

VI-1

シールド工法におけるセグメント間継手部の形状最適化に関する研究

室蘭工業大学 学生員 越谷 学、 正 員 杉本博之
ハ ザ マ 正 員 須田清隆、 正 員 小野正樹

1. まえがき

現在、経済成長により急速な発展を遂げた我が国の都市部では、人口の集中化・過密化等に伴い、都市の整備が追いつかないという問題が生じ、その早急な対策が重要視されている。都市整備に関しては複数の問題が存在するが、中でも上下水道等の地下埋設物の整備は、特に急を要する問題といえるであろう。しかし、発達した都市部においてこのような構造物を施工・構築する場合、交通流の煩雑、地上構築物の過密、騒音等の住民生活への支障、等の問題が生じるため、従来の施工法によってこれを行うのは困難である。そこでこのような問題点を満足する施工法としてシールド工法が注目され、我が国の都市土木において、このシールドトンネル工事は最も重要な土木技術事業の一つとして考えられている。この工事では、掘削技術の進歩が著しく発達し、その自動化が急速に進められているが、実際の現場におけるセグメントの組立および連結は、人力主体のボルト締結により行われており、この作業がシールドトンネル工事の自動化、施工の急速化に相反した影響を与える要因の一つにもなっている。また、このセグメント相互間のボルト締結という作業は、手間がかかると同時に、漏水を生じやすいという欠点も抱えており、これらの要因は、これから先、更に頻繁に利用されることが予想されるシールドトンネル工事においては、早急に解決しなければならない重要な課題であると考えられる。そこで、このようなさまざまな問題点に対し、シールド工事におけるセグメントの自動組立による省力化施工、急速化施工、更には遮水構造を目的としたボルトレス構造の新しいタイプのシールドトンネル用セグメントとしてNMセグメント(New Mechanically-jointed Segment)が開発された。このNMセグメントについての詳しい説明は2. に記述するが、特にこのセグメントは、周囲にH形状の鋼枠を配し、その内部にコンクリートを組み込んだ、鋼材の引張強度とコンクリートの圧縮強度を利用した合成構造となっている。また、セグメント間およびリング間継手部においては、従来の人力主体のボルト式継手を採用せずに、H形状のフランジ相互を嵌合方式により連結させるという点に特徴を持っているが、この継手部は、その形状から内圧に対する抵抗力が弱いという問題点を抱えている。そこで本研究においては、施工の急速化・省力化を目的としたフランジ相互をかみ合わせ方式とした内圧への抵抗性も確保できる最良の継手形状の開発という点に重点を置き、このNMセグメントのセグメント間継手部において、相互に抜けにくく、また変形に強いフランジ継手形状を提案し、その形状最適化^{1) 2)}を行うことを目的としている。

2. NMライニング工法(New Mechanically-jointed Segment Tunnel Lining Method)について

NMセグメントとセグメント間継手部の構造を図-1、図-2に示す。図-1のように、このNMライニング工法は、漏水を完全に防止することを発想の原点として、施工の急速化等に対応するために開発されたボルトレスセグメントである。そのセグメント本体部は、4辺を囲むH形状の鋼枠材、内部の無筋を基本としたコンクリート、外周を覆う鋼製スキンプレートからなる構造をしており、優れた断面性能と止水性を有している。また、セグメント間・リング間継手部においては、鋼枠のフランジ面を直接嵌合させる構造を採用することにより、添接効果が十分に発揮でき、リング間せん断耐力の向上が実現可能である。また、セグメント間継手部構造は嵌合部の止水シールと空隙に充填するモルタルで止水性を確保する形状をしており、

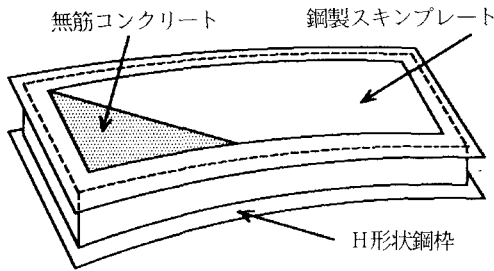


図-1 NMセグメント

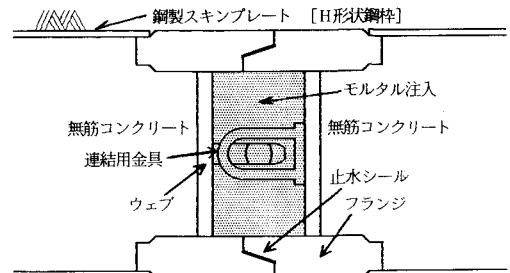


図-2 セグメント間継手部構造

リング間継手部構造についても同様の形状をしているが、カップラーによる結合方式を導入する場合もある。次に、この工法の特徴としては、①自動組立に適したボルトレス継手の採用、すなわちセグメントの組立が簡単かつ迅速にでき、自動化が容易に図れ、また、ボルト孔による継手部の断面欠損がないために全断面有効に活用することが可能、②合成セグメント並みの曲げ耐力を有した鋼棒、コンクリート構造となっているため、真円度に優れ、隣接したセグメントどうしの添接効果によって、曲げモーメントを確実に伝達することが可能、③高水圧化での止水に対する高い信頼性、すなわち継手部における鋼棒相互の溶接接合と外周を覆うスキムプレートによって、半永久的な遮水構造の確保が可能、④組立の高速化による工期短縮と覆工厚の薄肉化による掘削断面の低減ということから工事費（残土処分・立坑等）や用地費等の総合的な建設費の節減が可能、等が挙げられる。また、荷重の伝達については、フランジ嵌合部とそこに充填されたモルタルを介して行われるが、特にセグメントに作用する断面力のうち、軸力とリング中心方向せん断力は連結部材のせん断抵抗力により隣接セグメントに伝達し、曲げモーメントはリング間せん断力を介して千鳥配置された添接セグメントへ伝達する仕組みになっている。以上より、このNMセグメントは従来のセグメントに対して、画期的なセグメントであるといえるが、このセグメントにおける問題点としては、セグメント間継手構造部において、内圧への抵抗力が図-2に示すようなフランジ形状をしていることから比較的弱く、この内圧の大きさによっては、フランジ嵌合部が開いてしまうというような問題を生じる恐れがある。

したがって、この継手部に対して、簡便な形状で、かつ内圧への抵抗性も確保した構造を確立する必要性があるのではないかと考えられる。

3. 本研究により提案するセグメント間継手構造

図-3に、本研究により提案するNMセグメント継手部の構造を示す。特にこの継手部形状については、施工性を高めることを前提として提案するものであり、実際にセグメントの施工法としては、セグメント間の連結についてはスライド式にセグメントをはめ込むことにより行い、リング間の連結については押し込みにより連結させる方式を採用しようというものである。また、本研究では、継手部の構造自体はセグメント間・リング間とも同一形状としているが、このNMセグメントにおけるセグメント間・リング間の2つの継手部に対し、その要求される継手部強度の算定を行うに当たりそれぞれリング間継手部では、シールドトンネル外圧に耐え得る抵抗力をその必要強度として設計を行うこととし、またセグメント間継手部には、セグメント本体が抵抗できる力以上の強度は必要ないということから、セグメント間継手部の必要強度をシールドトンネル内圧への抵抗性の確保として設計するよう設定した。以上のようなことより、ここで提案するセグメント間継手構造としては、図-2に示す従来のセグメント間継手部

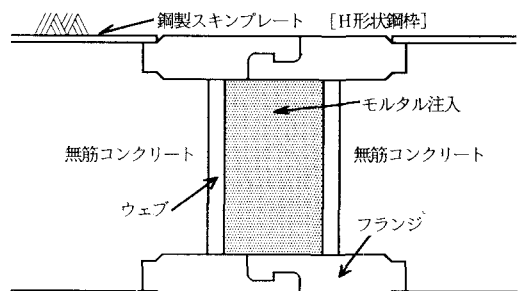


図-3 本研究により提案する継手部構造

において使用されていた連結用金具の使用を取りやめ、嵌合方式を採用するフランジ形状に着目して、フランジ相互のかみ合わせにより内圧への抵抗力を保持することが可能と考えられる新たな形状を提案するものである。また、図-3に示すように、セグメント間継手部の連結時におけるフランジ相互のはめ込みやすさ、また変形に対する抵抗性、すなわち抜けにくさを考慮した継手部形状として、前者に対してセグメント間継手部のフランジ形状の一部に曲線部を設け、また後者に対してはフランジ相互の接触面となる隅角部を直線とすることでこれを満足した。したがって、ここで提案するセグメント間継手部構造においては、嵌合方式を採用するフランジ相互のかみ合わせによって得られる抵抗力とその空隙に充填されるモルタルにより、継手の一体化が図られ、シールドトンネル内圧に対する抵抗力を保持することが可能となる。また、これと同時に止水性に対してもそれを確保することが可能であると考えられる。

4. 形状最適設計問題の定義

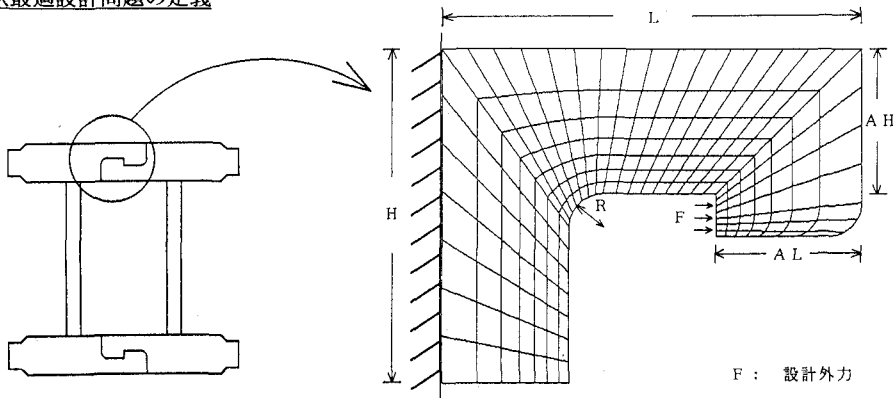


図-4 セグメント間継手モデル

本研究においては、セグメント間の連結を、継手部におけるフランジ嵌合部のかみ合わせにより行うことから、このフランジ嵌合部の形状最適化を目的としている。そこで、本研究のセグメント間継手部の形状最適化における有限要素モデルを図-4に示す。

この継手部モデルにおいて、本研究の最適設計問題は下記のように定義される。

$$\text{目的関数} : F(X) = |\sigma_{\max}| \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{設計変数} : X = \{AL, AH, R\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} L/5.0 &\leq AL \leq (L-20.0)/2.0 && (\text{mm}) \\ H/3.0 &\leq AH \leq (H-5.0)/2.0 && (\text{mm}) \\ 3.0 &\leq R \leq L/6.0 && (\text{mm}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、目的関数の設定については、継手部では左右対称のフランジを嵌合させることにより連結させることから、この嵌合部に荷重を図-4に示す方向に作用させ、このときにセグメント間継手の内側形状部に発生することが予想される最大応力度の緩和を対象として式(1)のように設定している。また、この応力度の算定については、形状最適化を行うセグメント間継手部の有限要素モデルの分割された各要素において、9つのガウス積分点により照査される。次に、設計変数は、図-4に示す継手部フランジ形状に対して、AL、AH、Rの3つとし、フランジ厚Hおよび長さLは各設計条件において定数として扱うように設定している。更に設計変数の上下限值については式(3)のように設定した。以上より、本研究では上記のように目的関数を設定したことにより、制約条件はないものとして、継手フランジ断面に発生する最大応力度の最小化という単一目的の無制約問題として取り扱うものとする。

ここで、本研究の無制約問題に対して使用した最適化手法は、可変計量法(BFGS)³⁾である。また、

解析仮定は、2次元平面歪状態とし、セグメント幅を1.2 (m)、ポアソン比0.3、ヤング係数は 2.1×10^6 (kgf/cm²)として形状最適化を行っている。

5. 数値計算例

ここでは、セグメント間継手部に作用する設計外力の算定を行い、この設計外力に対して定数として設定するフランジ厚Hおよび長さLを様々変えて、この設計外力に対する継手部の形状最適化を行った。

(1) 設計外力F (tf)の算定

継手部に作用する設計外力Fの算定については、特に図-5に示すようにセグメント間継手部に、曲げモーメントM=20.0 (tf・m)、軸力N=50.0 (tf)が作用するものと仮定して、下記のような計算により求めた。

$M = 2 \times P \times d / 2 = P \cdot d$ より $P = 20 / d$ (d:セグメント高さ) (4)

したがって、

$\therefore F = P + N / 2 = P + 50 / 2$ (5)

ここで、式(4)、(5)におけるdは、セグメント高さを表し、ここでは40~60 (cm)の10 (cm)刻みの3種類を設定した。このときの各セグメント高さdに対する設計外力Fの値を表-1に示す。また、継手部に作用する設計外力Fについては、フランジ厚60~80 (mm)では、荷重条件A、Bの2種類を行ない、フランジ厚90 (mm)の場合には荷重条件A、B、Cの3種類とも考慮するものとする。

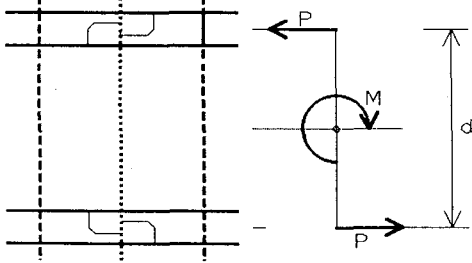


図-5 継手部作用断面力

表-2 フランジ厚と長さの関係

フランジ厚 (mm)	長さ (mm)						
	60	70	80	90	100	110	120
60	○	○	○	○	○		
70		○	○	○	○	○	
80		○	○	○	○	○	
90			○	○	○	○	○

表-3 各設計条件における最大応力度 (kgf/mm²)

フランジ厚 (mm)	荷重 (tf)	長さ (mm)						
		60	70	80	90	100	110	120
60	58.3	25.55	23.69	22.62	22.04	21.32	—	—
	65.0	28.48	26.42	25.22	24.55	23.77	—	—
70	58.3	—	21.36	20.11	19.40	18.85	18.43	—
	65.0	—	23.82	22.42	21.63	21.02	20.55	—
80	58.3	—	19.60	18.32	17.50	16.98	16.55	—
	65.0	—	21.85	20.42	19.55	18.93	18.45	—
90	58.3	—	—	16.95	16.07	15.49	15.10	14.75
	65.0	—	—	18.90	17.92	17.27	16.84	16.45
	75.0	—	—	21.81	20.68	19.93	19.43	18.98

表-1 設計外力

d (cm)	P (tf)	P+N/2 (tf)	荷重条件
60	33.3	58.3	A
50	40.0	65.0	B
40	50.0	75.0	C

(2) 計算結果の考察

本研究で実際に設定したフランジ厚Hおよび長さLの関係を表-2に示す。また、各設計条件における最適化後の目的関数の最大応力度σ_{max} (kgf/mm²) 値を表-3に、このときの最大応力度に対してフランジ厚別に最大応力度σ_{max} と長さLの関係を表すグラフを図-6~図-9に示す。更に、本研究で行った各設計条件に対し、設計変数R、AHと長さLの関係を図-10、図-11に示す。ここで設計変数ALについてはすべての設計条件下において上限値になっていた。これらの計算結果より、この最適化における傾向としては設計変数Rについては、各設計条件において定数として与える長さLが短い場合には、下限値として設定した3.00 (mm)になっているが、長さLが長くなると設計変数Rの値が大きくなるという傾向が見られ

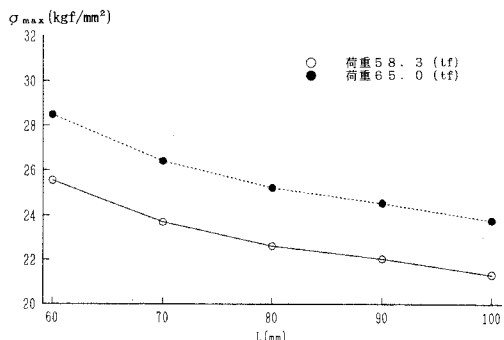


図-6 最大応力度 $\sigma_{\max}$ と長さLの関係
(フランジ厚H=60(mm))

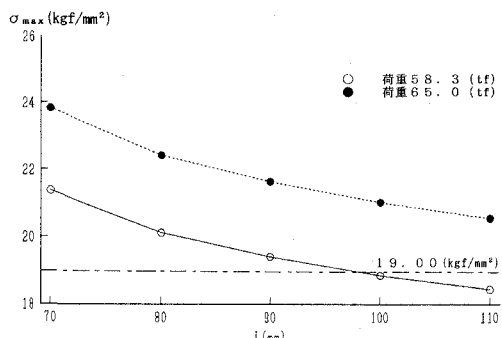


図-7 最大応力度 $\sigma_{\max}$ と長さLの関係
(フランジ厚H=70(mm))

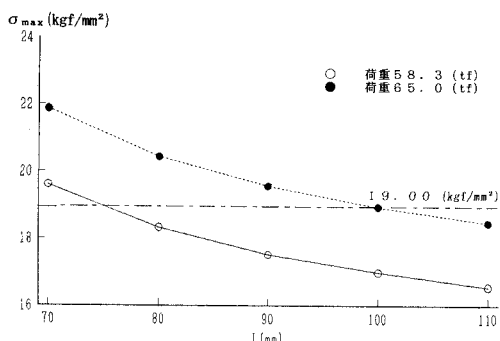


図-8 最大応力度 $\sigma_{\max}$ と長さLの関係
(フランジ厚H=80(mm))

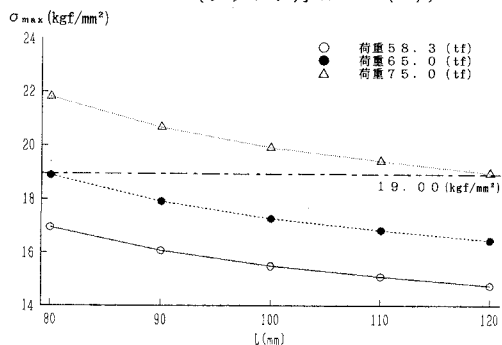


図-9 最大応力度 $\sigma_{\max}$ と長さLの関係
(フランジ厚H=90(mm))

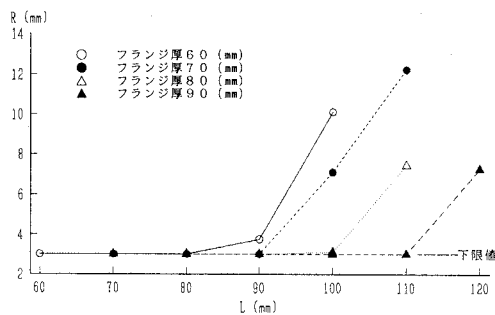


図-10 設計変数Rと長さLの関係

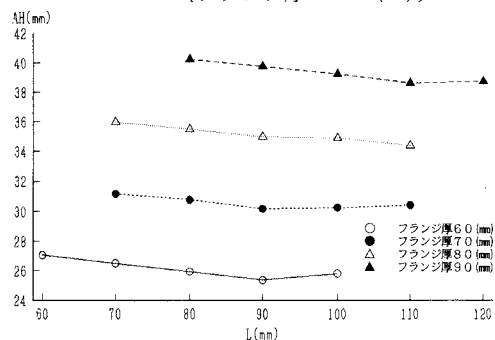


図-11 設計変数AHと長さLの関係

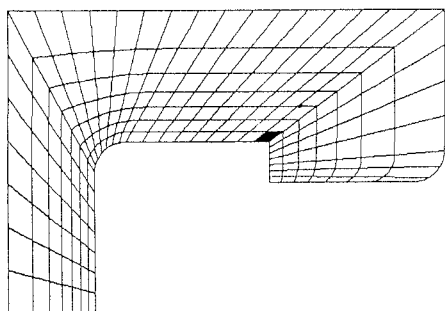


図-12 最適形状(設計例1)

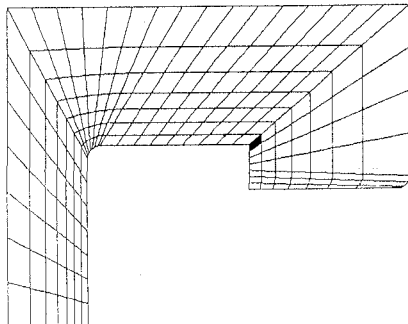


図-13 最適形状(設計例2)

た。また、設計変数AHについては、長さLが長くなるにつれ若干小さくなる傾向が見られるが、その値が大きく変動するというようなことはなかった。以上より、定数である長さLが長くなると、この設計では、設計変数Rへの依存性が高くなると考えられる。次に、本研究における形状最適化に伴い、目的関数である最大応力度がどの程度緩和されたのかについて、荷重条件A、Bより各1ケース取りあげ、このときの初期形状と最適形状の比較を行った。

i) 荷重条件Aの場合（設計例1）

ここでは特に、フランジ厚70mm、長さ100mmの場合を数値計算例として取りあげる。まず、このときの最適形状を図-12に、また、初期形状と最適形状における最大応力度と設計変数の値を表-4に示す。表-4より目的関数である最大応力度 σ_{max} に関しては、初期形状では25.57 (kgf/mm²)

表-4 設計例1の結果の比較

		初期形状	最適形状
最大応力度 (kgf/mm ²)		25.57	18.85
容 積 (mm ³) (×10 ⁷)		0.588	0.504
設計変数 (mm)	A L	30.00	40.00
	A H	27.00	30.24
	R	8.00	7.11

表-5 設計例2の結果の比較

		初期形状	最適形状
最大応力度 (kgf/mm ²)		21.46	18.93
容 積 (mm ³) (×10 ⁷)		0.672	0.576
設計変数 (mm)	A L	30.00	40.00
	A H	35.00	34.40
	R	8.00	3.00

であったものが、最適形状では18.85 (kgf/mm²)となっており、この最適化により約26%の改善が見られた。更にこのときの総容積についても約14%改善されている。また、この最大応力度は図中の黒塗り要素において発生していた。次に、設計変数の値を比較してみると、初期形状での値に対し、最適形状ではALは上限値となっており、Rの値には余り変化は見られなかった。

ii) 荷重条件Bの場合（設計例2）

ここでは、フランジ厚80mm、長さ100mmの場合を、数値計算例として取りあげる。このときの最適形状を図-13に、また、初期形状と最適形状における最大応力度および設計変数の値を表-5に示す。この場合では、目的関数である最大応力度 σ_{max} は、初期形状では21.46 (kgf/mm²)であったものが、最適形状では18.93 (kgf/mm²)となり、約12%の緩和が見られ、また、総容積についても約14%の改善が見られた。このときの最大応力度の発生要素は図中の黒塗り要素である。次に設計変数については、i)の場合と同様に最適形状においてはALは上限値になっていた。しかし、設計変数Rについては初期状態とは大きく変わり、下限値3.00 (mm)になっていることから、この設計条件下では曲線部は最大応力度の緩和には影響していないものと考えられる。

6. あとがき

本研究では、シールド工法においてフランジ相互を嵌合方式により連結させるという特徴をもつNMセグメントのセグメント間継手構造に対して、従来の継手構造では内圧に対する抵抗性が弱いと考えられることから、新たにこの継手部の必要強度を内圧への抵抗性の確保としたフランジ相互にはめ込みやすく、また抜けにくい継手形状を提案し、そのセグメント間継手フランジ嵌合部の形状最適化を行った。

その結果、得られた数値計算例から、最適化を行った継手部モデルにおいては、目的関数として設定した最大応力度の緩和も十分なされ、セグメント間継手部構造に対し満足できる最適化を行うことができた。

参考文献

- 1) 杉本博之・杉村朋之：連続体の形状最適化プログラムに関する基礎的研究、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、p.579-584,1991.
- 2) 杉村朋之・杉本博之・山村和人・若松浩一：連続体の形状最適化に関する基礎的研究、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第1部、pp16-17,1991.
- 3) 土木学会：構造システムの最適化～理論と応用～、構造工学シリーズ1、1988.