

矩形断面スチールセグメントの 合理的構造と設計に関する提案と検証

請川 誠¹・谷口 徹²・元木 実¹・中川浩二³

¹正会員 工修 戸田建設(株)本社土木技術開発室 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀4-6-1)

²正会員 戸田建設(株)本社土木技術開発室 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀4-6-1)

³正会員 工博 山口大学工学部社会建設工学科教授 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

円形形状とは異なり矩形形状シールドトンネルは覆工に曲げモーメントが大きく発生するため、覆工体となるセグメントは柵高さが大きくなり、円形のセグメントと比べてコストアップする傾向にある。先に、筆者らは隅角部に生じる大きな曲げモーメントやせん断力に対して、隅角部を内空に影響のない範囲で円弧状にする(円弧状隅角部)ことの合理性については述べた。本論文では、円弧状隅角部の実設計に際しての留意点やこれに伴う経済性等について言及することを含め矩形スチールセグメントに対して、3つの合理的設計の提案(形鋼主桁の適用、円弧状隅角部の採用、二次覆工の利用)を行った。その上で設計の考え方、検証実験、実工事への適用、及び計測結果等について述べる。

Keywords : shield tunneling method, box shield, experimental operation, segment cost reduction, segment rounded corner

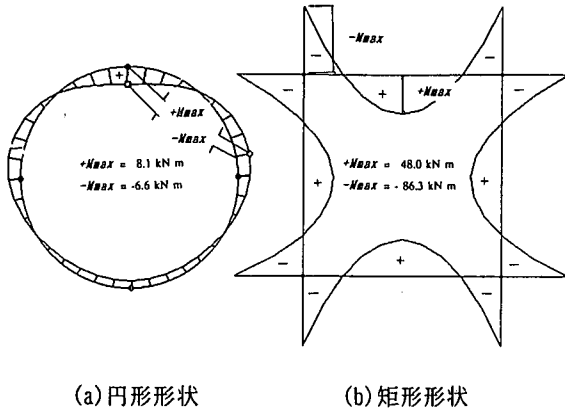
1. はじめに

シールド工法における技術開発は、より合理的、より経済的な方法を求めて、さかんにおこなわれている。その1つとして、掘削断面を供用時の断面にできるだけ近づけることがあげられ、それにより上部用地幅の制限緩和や、輻輳した地下空間における近接構造物や各種埋設管との干渉を避けることができる。多連形シールドや矩形断面シールドなどがその例であり、筆者らは、それらのひとつである矩形断面シールド工法の開発^{1), 2)}を行ってきた。矩形断面は、電力洞道や、地下鉄、歩道、道路などの供用時断面を考慮するといくつかの点で有利であり、上部占有幅や掘削残土量の低減に有効である。しかしながら、矩形形状シールド工法は円形形状シールド工法と比べて、覆工体であるセグメントに曲げモーメントが大きく発生するため、セグメント厚さや重量が増える傾向にある。シールド全体工事費の大きな割合を占めるセグメントのコストアップは、今日の社会情勢からも最小限に抑制する必要がある。また、比較的大きな矩形断面など、曲げモーメントが軸力に比べて卓越して大きく発生する場合に、R

Cセグメントを適用すると、セグメント厚さや重量が大きくなる傾向にあり、鋼構造や鋼コンクリート構造を適用することが合理的な場合が少なくない。そこで、本研究では矩形断面スチールセグメントに対して、3つの合理的設計の提案(形鋼主桁の適用、円弧状隅角部の採用、二次覆工の利用)を行い、それぞれの設計の考え方を述べるとともに、実証実験及び実工事への適用を通じて、3つの提案の検証をおこなった。

2. 3つの合理的設計の考え方

図-1は、土被り6m相当の同荷重条件、及び同断面積(矩形縦3m×横3m、円形直径 $\phi=3.385\text{m}$)における、矩形形状と円形形状セグメントの曲げモーメント分布を示したものである。矩形セグメントの曲げモーメント分布の特徴は、隅角部に大きな負の曲げモーメントが発生することであり、この値も非常に大きい。円形と矩形セグメントにおいて最大の正の曲げモーメント $+M_{max}$ と負の曲げモーメント $-M_{max}$ を比べると、表-1のようになる。



(a) 円形形状 (b) 矩形形状

図-1 曲げモーメント分布比較

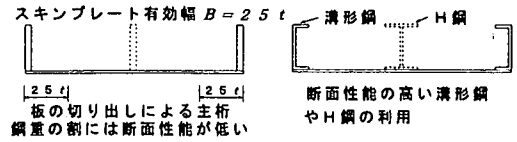
表-1 円形と矩形セグメントの断面力比較

	円形	矩形	矩形/円形
$+M_{max}$	8.1 kNm	48.0 kNm	5.9
$-M_{max}$	-6.6 kNm	-86.3 kNm	13.1
S_{max}	10.5 kN	177.0 kN	16.9

すなわち、 $+M_{max}$ で約6倍、 $-M_{max}$ で約13倍もの大きな曲げモーメントが矩形セグメントには発生する。これに伴い矩形セグメントは、円形セグメントに比べて桁高さ、鋼重が大きくなり、コストの増大を招く。筆者らはまず矩形セグメントにおける特徴である直線部に注目し、この部分の主桁に断面性能が高く、素材単価の廉価な形鋼材を利用することによりコストダウンを図り、また2番目として同時に隅角部に発生する大きな負の曲げモーメントに対してコーナーを円弧状³⁾とすることにより、断面力の低減に努めた。さらに、3つ目の合理的設計の提案として、二次覆工の本体利用が挙げられる。円形セグメントにおいても、合理的に二次覆工を本体利用することが期待されているが、矩形セグメントにおいては、円形セグメントと比べて、大きな曲げモーメントが発生するため、二次覆工を利用することは、より設計上合理的と考える。

(1) 形鋼材の利用

矩形スチールセグメントの直線部の主桁に断面性能が高く、材料単価の廉価な形鋼材（溝形鋼、H鋼等）を利用することの有効性について述べる。通常、円形スチールセグメントで使用される主桁断面は、図-2 (a) のように、板材を円弧状に切り出し、



(a) 従来主桁 (b) 形鋼主桁

図-2 従来主桁と形鋼主桁

スキンプレートと縦リブ等により補剛し、スキンプレートの有効幅 ($B=25t^4$)、 t :スキンプレート厚)を加えた、L型断面としている。スキンプレートが比較的薄いこともあり、L型断面としてもそれほど大きな断面性能は得られないが、円形セグメントの断面力が一般に大きくないことから十分対応が可能であった。構造物直下など荷重が大きくなる特殊部などでは、内側にリブを溶接し、ビルドHとし、断面剛性を向上させることもあるが、それらは非常にコストアップとなり、特殊なある限定された区間しか使用されない。また、形鋼材を適用することも考えられるが、曲げ加工精度に問題があり、所要の精度を得られない可能性が大きい。一方、矩形セグメントにおいては、直線部が主体となるため、図-2 (b) に示すように直線部の主桁に断面性能の高い溝形鋼やH鋼の形鋼を使用すれば、従来主桁構造に比べて主桁の鋼重は格段に少なくなる。

(2) 円弧状隅角部⁵⁾

前述のように、矩形セグメントは隅角部に非常に大きな負の曲げモーメントが発生する。筆者らはこの隅角部の大きな負の曲げモーメントを低減するため、この隅角部を内空に影響のない範囲で円弧状（円弧状隅角部）とした。図-3は、縦3m×横3mの矩形形状に円弧状にしないもの（隅角部半径 $R_c=0$ mm）と円弧状にしたもの（ $R_c=600$ mm）の曲げモーメント分布を示したものである。隅角部の $-M_{max}$ が円弧の効果で大きく低減したばかりでなく、スパン中央の $+M_{max}$ も、スパン長が小さくなる効果を受けて、低減していることがわかる（表-2）。このように隅角部を内空を侵さない程度に円弧状にすることは、断面力を低減するために非常に有効な手段となる。

(3) 二次覆工の利用

一般的に二次覆工の役割は、一次覆工を保護し設計計算にはのらない補強や防蝕及び防水、仕上げ工

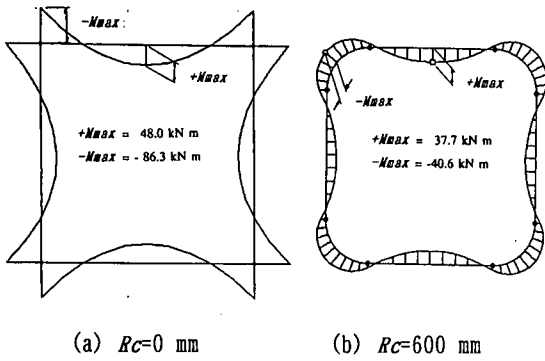


図-3 円弧状隅角部の曲げモーメント分布

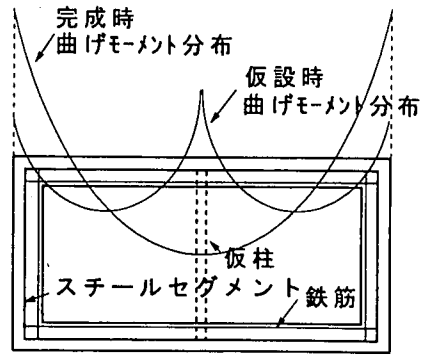
表-2 円弧状隅角部の効果

	Rc=0 mm	Rc=600mm	Rc=600/Rc=0
+Mmax	48.0 kNm	37.7 kNm	0.79
-Mmax	-86.3 kNm	-40.6 kNm	0.47
Smax	177.0 kN	107.9 kN	0.61

等であり、無筋コンクリートで施工され、構造設計計算上は考慮されないことが多い⁴⁾。二次覆工の本体構造物への利用として、二次覆工が耐荷機能を発揮した後に作用する増加荷重、除荷荷重及び他の構造物の近接施工の影響等作用する荷重が明確な場合や、構造系が変わり断面力分布が変化する場合、有効であると考えられる。たとえば、矩形セグメントにおいては仮設時に中柱を入れ、二次覆工打設後、中柱を撤去する場合(図-4)などである。そのような場合に対して今回の提案は、

- ①セグメントはスチールセグメントを用いる。
- ②二次覆工打設時に内側に鉄筋を配し、スチールセグメントを外側の応力材とする合成構造として設計する。
- ③その際、図-4に示すようにスチールセグメントは二次覆工打設前(仮設時)は曲げ応力を受け(圧縮域、引張域両方を持つ)、二次覆工打設後(中柱撤去完成時)は主として引張力(圧縮力)が発生するが、この場合二次覆工後の部材耐力は、打設前の曲げ応力に影響を受けないという性状を利用して、打設前の曲げ応力度を重ね合わせない設計をおこなう。

つまり、完成時の構造を内側鉄筋、外側スチールセグメントの合成構造として、剛性を高め、かつスチールセグメントの二次覆工打設前(仮設時)の曲



仮設時、仮柱を設置して断面力を低減し、シールド掘進完了後スチールセグメント内側に鉄筋を配筋する。コンクリート打設後、仮柱を撤去し所要の内空を得る。

	構造	許容応力度等
仮設時	スチールセグメントのS構造	常時の1.5倍で設計
完成時	外側スチールセグメント、内側鉄筋の合成構造	常時の1.0倍で設計 スチールセグメントの仮設時応力は重ね合わせない

図-4 二次覆工の利用の一例

表-3 3つの提案のまとめ

手法	効果、考え方	基礎実験	検証
形鋼材の適用 (材料の利用)	直線部の主筋に形鋼材適用による主筋断面性能の向上	単体正曲げ試験 単体負曲げ試験	実工事における設計及び計測
円弧状隅角部 (形状の工夫)	隅角部を円弧状にすることによる断面力の低減	リング載荷試験	実工事における設計及び計測
2次覆工の利用 (設計の考え方)	外側スチールセグメント、内側鉄筋の合成構造 本設計時の仮設時曲げ応力の無視	先行曲げ応力を導入した供試体の曲げ試験	—

げ応力度は、本体設計時に重ね合わせず、仮設時の許容応力度を完成時の1.5倍として設計し、スチールセグメントの鋼重、桁高さを低減するものである。

以上3つの提案について、表-3にそれぞれの効果、考え方、本研究で行った実験、検証等についてまとめる。

3. スチールセグメント主桁への形鋼材の利用

(1) 形鋼材料を用いた矩形スチールセグメントの設計

図-5は、形鋼主桁を適用した場合、形鋼と同じ断面積（鋼材量）をもつ従来主桁に対して断面2次モーメントがどれだけ向上するかを示したものであり、桁高さ150mm~300mmまでの市場性のある溝形鋼やH鋼の図-2（b）に示すような形鋼主桁構造の断面2次モーメント I_c と、形鋼と同じ断面積を持つ図-2（a）に示す従来主桁の断面2次モーメント I_p の比を縦軸に、スキンプレート厚を横軸に示したものである。重心の位置は形鋼主桁と従来主桁ともにあまり変わらないため、断面2次モーメント比 (I_c/I_p) がほぼ断面係数比となる。スキンプレートの厚みが薄くなれば、断面2次モーメント比は大きくなる傾向を示し、3本主桁になればさらにその比は大きくなる。従来主桁より概ね1.5~2.0倍の主桁断面係数が得られ、形鋼主桁を適用することにより、桁高さや鋼重を減らすことができ、コストを必要最小限に抑えることができる。形鋼主桁は、曲げ加工精度の問題から円弧状隅角部部材には適用できないが、直線部分の部材に適用する事ができ、直線部分によりセグメント主桁高さが決定する（最大曲げモーメントが発生する）場合、たとえば縦横比が大きい断面の-span中央の正曲げモーメント部や柱を設置した部分の負曲げモーメント部に適用すれば効果的である。形鋼材を主桁に適用するにあたっては、形鋼フランジの存在により、縦リブと主桁の溶接性やセグメント組立時のボルト挿入、締結の作業性が若干落ちることや、形鋼サイズが決められていて自由なサイズの形鋼材を選択できないなどのデメリットもあるが、断面性能のアップはそれらのデメリットを消し去る大きなメリットと考える。

実際の設計に対しては、スキンプレートの有効幅をどの程度とるかが問題となるが、以下の確認実験の結果より、従来の主桁同様スキンプレートの有効幅を2.5tとして設計を実施しても差し支えないと考える。

(2) 確認試験

形鋼を主桁に利用した主桁断面の性能を確認するために、正曲げ（スキンプレートが圧縮）及び負曲げ（スキンプレートが引張）試験を実施した。この試験では、部材の耐力の検証に加え、スキンプレートの有効幅の検討をおこなった。載荷方法、供試体

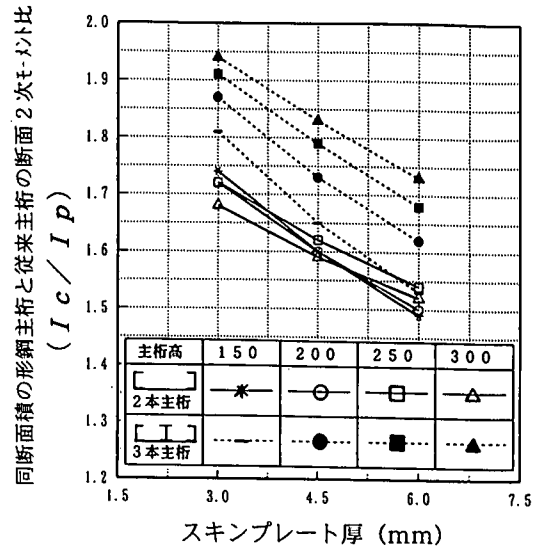


図-5 形鋼主桁と従来主桁の断面性能比

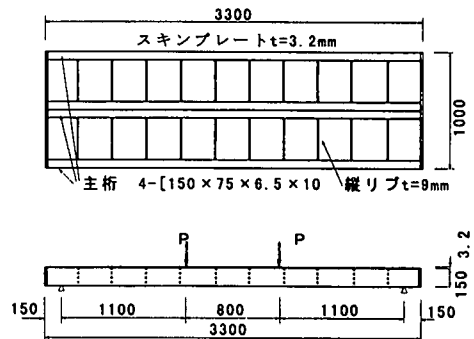


図-6 単体曲げ試験供試体及び載荷方法(正曲げ)

を図-6に示す。

図-7は、供試体中央における荷重-変位曲線である。各供試体の耐力は、正曲げ（T-1供試体）337kN、負曲げ（T-2供試体）398kNとなり破壊形態はともに、圧縮側鋼材の座屈であった。材料試験値から求めた降伏応力度相当荷重（部材縁応力度が降伏応力度272N/mm²に計算上達する荷重） $P_y=250$ kNをともに大きく上回った。正曲げが負曲げより耐力が低いのは、正曲げは圧縮側がスキンプレート（厚さ $t=3.2$ mm）であるため、負曲げの圧縮側鋼材である溝形鋼よりも座屈性能が劣り早期に座屈が生じたためである。スキンプレートが圧縮側であるか引張側であるかは、スキンプレートの有効幅にも影響を与える。スキンプレートの有効幅は、対象と

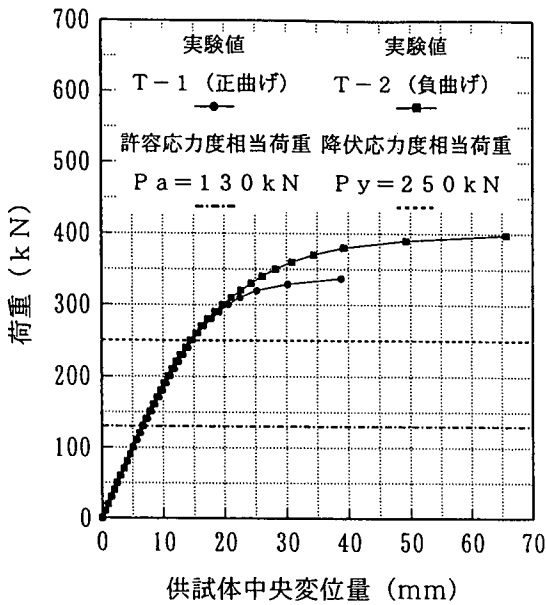


図-7 荷重-変位曲線

なる応力状態、スキンプレートの板厚、主桁及び縦リブ寸法やスキンプレートの結合方法等によって異なってくるが、一般にスキンプレートが主桁や縦リブと溶接によって強固に結合されている場合、スキンプレートの有効幅は $25t$ (t :スキンプレート厚)としてよいとされている⁴⁾。今回の供試体においては、スキンプレートがどの程度有効であるのかを、断面ひずみ分布から検証した。図-8及び図-9は、それぞれ正曲げ(T-1供試体)、負曲げ(T-2供試体)の許容応力度相当荷重($P=130\text{kN}$)及び降伏応力度相当荷重($P=250\text{kN}$)の断面ひずみ分布の実験値と有効幅を $25t$ (供試体幅100cmの内32cm)、 $Bf+25t$ (Bf :形鋼主桁フランジ幅、供試体幅100cmの内62cm)及び全幅(供試体幅100cmの内100cm)の3つの計算値を比較したものである。実験結果によると、 $P=130\text{kN}$ 時においては正曲げ、負曲げとも、断面ひずみ分布は全幅を有効幅とした計算値と概ね一致する。しかし、 $P=250\text{kN}$ 時においては、負曲げ供試体は全幅を有効幅とした計算値に一致するのに対して、正曲げ供試体は $Bf+25t$ の有効幅しか評価できなくなる。

今回の供試体では、正曲げでは $Bf+25t$ 、負曲げでは全幅を有効幅として考慮できる結果となったが、前述したように、有効幅は主桁や縦リブの形状、本数によって異なると考えられ、形鋼主桁の有効幅

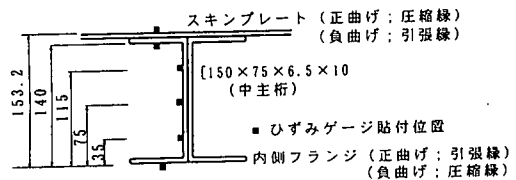
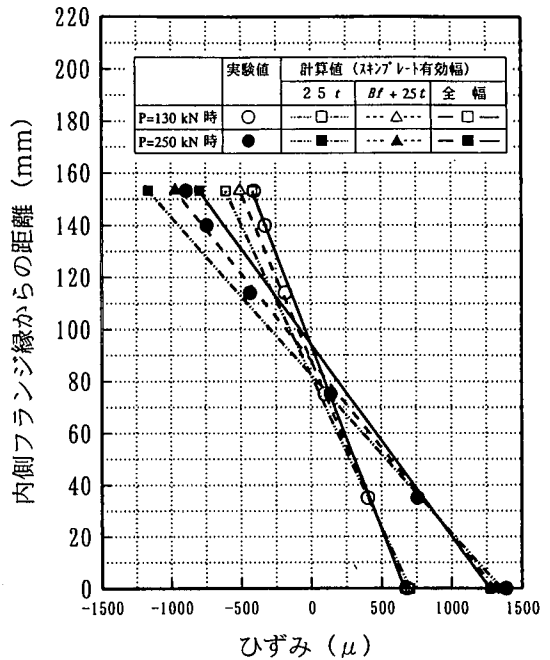


図-8 主桁断面のひずみ分布 (正曲げ)

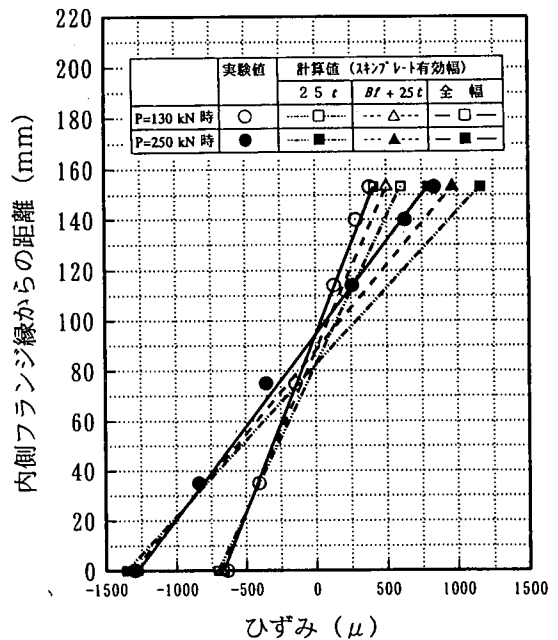


図-9 主桁断面のひずみ分布 (負曲げ)

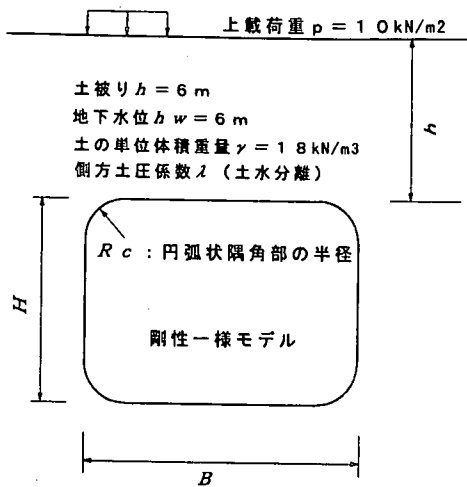


図-10 断面力算定モデル

をどの程度考慮するかは、今後種々の供試体を用いた実験により検証していく必要がある。

4. 円弧状隅角部セグメント

円弧状隅角部の有効性及び鉄筋コンクリート円弧部材性状の概要とその検証実験としてリング載荷試験を実施し良好な結果が得られたことは、前論文³⁾で報告したとおりである。ここでは、実施工で用いたスチールセグメントを対象に、トンネルの断面形状（縦横比）、荷重条件の違いによる断面力の低減度を示すとともに、実際設計する上で、円弧状隅角部部材の応力度分布に基づく、直線部材との違いや留意点を述べる。

(1) 円弧状隅角部の有効性

円弧状隅角部の有効性を示すために、図-10に示す条件により、縦横形状比 B/H 、円弧状隅角部の半径 R_c 、側方土圧係数 λ を変化させて、円弧状隅角部の有効性について検討した。円弧状隅角部の基本的な傾向は、図-11 ($B=H=3m$, $\lambda=0.5$) に示すように、 R_c の増加とともに隅角部の負のモーメント $-M_{max}$ が大きく低減し、スパン中央の正の曲げモーメント $+M_{max}$ も低減する。特に隅角部の $-M_{max}$ の低減は大きい。図-12は、円弧状隅角部としない場合 ($R_c=0mm$) に比べての最大曲げモーメント、最大せん断力の低減度を示したも

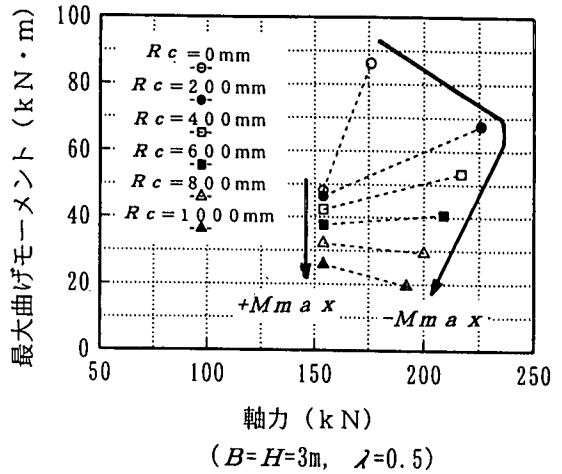


図-11 隅角部半径の増加に伴う曲げモーメントと軸力の変化

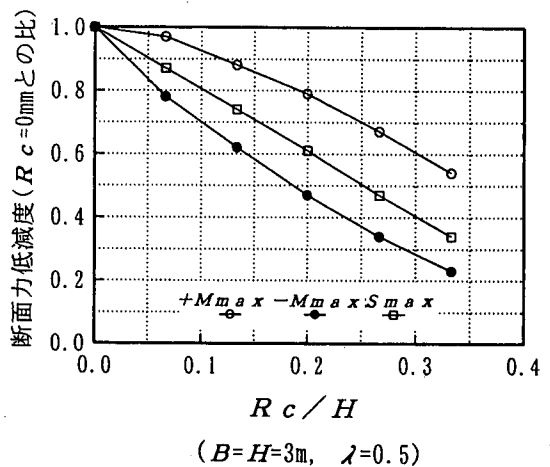
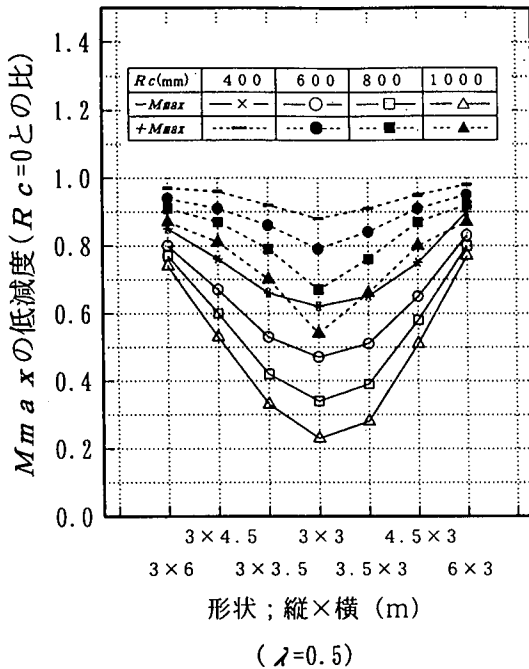


図-12 隅角部半径の増加に伴う断面力の低減

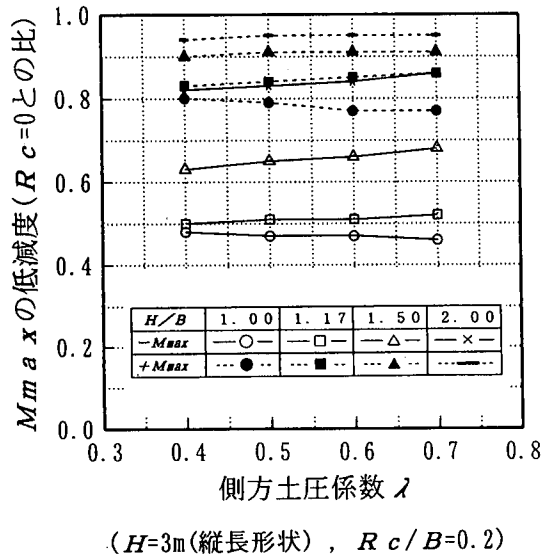
のであり、曲げモーメントだけでなく最大せん断力 S_{max} も大きく低減することが示されている。

a) 縦横比の違いによる効果度

図-13は、与えられた隅角部の半径に対して曲げモーメントの低減度が形状によってどのように変化するかを示したものであり、縦軸に M_{max} の低減度 ($R_c=0mm$ との比)、横軸に矩形の形状をとっている。同じ隅角部半径をとれば、正方形 ($B/H=1$) のときが最も円弧状隅角部の効果があらわれ、横長（縦長）になればなるほどその効果が薄れてくることを示している。



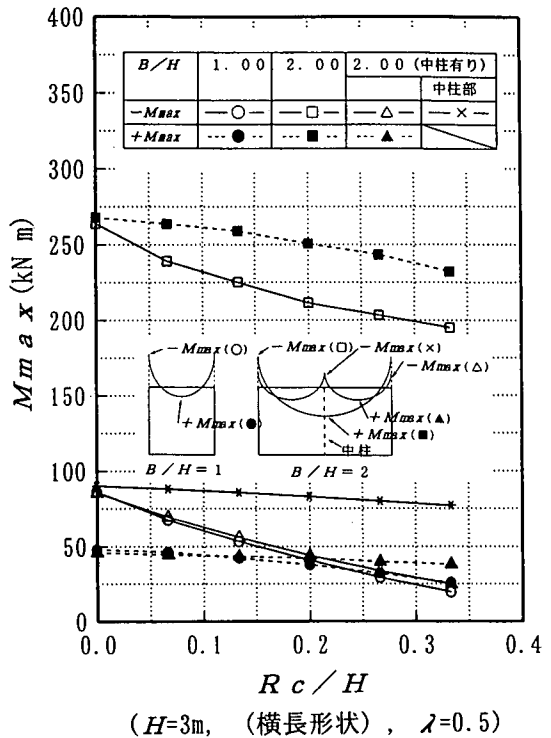
図一 13 縦横形状の違いによるMmaxの低減度の変化



図一 14 側方土圧係数の違いによるMmaxの低減度の変化

b) 側方土圧係数の違いによる効果度

図一 14 は縦長形状の側方土圧係数 λ による影響 ($Rc/B=0.2$ ($Rc=600mm$) 固定) を示したもので



図一 15 中柱有り無しの場合の隅角部半径の増加に伴うMmaxの低減

ある。側方土圧係数 λ の値を変化させても低減度はあまり変わらず、側方土圧係数 λ が断面力の低減に与える影響は小さい。

c) 中柱の効果度

横長あるいは縦長が大きくなると、円弧状隅角部の効果が薄れることは前述したが、たとえば、横長形状の縦3m×横6mの扁平形状に対して、柱(中梁)を入れた解析をおこなった。図一 15 は、中柱の効果を示したものであり、中柱を導入することにより、当然のことながら曲げモーメントは大きく低減し、その値は $B/H=1$ ($B=H=3m$) の正方形状と同程度のもとなり柱がない場合の約2~3割となる。しかしながら、 Rc の増大に伴う隅角部の $-Mmax$ の低減度は $B/H=1$ と同様に大きく低減するのに対し、中柱部の $-Mmax$ 及びスパン中央の $+Mmax$ の低減は、 $B/H=1$ ほどの低減度にはならない。

扁平形状になると断面力が非常に大きくなり、セグメントの設計桁高さや鋼重が非常に大きくなるため、柱を積極的に導入することが望ましく、供用時に柱が入らない断面においても、仮設時のみ柱を導入し供用時は二次覆工等を本体利用するなどして、

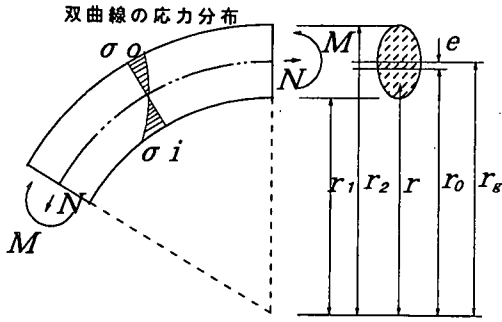


図-16 円弧部材

できるだけセグメントの梁厚を小さくすることが必要であろう。

また、中柱の剛性 (Ih : 断面2次モーメント, Ah : 断面積) と他の部材の剛性 (I, A) の比を変えて、円弧状隅角部の効果度の解析を行ったが、中柱の剛性を変化させてもその効果度は変わらなかった。

(2) 円弧部材の部材設計

これまで隅角部を円弧状にすることにより、曲げモーメントが大きく低減し、円弧状隅角部の有効性について述べてきた。ここでは、その円弧状にした部材をどのように部材設計すればよいかについて述べる。円弧状にした部材の応力度 σ は、図-16のように曲げモーメント M と軸力 N が作用した場合、以下の式が示すように双曲線分布⁶⁾となる。

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{(r_o - r)M}{r \cdot e \cdot A} \quad (1)$$

ここに

$$r_o = \frac{A}{\int \frac{1}{r} dA} \quad r_g = \frac{1}{A} \int r dA$$

$$e = r_g - r_o \quad A: \text{断面積}$$

第1項の軸力成分は、直線部材と何ら変わりはないが、第2項の曲げモーメント成分は、直線部材と異なる。

スチールセグメントの場合、直線部には形鋼材の使用が可能であるが、隅角部の円弧部材に対しては、曲げ加工等の問題により、図-2に示すような従来の主桁断面を適用する。このような断面の場合、

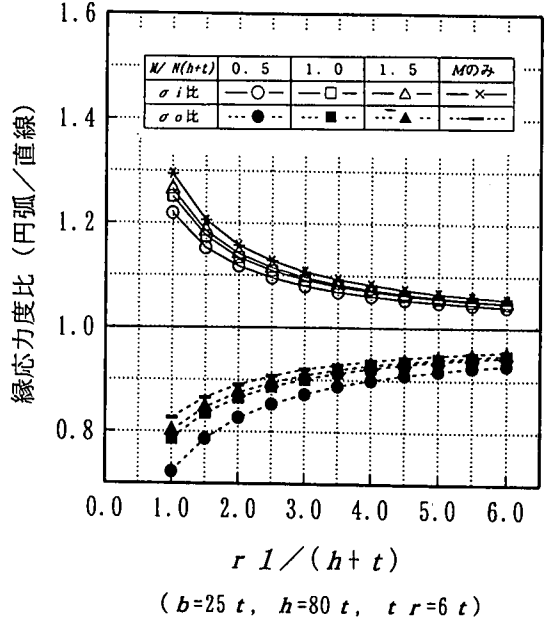


図-17 円弧半径の変化に伴う縁応力度比の変化

表-4 縁応力度比の変動

パラメーター	検討範囲、条件	内側縁応力度比の変動	外側縁応力度比の変動
$rI/(h+t)$	大	小さくなる	大きくなる
f	大 $0.5 \leq f$	大きくなる	大きくなる
$M/N(h+t)$	大 $1/m=80, p=6$	小さくなる	小さくなる
h/t	大 $40 \leq 1/m \leq 200$	小さくなる	小さくなる
p	大 $4 \leq p \leq 12$	小さくなる	小さくなる
tr/t	大 $1/m=80, f=1$	小さくなる	小さくなる

※応力度比の変動は、各パラメータを大きくした場合の変動を表す

$$A = b \cdot t + h \cdot tr$$

$$r_o = \frac{A}{tr \cdot \ln(1+h/rI) + b \cdot \ln(1+t/(rI+h))}$$

$$r_g = rI + \frac{tr \cdot h^2 / 2 + b \cdot t \cdot (h+t/2)}{A}$$

ただし、 b : スキンプレート有効幅

t : スキンプレート厚

h : 主桁高

tr : 主桁厚

rI : 円中心から部材までの距離

であり、これらを式(1)に代入すれば、任意の点における応力度が求められ、直線部材との縁応力度の比を求めることができる。

ここで、 $r I / (h + t)$ に対して、主桁厚とスキンプレート厚の比($p = t r / t$)、主桁高さ h とスキンプレート厚の比($1/m = h / t$)、曲げモーメント軸力比($f = M / N (h + t)$)をパラメータとして、直線部材との縁応力比(内側： σ_i 、外側： σ_o)を求めた。図-17は、横軸に $r I / (h + t)$ を、縦軸に円弧部材と直線部材との内側(σ_i)及び外側縁応力度(σ_o)の比をとったものである。同じ曲げモーメントと軸力が作用した場合、円弧部材の内側縁応力度は直線部材のそれより大きく、円弧部材の外側縁応力度は逆に直線部材より小さくなる。またそれらの大きさは、 $r I / (h + t)$ の大きさによって変化し、円弧内半径 $r I$ を小さくすると、内側縁応力度比は大きくなり、逆に外側縁応力度比は小さくなる。 $r I$ を大きくしていくと、当然のことながら内側、外側の縁応力度比はともに1に漸近し、円弧部材の縁応力度は直線部材のそれに一致するようになる。一方、曲げモーメント軸力比 $f = M / N (h + t)$ を大きくすると縁応力度比は内側、外側ともに大きくなる傾向を示す。表-4に、各パラメータによる縁応力度比値の変動を傾向を示す。

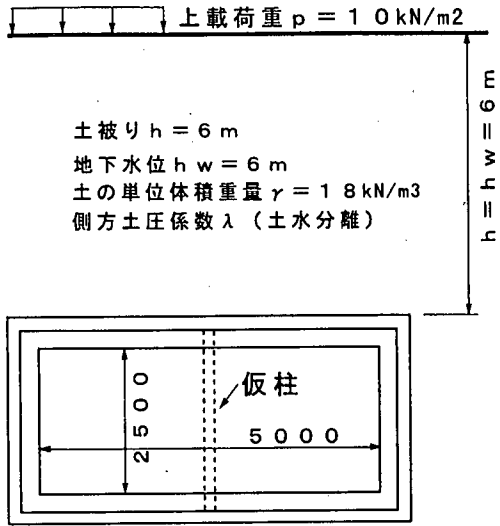


図-18 概略比較設計の条件

5. 二次覆工の利用

(1) 二次覆工を利用した概略設計

二次覆工利用の有効性を示すために、図-18に示す仕上がり内空縦2.5m×5.0mのトンネルの構築を例に取った。二次覆工の本体利用、つまり仮設時に仮柱を設置し断面力を低減させておき、セグメント主桁の内側に配筋後コンクリートを打設し、剛性の高い部材とした後仮柱を撤去する場合と二次覆工を本体利用しない「本体セグメント+二次覆工」について概略比較設計を実施した。(表-5)

二次覆工利用時のセグメントは、仮柱の存在による断面力の低減と許容応力度を本体時の1.5倍の割り増しをおこなっていることから、桁高さ及び鋼重がともに小さなセグメントとなっている。実際、長方形の断面において、セグメントの仮設時曲げ応力を完成時に重ね合わせている以外は、仮柱を仮設時設置、内側配筋、コンクリート打設後、仮柱撤去し今回提案と同様に設計し、実工事に適用した例⁷⁾もあり、工費の低減につながったと報告されている。この報告例は、仮設時応力を本体設計時に重ね合わせており、仮設時応力を本提案のように、本体設計時に考慮しなければ、セグメントの鋼重は軽量化され、さらに工費の低減につながったと思われる。このように、仮柱の設置、撤去により構造系が変化

表-5 概略比較設計結果

	二次覆工本体利用	本体セグメント+二次覆工
断面構造 ()は側壁部	スキンプレート $t = 3 \text{ mm}$ 	スキンプレート $t = 3 \text{ mm}$
主桁鋼材 (SM490) 断面積 A_s	2 [150 × 75 × 6.5 × 10 H150 × 100 × 6 × 9 $A_s = 73.8 \text{ cm}^2$ (100%)	2 [300 × 90 × 10 × 15.5 H300 × 150 × 8.5 × 9 $A_s = 158.3 \text{ cm}^2$ (214%)
主鉄筋 (SD345) 断面積 A_r	上、底版 8 - D 25 $A_r = 40.5 \text{ cm}^2$ 隅角、側壁 8 - D 19 $A_r = 22.9 \text{ cm}^2$	—
コンクリート 桁高さ	$\sigma_{ck} = 21 \text{ kN/mm}^2$ 上、底版部 503 mm 側壁部 403 mm	$\sigma_{ck} = 18 \text{ kN/mm}^2$ 503 mm 二次覆工 200 mm
備考	・スキンプレートは本体設計時には考慮していない。 ・仮設時の許容応力度は、完成時の1.5倍とし、その応力は完成時考慮しない。	—

し、断面力が大きくなる場合などには、セグメントの仮設時曲げ応力を完成時に無視し、応力材として外側にスチールセグメント主桁、内側に鉄筋を配した合成構造部材として設計することは、有効であると考えられる。しかしながら、今回のように仮柱を設置し、コンクリート打設、硬化後、仮柱を撤去し内空を確保するケースは、仮柱(梁)を導入しても、セグメントピース等の資材の搬入に障害とならない断面、かつ仮柱(梁)により断面力の低減が効果的な、縦横比の比較的大きな扁平な断面に限られることなど、他の2つの提案より適用範囲がせまいことが難点である。

(2) 設計上の留意点

前述したように、セグメントの部材は、仮設時曲げ部材として作用し、完成時は引張（圧縮）材として作用するが、当然セグメントピース間継手部においても同様のステップを踏む。スチールセグメントの継手構造で通常よく使用される短ボルトの引張接合構造を採用した場合、主桁部材と異なり仮設時に曲げモーメントが発生した時にも、ボルトは引張力が作用し、さらに完成時においても引張力が作用する。主桁部のように仮設時の曲げモーメントにより、引張域と圧縮域の両方を持たないため、このようなボルト引張接合継手部は、仮設時の応力は完成時の部材耐力に影響を与え、本体設計時には仮設時応力を無視できないと考えられる。また、完成時引張材として作用する場合、必要鉄筋量に相当するボルト本数が必要となるが、ただ単にボルト本数を増やせばよいものではない。このような継手構造の力の流れは、主桁→継手板→ボルト→継手板→主桁と流れ、ボルトを継手板全面に相当本数配したとしても、継手板の剛性によっては、主桁近傍のボルトのみが引張力を受けて、主桁より遠いボルトには引張力が伝達しないことがある。それゆえ、全てのボルトに均等に力が伝達せず、設計計算上想定された耐力よりかなり耐力が落ちることも考えられる。これらの対応策としては、短ボルト構造を使用する場合は断面力の小さな位置や、圧縮力が作用する位置に継手を設定するか、継手板の剛性を向上させた長ボルト構造や主桁の力を直接伝達させる摩擦接合などの継手構造を用いることが必要である。

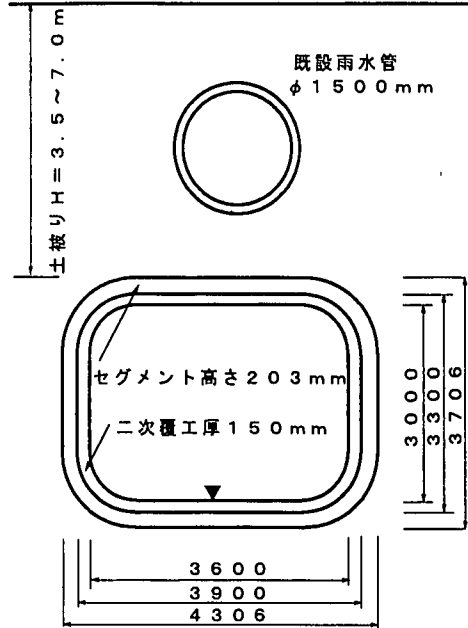


図-19 標準断面図

6. 実工事への適用検証と検証実験

(1) 形鋼主桁と円弧状隅角部の実工事への適用

a) 工事概要

この工事は、仕上がり内空縦3.0m×横3.6m工事延長L=556mの雨水幹線工事である。上部に既設雨水管が存在し、同一断面積の円形断面ではそれに干渉する。所要の内空断面を確保し、既設雨水管に干渉しない断面として、長方形の矩形シールドが採用された(図-19)。本工事において円弧状隅角部と形鋼主桁を適用し、セグメントのコストダウンを図った。

b) 円弧状隅角部と形鋼主桁の適用

図-20のように内径 $r=800$ mmの円弧状隅角部をとり、直線ピースには形鋼主桁を用いた。

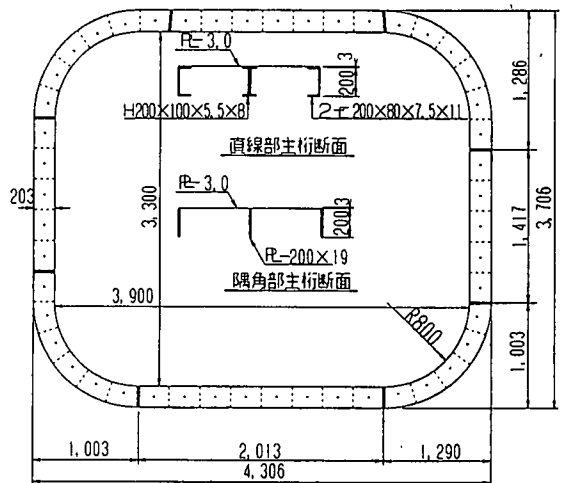


図-20 セグメントA断面図

セグメントのタイプは土被りの大きさにより、Aタイプ及びBタイプの2種類あり、それぞれの概要を表-6に示す。

内径 $r=800$ mmの円弧状隅角部による曲げモーメントの低減度は表-7に示すように、 $-Mmax$,

表-6 セグメントの諸元

	セグメントA	セグメントB
土盛り	7.0 m	3.8 m
主桁高さ	200 mm (3本主桁)	200 mm (2本主桁)
スラブプレート	3 mm	3 mm
直線部主桁	2[200×80×7.5×11 H200×100×5.5×8	2[200×80×7.5×11
隅角部主桁	主桁厚さ 19mm	主桁厚さ 19mm
分割数	8分割	8分割

表-7 円弧状隅角部による曲げモーメントの低減

r I	セグメントA (土盛り7.0m)			セグメントB (土盛り3.8m)		
	0 mm	800 mm	800/0	0 mm	800 mm	800/0
-Mmax	-141	-63	0.45	-97	-41	0.42
+Mmax	112	89	0.79	71	55	0.77

(モーメントの単位 : kNm)

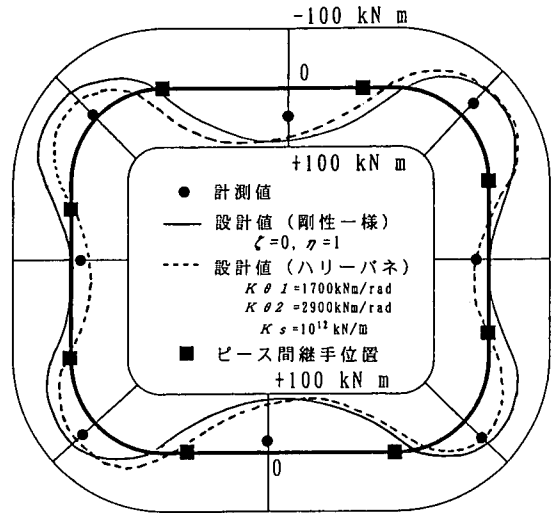
表-8 断面設計比較

	実施設計主桁構造			r I = 0、従来主桁とした場合の構造		
	主桁高さ	主桁厚	主桁断面積	主桁高さ	主桁厚	主桁断面積
隅角部	200 mm	19 mm 3本主桁 SM490	114 cm ² (100)	200 mm	38 mm 3本主桁 SM490	228 cm ² (200)
				300 mm	19 mm 3本主桁 SM490	171 cm ² (150)
直線部	200 mm	2[200 H200 3本主桁 SS400	89 cm ² (100)	200 mm	38 mm 3本主桁 SS400	228 cm ² (256)
				300 mm	19 mm 3本主桁 SS400	171 cm ² (192)

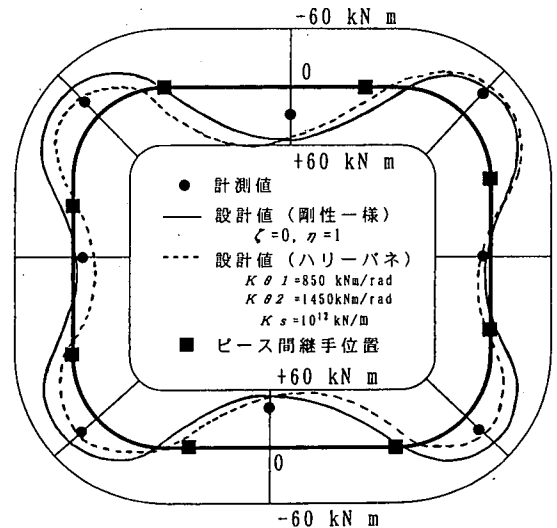
※ () 内の数字は、実施設計主桁断面積を100とした場合の比を表す

+Mmaxが円弧状を隅角部にしない場合 (r I = 0 mm) に比べて、それぞれ45%程度及び80%程度に低減する。

円弧状隅角部と形鋼主桁を適用した効果を以下に示す。実施設計においては、円弧状隅角部により断面力の低減を図り、直線ピースにおいては形鋼主桁を用いて、断面性能を向上させることによりコスト低減を図った。表-8は、円弧状隅角部を施さず (r I = 0 mm)、従来主桁とした場合の主桁断面を比較したものである。主桁高を実施設計と同じ 200 mm とした場合は、主桁厚みが38 mm となり、主桁鋼材量は、隅角部では実施設計構造の2倍、直線部では2.6



セグメントA



セグメントB

図-21 設計曲げモーメント分布と計測値

倍となる。また主桁厚さを実施設計と同じ19mmとした場合は、主桁高さが300mmとなり、主桁鋼材量は隅角部で1.5倍、直線部で1.9倍と主桁高さ200mmとした場合に比べて鋼材量は減るが、主桁高さを大きくすると、縦リブ等の部材の鋼材量が増え、シールドマシンの大きさも大きくなりマシン自体に加えて掘削土量等も増え、他の部分への波及効果が大きく全体コストが増大する。

これらは実施設計において適用した円弧状隅角部による断面力の低減と形鋼材主桁の利用による主桁

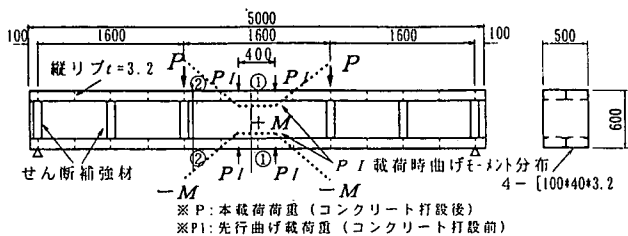


図-2 2 先行応力導入曲げ試験供試体

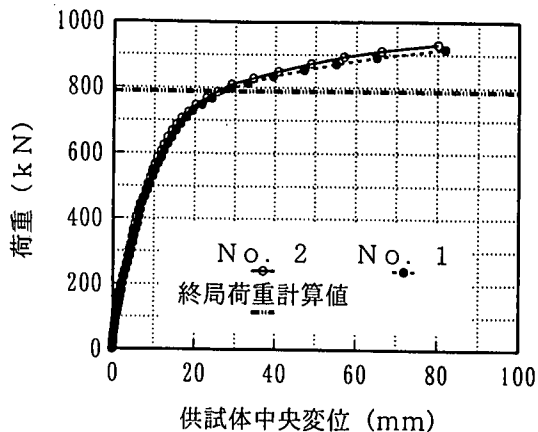


図-2 4 荷重-変位曲線

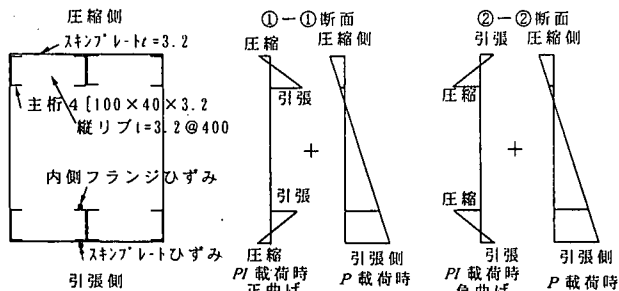


図-2 3 PI載荷時とP載荷時の供試体断面ひずみ分布

断面性能の向上の有効性を示すものである。

c) 計測結果

これら形鋼主桁の利用と円弧状隅角部を実施したセグメントの挙動を把握するため、2つのタイプのセグメント(タイプA(土被り7m, 3本主桁)及びタイプB(土被り3.8m, 2本主桁)にひずみゲージを貼付し、応力状態を計測した。図-2 1はそれぞれA及びBタイプのセグメントの剛性一様モデルとハリーバネモデルにおける計算曲げモーメント分布と、計測ひずみ(二次覆工前の計測値)から換算した計測曲げモーメントをプロットしたものである。計測値は、2つの方法を適用した計算値と比べいくらか小さいものの概ね類似しており、形鋼主桁と円弧状隅角部の適用において極端に高い応力度が発生するなどの弊害は見あたらぬ。なお、剛性一様モデルは、曲げモーメントの割増率 $\zeta=0$ 、曲げ剛性の有効率 $\eta=1$ としたものであり、ハリーバネモデルの回転バネ定数 $K\theta$ (離間前 $K\theta 1$ 、離間後 $K\theta 2$)は、村上・小泉の方法⁸⁾により算出し、せん断バネ Ks は剛結とした。

(2) 二次覆工利用の検証実験

鋼材にコンクリートを打設した部材は、適当なシアコネクタの存在により十分な耐力を有すること

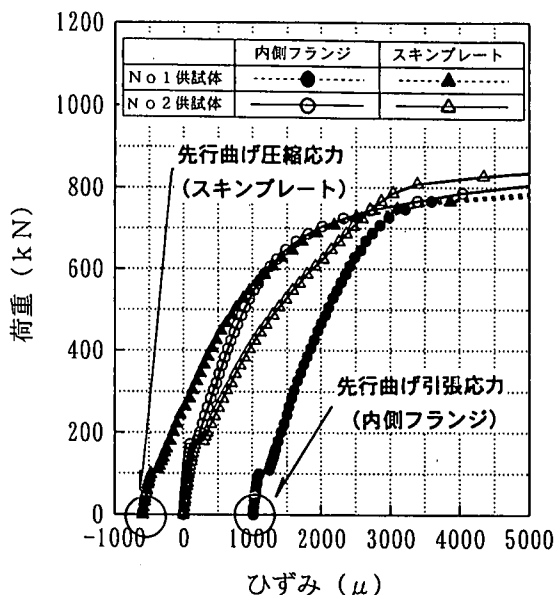


図-2 5 ①-①断面引張側部材の内側フランジ及びスキンプレートのひずみの挙動

はよく知られている⁹⁾。スチールセグメントのような構造の場合、主桁がコンクリート内に埋もれることや、縦リブの存在により、十分コンクリートとの付着、ズレ防止機能を有し、十分な耐力を有すると考えられる。ここでは、図-4に示すような、先行曲げ応力が発生したスチールセグメントにコンクリートを打設し、その部材が引張(圧縮)部材となる場合、その曲げ応力が部材耐力に与える影響は小さい。つまり前述した「仮設時の先行曲げ応力は本体設計時には重ね合わせなくてもよい」という設計法の根拠を検証するための実験を行った。

a) 実験概要

図-22の供試体 (No.1供試体) に次に示す方法で先行曲げ応力 (仮設時許容応力 210 kN/mm^2) を与え、コンクリート打設後2点曲げ載荷試験を実施し、先行曲げ応力を与えていない供試体 (No.2供試体) とを比較した。

①図-22または図-23の①-①断面内側フランジに先行曲げひずみ 1000μ (SS400材仮設時許容応力度 210 kN/mm^2 相当) を与えるためひずみ値を計測しながら、先行曲げ荷重 PI を載荷する。 PI の載荷位置については、スパン中央部 (①-①断面) の正曲げ $+M$ とせん断補強材位置 (②-②断面、 P の載荷点位置) の負曲げ $-M$ が同じ大きさとなる位置を選択した。 ($PI=50 \text{ kN}$)

②載荷した状態で供試体内部にコンクリートを打設する。

③コンクリート硬化後、ひずみを計測しながら PI を除荷する。

④先行曲げ応力が導入されたことを計測ひずみにより確認後、 P により2点載荷曲げ試験を実施する。

⑤比較用の先行曲げ応力が導入されていない供試体 (No.2供試体) も同時期に打設、養生し、 P による本載荷をおこない両供試体を比較する。

以上のように先行曲げ応力を導入し、No.1供試体 (先行曲げ応力導入) とNo.2供試体 (先行曲げ応力なし) との比較をおこなった。図-23に先行曲げ載荷重 PI と本載荷重 P による供試体断面ひずみ分布の概念図を示す。

b) 実験結果

図-24は P による本載荷時のそれぞれの荷重-変位曲線であるが、2つの供試体に顕著な差は生じていない。各供試体の部材耐力は、No.2供試体 931 kN 、No.1供試体 916 kN であり、両供試体ともスキンプレート及び主桁を鉄筋とみなし、材料試験結果 (鋼材降伏点応力度 $\sigma_y = 329 \text{ kN/mm}^2$ 、コンクリート圧縮強度 $\sigma_{ck} = 42 \text{ kN/mm}^2$) より求めたRCの終局耐力 $P_u = 788 \text{ kN}$ を上回った。また、図-25は両供試体の中央部 (①-①断面) の引張側内フランジとスキンプレートのひずみの挙動を示している。 1000μ の先行曲げ引張応力を導入されたNo.1供試体の内側フランジのひずみは早期 ($P \approx 300 \text{ kN}$ 、降伏ひずみ $\epsilon_y = 1567 \mu$) に降伏ひずみに達するが、この時には先行曲げ圧縮応力を導入されたスキンプレートのひずみは、たかだか 150μ 程度であり、これらの降伏領域に達していない部分の存在により内フランジのひずみは降伏点に達しても、ひずみが流れる (ひずみ増分が増大する) ことはなく、ひずみが大きく流れる荷重は、No.2供試体と大きな差がない結果と

なっている。このように実験実施前に仮定した「仮設時に導入された先行曲げ応力は、引張応力が生じる部分があれば、圧縮応力が生じる部分もある。それらの部材が引張力を受けた場合、先行引張応力部分は早期に降伏ひずみに達するが、先行圧縮部分はまだ弾性域にあるため、変位が増大することはない。先行圧縮部分も含めて全断面が降伏ひずみに達してはじめて、変位が増大することになり2つの供試体の部材耐力に顕著な差は見られない。」という現象を検証する結果となった。

なお、梁高を大きくした他の実験においても同様の結果が得られている。¹⁰⁾

7. まとめ

(1) 曲げモーメントが卓越する矩形スチールセグメントにおける合理的設計として以下の3手法について述べた。

①直線部ピース主桁への形鋼材の利用による断面性能の向上 (材料の利用)

②隅角部を円弧状 (円弧状隅角部) にすることによる断面力の低減 (形状の工夫)

③二次覆工の本体利用 (設計の考え方)

このうち①及び②は矩形形状の特徴を利用したものであり、③は円形をはじめ他の形状でも適用可能である。

(2) 断面性能の高い形鋼材を主桁に利用することは、セグメントの鋼重、桁高さを低減させることに有効である。スキンプレートの有効幅に関しては、実験を実施した供試体においては、通常用いられている 25 t 以上 (負曲げ状態ではスキンプレート全幅を考慮できる) を有効幅として考慮できる結果となったが、今後種々供試体の実験により合理的な有効幅を設定する必要がある。

(3) 隅角部を円弧状隅角部にすることは、断面力を大きく低減でき、非常に有効な手段である。円弧状にした部材の応力分布は直線部材と異なるため、それらを考慮することが必要である。

(4) 実工事において、形鋼主桁の利用と円弧状隅角部を適用し、セグメントの設計をおこなったところ鋼重、主桁高さの低減に効果があった。また、応力状態を確認するために実施工に際して、計測を実施したが、設計値と比較しても、形鋼主桁と円弧状

隅角部適用の弊害は見あたらなかった。

(5) 先行曲げ応力を導入した供試体と導入していない供試体とを比較することにより、先行曲げ応力は部材耐力に大きな影響を与えないことを実験により確認した。二次覆工の本体利用時に、これらの性状を設計に取り入れ、仮設時の曲げ応力を完成時考慮しないことにより、セグメント鋼材、桁高さを必要最小限に抑えることができる。

(6) 矩形断面スチールセグメントの合理的設計に対して形鋼材の利用(材料の利用)、円弧状隅角部の採用(形状の工夫)、二次覆工の利用(設計の考え方)の3つの提案をおこなった。条件や種々の要因により、それらの効果度は異なると思われるが、それらを適切に利用することにより部材厚や鋼材量が低減し、矩形スチールセグメントのコストダウンの可能性を示すことができた。

参考文献

- 1) 多田幸司, 谷口徹, 古川浩平, 中川浩二: ボックスシールド機の開発と施工性に関する実験的検討, 土木学会論文集, No. 480/VI-21, pp. 157-166, 1993. 12.
- 2) 多田幸司, 中川雅弘, 古川浩平, 中川浩二: ボックスシールド工法における裏込め注入に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 504/VI-25, pp. 51-60, 1994. 12.
- 3) 谷口徹, 請川誠, 多田幸司, 中川浩二: 円弧状隅角部を持つ矩形コンクリートセグメントの設計と載荷試験結果, 土木学会論文集, No. 595/VI-39, pp. 17-26, 1998. 6.
- 4) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, 1996.
- 5) 篠原洋輔, 小林正典, 大西元, 小泉淳, 永井亮: 隅角部に曲率をもつ矩形シールドトンネルの力学的挙動について, 土木学会第52回年次学術講演会, III, pp. 178-179, 1997. 9.
- 6) 土木学会: 構造力学公式集, pp. 61, 1986.
- 7) 吉川正, 田中耕一, 小坂琢郎: 矩形シールドトンネル覆工構造の開発, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 1933-1934, 1998. 7.
- 8) 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継手の挙動について, 土木学会論文集, No. 296, 1980.
- 9) 土木学会: 鋼コンクリートサンドイッチ指針(案), コンクリートライブラリー73, 1992.
- 10) 七條哲彰, 齋藤亮, 請川誠, 古賀律勝: MMS工法における合成構造部材の仮設時曲げ応力の影響, 土木学会第53回年次学術講演会, V, pp. 828-829, 1998. 10.

(1999. 6. 22 受付)

PROPOSAL AND VERIFICATION OF EFFECTIVE STRUCTURE AND DESIGN FOR RECTANGULAR STEEL SEGMENTS

Makoto UKEGAWA, Toru TANIGUCHI, Minoru MOTOKI
and Koji NAKAGAWA

In this paper, the authors made three proposals for effective design (application of steel sections to main beams, adoption of rounded corners and utilization of secondary linings) for rectangular steel segments. Reference was also made to some considerations during the actual design of rounded corners and to the cost involved. Then the design concept, verification tests, application to actual construction and measurement results are described.