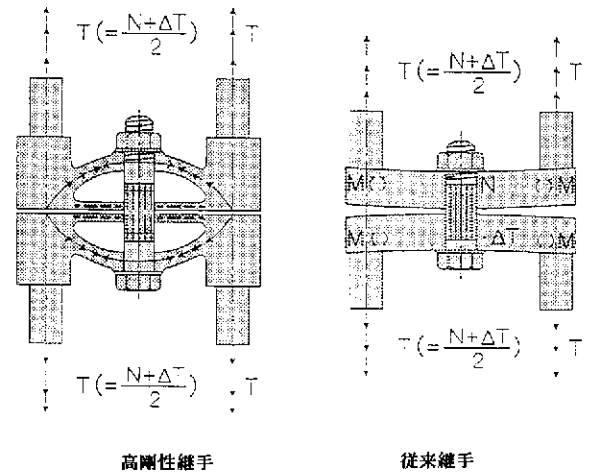


図29 継手変形挙動の比較

高剛性継手の特長について述べる。

- 1) 薄肉軽量でも大きな継手剛性および強度が発揮できる
 継手は、ボルト軸力をアーチ部より直接アンカー筋に伝達するため、内部が空洞で薄肉軽量でも、大きな剛性・強度が得られる構造となっている。
- 2) セグメント本体構造の合理化が可能である
 継手の剛性が高いため、設計において添接リングへの断面力負荷を小さくすることができる。これにより、セグメント本体部の断面力が軽減され、本体構造の合理化が可能となる。
- 3) 優れた止水性能が確保できる
 外力(曲げモーメント)が継手に作用し継手面板が大きく変形すると、継手部に大きな目開きが生じて漏水の原因となる。高剛性継手は、このような変形が極めて小さく、継手目開きによる漏水の恐れも少ない。

以上のように、本高剛性継手はコスト、性能とも優れたセグメント継手である。また、その特性は、継手に大きな断面力が作用する条件下において一層顕著となる。

4.3 高剛性継手の設計モデルの構築

高剛性継手の三次元タイドアーチ構造は、強度性能上最大の利点である一方、設計上は、簡易なモデル化が難しく高度な解析計算を必要とする欠点でもあった。そこで、高剛性継手の設計合理化を目的とし、簡易かつ汎用的な設計モデルの構築に取り組んだ。

設計モデルの構築においては、複雑な三次元タイドアーチ構造をいかに抽象化した簡易なモデルに置き換えるかが最大のポイントであった。そこで、実構造を忠実に再現したモデル解析を行い継手の強度特性を明らかにし、これを抽象化して設計モデルとした。以下では、継手の強度特性を把握するために実施した三次元有限要素解析とこれを基に構築した設計モデルについて述べる。

まず、力の伝達機構解析に用いた解析モデルを図30、解析結果を図31に示す。なお解析は、継手Z軸方向の上方からボルト部分に集中荷重を作用させた継手の応力分布状況を示したものである。これより、高剛性継手は当初想定した通り、ボルト孔周辺に応力が集中することなく、アーチ部を通じて直接アンカー筋部分に伝達していることが確認できた。

次に、外力に対する継手の変形挙動解析に用いた解析モデルを図32、解析結果を図33に示す。なお解析は、継手に曲げモーメントが作用した場合を想定し、片方のボルトにのみ荷重を作用させた状態での継手の変形挙動を示したものである。これより、継手の変形が及ぶ影響範囲は、Y軸方向の片側半分に限定されていることが明らかになった。

これらの解析結果を基に作成した設計モデル(三次元梁モデル)を図34に示す。モデル中の中間梁は、有限要素解析で継手の変形影響範囲がY軸方向の中間点付近に限定されていることをモデルとして表現したものである。本モデルを用いて外力に対する変形挙動をシミュレートした結果を図35に示す。これより、三次元有限要素解析結果とよく一致しており、本モデルが高剛性継手の設計モデルとして妥当であることが確認できた。

以上より、高剛性継手の設計が複雑な三次元有限要素モデルを用いることなく簡易モデルで可能であることが明らかになった。今後は、この設計理論をプログラム化した設計システムの整備を行い、本継手のより合理的な設計手法の汎用化を進めていくつもりである。

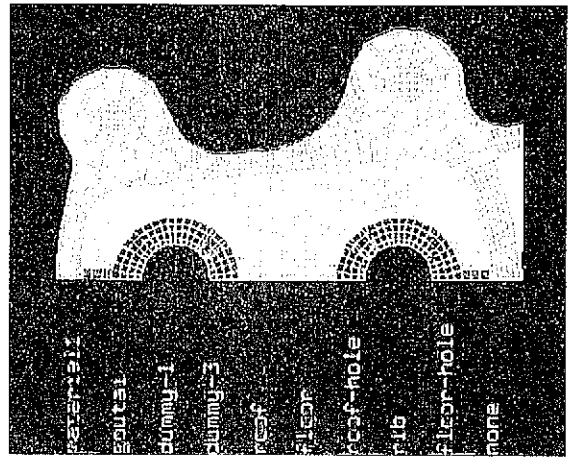


図30 力の伝達機構解析モデル

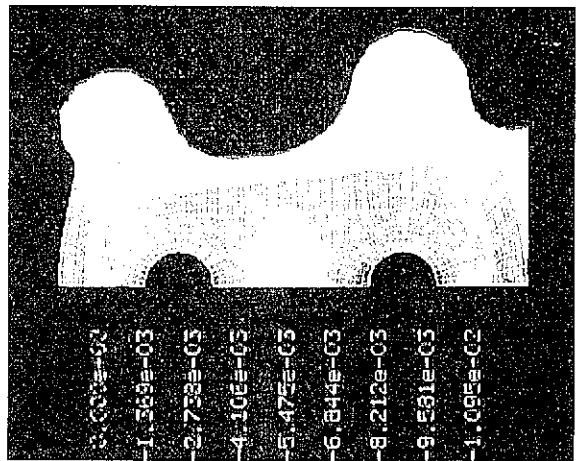


図31 力の伝達機構解析結果

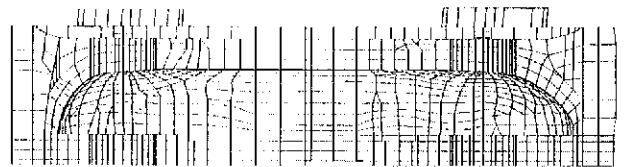


図32 変形挙動解析モデル

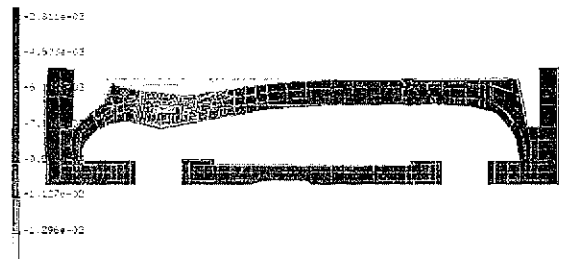


図33 変形挙動解析結果(正曲げ)

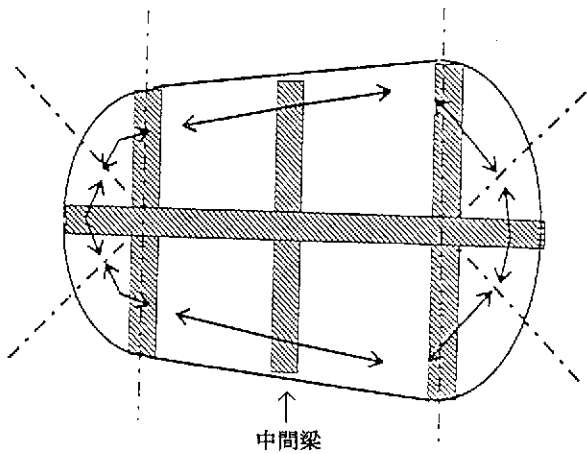


図34 設計モデル

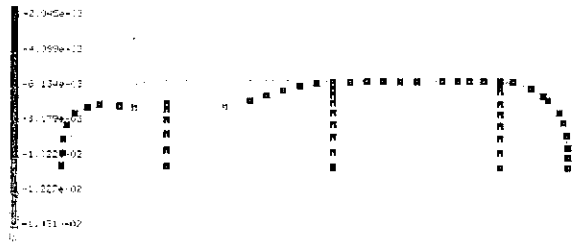


図35 解析結果（正曲げ）

4.4 高剛性継手の採用実績

高剛性継手は、大口径の軟弱地盤や内圧が作用するシールドトンネルにおいて有効である(図36参照)。また、鉄筋にボルト孔を加工したインサート式継手と組合わせたインサート式高剛性継手を用いると、トンネルによってはより一層の低コスト化が可能である。あるケースで試算した結果、インサート式高剛性継手は、従来継手に比べ、セグメント継手で約40%、これに付随してセグメント全体の製作費も約7%のコスト削減が可能となることがわかった。

こうした中、高剛性継手の採用実績は着実に伸びており、その累積は1万t近くにまで達している(表7、写真7、写真8参照)。

今後、本高剛性継手の設計、製造および加工技術の更なる改善を進め、より幅広い分野でシールドトンネルの建設コスト削減に貢献していく所存である。

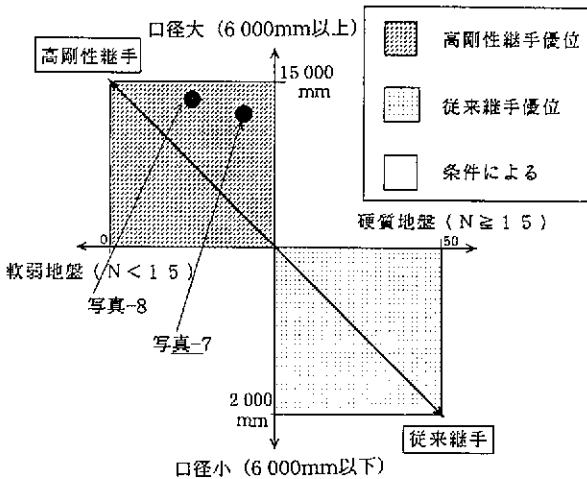


図36 継手の競争力比較

表7 高剛性継手の主な用途別採用実績

	採用量(ton)	主な工事名	備考
地下河川	6 100	外郭放水路	高剛性継手
地下鉄	3 100	埼玉高速鉄道他	インサート式高剛性継手
共同溝	150	川越共同溝	インサート式高剛性継手

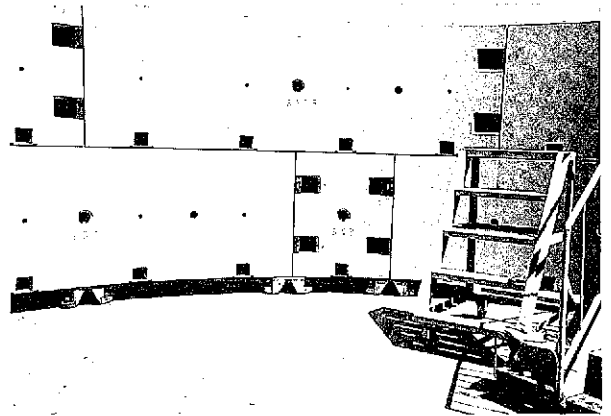


写真7 地下鉄トンネルへの適用例（インサート式高剛性継手）

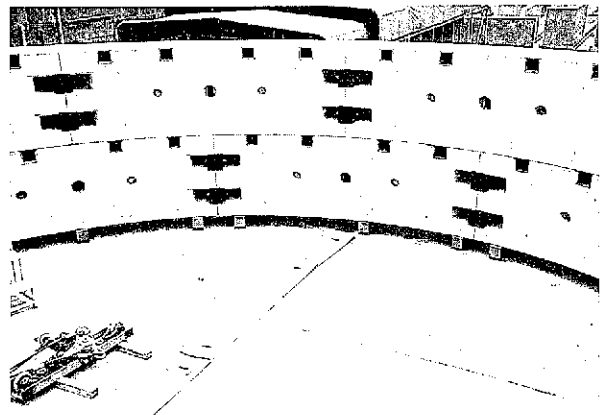


写真8 地下河川トンネルへの適用例（高剛性継手連結タイプ）

5. おわりに

地下空間構築に対する社会的ニーズは、バブル経済崩壊に伴う一時的な停滞が見られるものの、都市の発展には今後とも欠かせないものである。ここに紹介した鋼製連壁(NS-BOX)、コンクリート中詰め鋼製セグメント、セグメント用高剛性継手は、いずれも各方面で高い評価を得つつあり、高度な大深度地下空間利用の推進に大きく貢献していくものと考えている。今後、大深度地下空間構築建材の開発において、時代のニーズを見据え、常に需要家のニーズに合った開発、改善を、各方面の協力を得ながら続けていく所存である。