

中子形セグメントの背板有効幅に関する実験的研究

Evaluation of effective width of skin plate on box-type RC segment

助川 禎*, 藤木 育雄**, 木村 定雄***, 小泉 淳****
Tadashi SUKEGAWA, Ikuo FUJIKI, Sadao KIMURA, Atsushi KOIZUMI

Bending test and lateral loading test of the box-type RC segment, with 9500mm external diameter, 1200mm wide, 530mm high of main girder, and 230mm thickness of skin plate, are conducted so as to determine the effective width of the skin plate. It is confirmed that whole skin plate works against bending because plane sections including skin plate before bending remain plane after bending (Bernoulli's principle). On the other hand, stress state of skin plate under the lateral load is found to be the same with the half-infinite 2-dimensional elastic plate subjected to in-plane varying lateral load, hence the effective width can be determined focusing on the stress state.

Keyword : box-type RC segment, effective width of skin plate, bending test, lateral loading test, design of segment

1. はじめに

コンクリート系箱形（中子形）セグメントは主桁と縦リブとが格子桁を構成し、背板が直接土水圧等の主荷重を面的に受け、格子桁に力を伝達する構造となっている（図1参照）。また、セグメント継手に長軸ボルトを用いることにより継手金物が削除できるとともに、二次覆工を施す必要がないため、鉄道トンネルのように断面が大きく、主桁高さに厳しい制約を受けない場合、中子形セグメントは経済効果の良いセグメントとなる。

このため、帝都高速度交通営団（以下、営団と略称する）においてシールドトンネルを構築する場合、これまで覆工の主体として中子形セグメントを標準的に採用してきた。また、これまでに各種実験や解析に基づいて中子形セグメントを改良し、より合理的かつ経済的なセグメントの開発を行ってきている。表1は、これまでの営団における中子形セグメントの改良の変遷を示したものである。

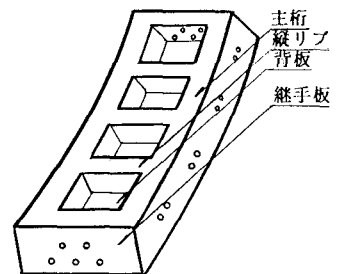


図1 中子形セグメントの概要

*	正会員	帝都高速度交通営団	建設本部
**	正会員	帝都高速度交通営団	建設本部 7号線本駒込工事事所
***	正会員	工修 佐藤工業(株)	中央技術研究所
****	正会員	工博 早稲田大学	理工学部 土木工学科

これをみると、当初、単線トンネルで 800mm、複線トンネルで 900mmであったセグメント幅は順次広げられ、7号線Ⅱ期（駒込以南）工事から1200mmを標準としている。また、セグメントの分割数についても単線で8から6へ、複線で10から8へ低減していることがわかる。

この流れを受けて、7号線Ⅱ期工事に際し、従来の中子形セグメントの縦リブを切欠いた構造のセグメント（縦リブ撤去式中子形セグメント）の開発を行った。このセグメントは複線シールドトンネルと島式ホームとを接続する内空調整区間において保守点検時の待避空間を確保するために用いるセグメントとして中子形セグメントを改良したものである。この開発は、縦リブ撤去式中子形および従来の中子形セグメントについて単体曲げ試験および推力試験を行い、それらの構造性能を比較し、確認するものであった¹⁾。
2)

本論文は、これに合わせて、従来企業体によって設計上の取扱いが異なっていた中子形セグメントの背板の有効幅についての検討を行ったものであり、従来の中子形セグメントを対象にセグメントの応力度計算、リング剛性計算を行う際の、背板の有効幅の算定方法について、その基本的な考え方を述べている。

表1 営団における中子形セグメントの改良の変遷

	号 線	5号線	9号線		8 号 線 (新當利以西)		11号線	8号線	7号線Ⅰ期	7号線Ⅱ期	
	年 代	S40～S41	S43～S44	S45	S47～S48	S52～S55	S50～S56	S60～S61	S64～H2	H4 ～	
複 線	セグメント 外径(mm)	—	—	9800	9800	9800	9800	9800	9800	9800	9500
	分 割 数	—	—	10	10	9	9	9	8	8	8
	セグメント 幅(mm)	—	—	900	900	900	900	1000	1000	1200	1200
	主 桁 高(mm)	—	—	600	550	550	550	550	550	550	530
単 線	セグメント 外径(mm)	6750	6500	6500	6500	—	6500	6700	6600	6600	
	分 割 数	8	8	7	7	—	7	6	6	6	
	セグメント 幅(mm)	800	800	800	900	—	900	1000	1000	1200	
	主 桁 高(mm)	300	350	350	350	—	350	350	350	350	

2. 背板の有効幅

中子形セグメントの設計は主桁、縦リブおよび継手板が背板の一部と協力して荷重に抵抗するものとして行っている。すなわち、通常の中子形セグメントの設計において、(a)土水圧、セグメント自重等の荷重に対してはセグメントの主断面は背板の一部を主桁と見なした断面を用いて応力度およびリング剛性の計算を行い、(b)ジャッキ推力に対しては背板の一部を縦リブまたは継手板と見なした断面を用いて応力度計算を行う。

現在、この背板の有効幅のとり方は企業体によって異なっており、以下に示すような方法がある。

(1) トンネル標準示方書（シールド編）・同解説の方法³⁾

トンネル標準示方書（シールド編）・同解説（以下、現示方書）における背板の有効幅は前述した (a) および(b) に対してそれぞれ式(1)、(2) から得られるとしている（図2参照）。

(a) に対して
$$b e = b_1 + b s + \ell / 8 \dots\dots\dots (1)$$

(b) に対して
$$b e = b_0 / 2 + b s + \ell / 8 \dots\dots\dots (2)$$

なお、この考え方は土木学会「コンクリート標準示方書（昭和55年版）」（以下、R C 示方書 S55年版）中のT形ばりの圧縮突縁の有効幅の考え方⁴⁾に準じたものである。

(2) 管囲の方法

先に述べた (a) のセグメント主断面の応力度およびリング剛性の計算に際して、背板の有効幅は背板幅全幅としている。すなわち、セグメントの主断面は主桁および背板の全断面を有効と見なしている。また、(b) のジャッキ推力に対しては現示方書と同じ式 (2) により有効幅を求めるが、 l' をセグメント幅としている。

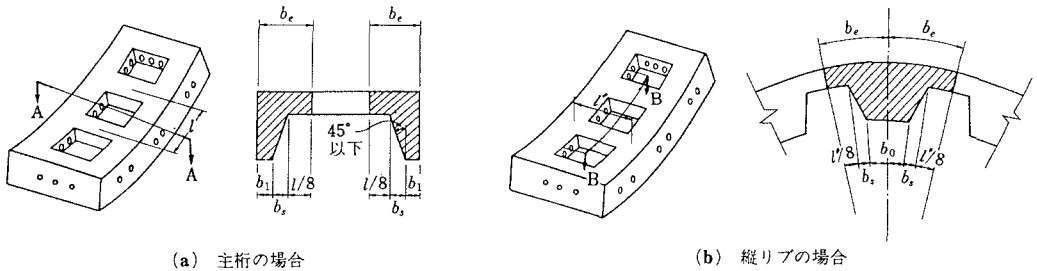


図2 現示方書の背板有効幅の考え方

3. 単体曲げ試験

3・1 単体曲げ試験の概要

単体曲げ試験の概要および各種計測機器の設置位置を図3に示す。この試験はセグメントの中央部付近が $P \cdot b/2$ なる純曲げを受ける2点荷重曲げ試験である。計測項目は鉛直方向および水平方向変位量、鉄筋ならびにコンクリートのひずみである。また、曲げ試験にともないセグメントが若干ねじれるような場合も考慮して、荷重状態がセグメントの中心から点対象となるA断面およびB断面において鉄筋およびコンクリートのひずみを計測した。なお、反力台の変形も考慮して、セグメントの支点変位量も計測している。

試験に用いたセグメントは外径9500mmの複線トンネル用中子形セグメントであり、その形状は幅、主桁高および背板厚がそれぞれ1200mm、530mm および 230mmである。なお、セグメント製作に用いたコンクリートは圧縮強度が 602 kgf/cm^2 、ヤング係数が $4.14 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。また、鉄筋は材質が SD345で、主桁主筋、背板側主筋、その他の鉄筋として各々 D19, D16, D13 のものを用いた。

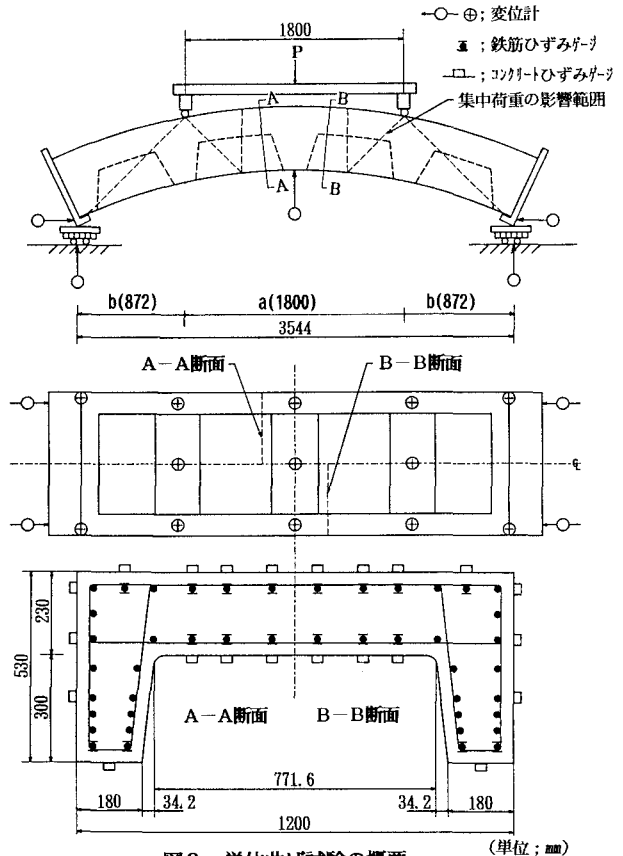


図3 単体曲げ試験の概要

(単位: mm)

3・2 単体曲げ試験結果およびその考察

試験の結果、ひびわれ発生荷重は20tonf、曲げ耐力は105.1tonfであった。単体曲げ試験における計測結果のうち、荷重と鉛直方向および水平方向変位量との関係を図4に示す。図中の計算値は背板を全幅有効と考えた場合および現示方書の式(1)による有効幅(片側の主桁あたり33.7cm)を用いた場合の計算結果であり、試験から得られたヤング係数を用いて計算した変位量である。なお、ひびわれ発生前の計算値は引張側のコンクリート断面も有効と考え、また、ひびわれ発生後の計算値は引張側のコンクリート断面を無視したRC断面として変位量を計算したものである。これらの計算値は、ひびわれの発生前、後、にかかわらず両者とも計測値とはほぼ一致している。

次に、鉄筋およびコンクリートのひずみ計測結果を図5a), b)に示す。この結果は、A断面およびB断面のセグメント中心から対象な位置において得られたひずみを平均して示したものである。また、図中の式は維ひずみ分布を最小二乗法の直線近似により求めたものであり、 r は、その相関を示している。これらの結果から、①から④の各々の断面における維ひずみ分布および全計測点のひずみを用いた維ひずみ分布は直線的であり、かつ、それらの維ひずみ分布がほぼ一致することから、セグメントの主断面はセグメント幅全幅にわたって平面保持の法則が成り立っているものと考えられる。

現示方書が準拠するRC示方書S55年版におけるT形ばりの圧縮

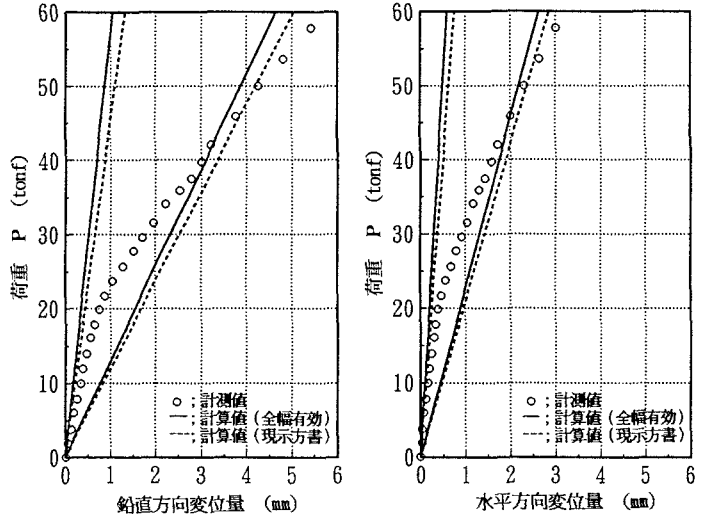


図4 荷重と変位との関係

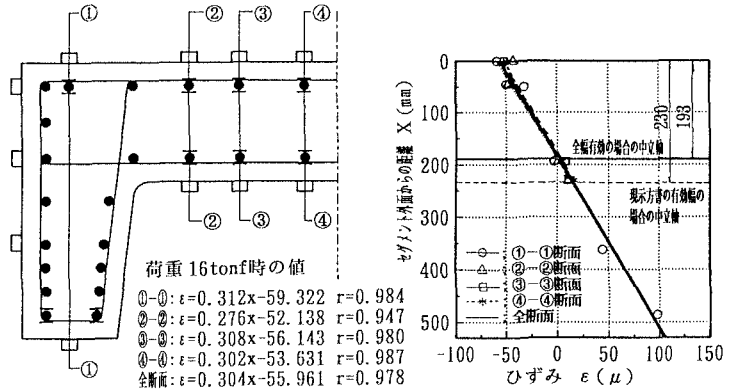


図5 a) 維ひずみ分布 (ひびわれ発生前)

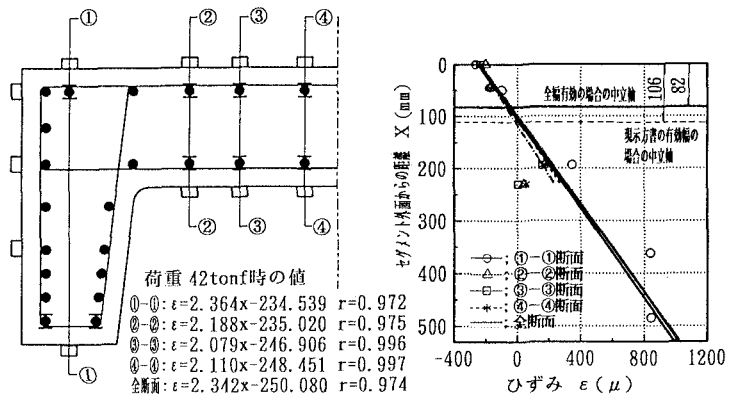


図5 b) 維ひずみ分布 (ひびわれ発生後)

突縁の有効幅の考え方では、単純ばりで支点間距離、また連続ばりで等分布荷重により作用する曲げモーメントの反曲点間距離を ℓ として、 ℓ が大きくなると有効幅が増大するものとしている。一方、土水圧等の荷重によりセグメントに作用する曲げモーメントは、縦リブ間隔に左右されるものではなく、縦リブ間隔を曲げモーメントの反曲点間距離とし、縦リブ間隔が大きくなると、背板の有効幅が増大するという考え方には疑問がある。さらに、セグメントには軸方向圧縮力が主に作用することを勘案すると、式(1)による背板の有効幅の算定はあまり合理的でないように思われる。なお、RC示方書においては、昭和61年の改訂以降、軸方向力に対しては全幅有効としている。

以上のことから、論拠の明確でない式(1)により背板の有効幅を決定するより、むしろ本試験結果からも概ね説明できるように、背板の有効幅は全幅とした方が妥当であると考えられる。

4. 推力試験

4・1 推力試験の概要

推力試験の概要およびコンクリートのひずみ計測位置を図6に示す。荷重は最大 300tonfまで載荷した。載荷荷重の重心は、セグメント厚さ方向ではセグメントの外側から24cmの位置に、またセグメント円周方向では図中の a 断面および b 断面となる位置にくるように載荷した。また、セグメント本体と載荷治具および反力底版との間には、接触面において荷重の伝播が均一になるように、厚さ 0.125mm のポリエステルフィルムを挿入した。なお、試験に用いたセグメントおよびその諸物性は単体曲げ試験に用いたものと同じである。

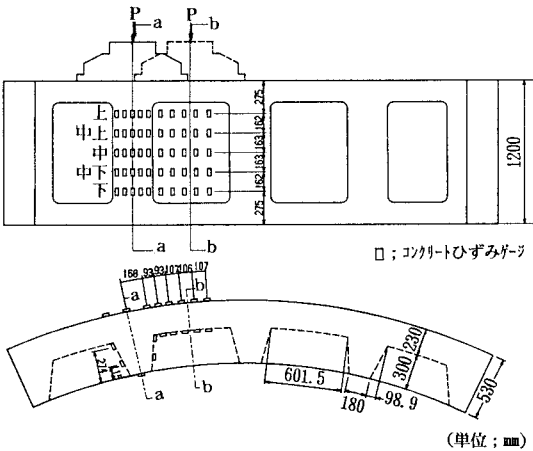


図6 推力試験の概要および計測概要

4・2 推力試験結果およびその考察

試験の結果、最大荷重 300tonfまで載荷してもセグメントにひびわれ等の異常は認められなかった。また、すべてのひずみ計測点において、荷重とひずみとの関係がほぼ直線的であり、荷重を除荷しても残留ひずみはほとんど認められなかった。このため、荷重とひずみとの関係を最小二乗法により直線近似し、最大荷重 300tonf時に換算した上、背板の外側と内側のそれぞれの縁ひずみを平均した。図7はその結果を示したものである。

また、図中の実線は HOLL, D. L. の方法⁵⁾に基づいて、半無限 2 次元弾性体の表面に堤状分布荷重が作用する場合の載荷方向ひずみの理論解を示している。この理論解は図8に示す載荷治具の形状から弾性体の表面に作用する荷重を図9のように堤状分布荷重にモデル化して式(3)から載荷方向応力度を計算し、その値を試験から得たコンクリートのヤング係数で除して求めた。なお、縦リブ中央に載荷した場合の p_0 はセグメントの載荷面における荷重の分布幅を78cmとし、この分布幅を用いて得られる背板部と縦リブ部との載荷面積比の割合から背板が分担する荷重を計算している。

$$\sigma_z = \frac{p_0}{\pi} \left[\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \frac{b}{a} (\alpha_1 + \alpha_3) + \frac{x}{a} (\alpha_1 - \alpha_3) \right] \dots\dots\dots(3)$$

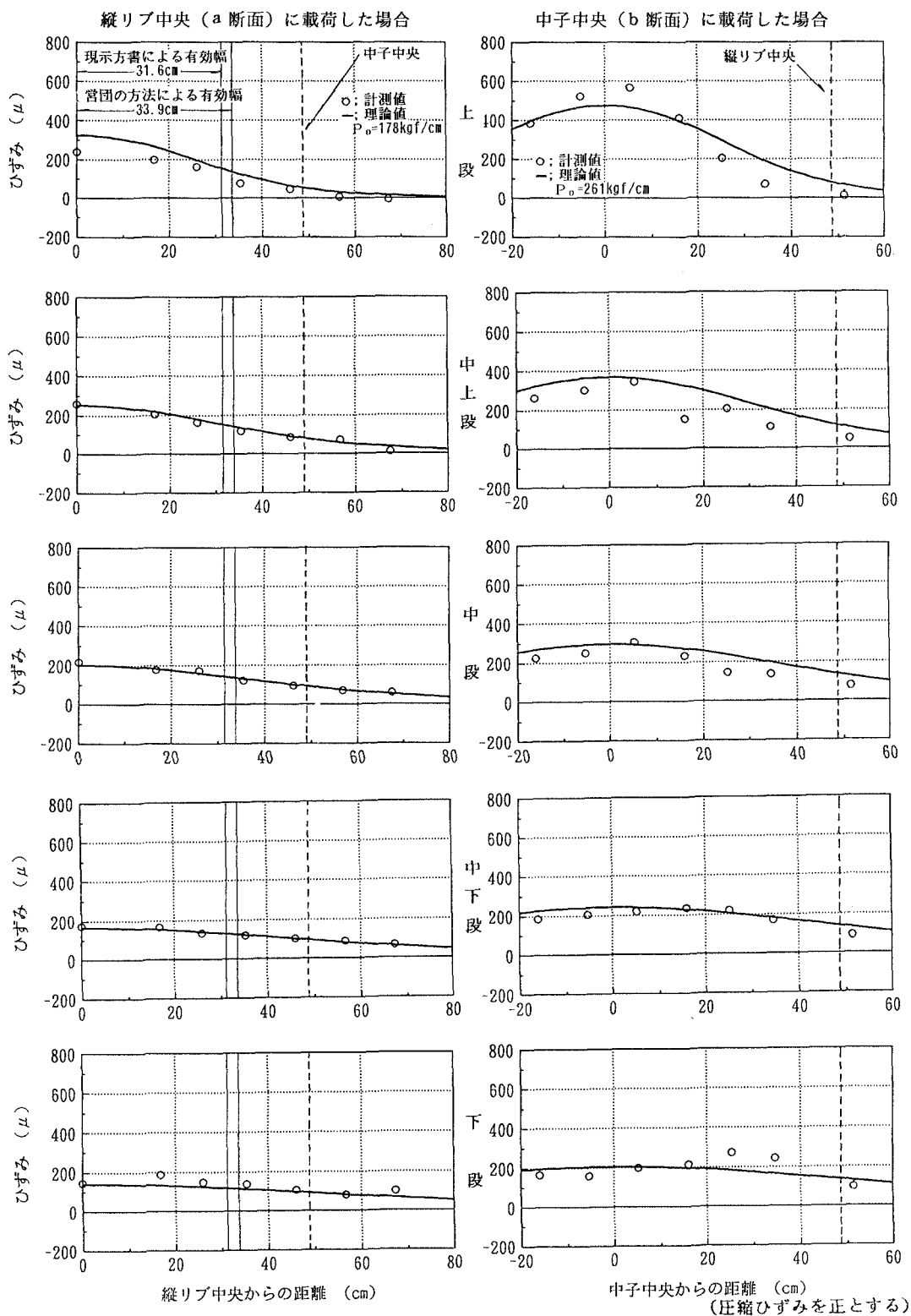


図7 推力载荷方向ひずみの分布 (荷重 300tonf時)

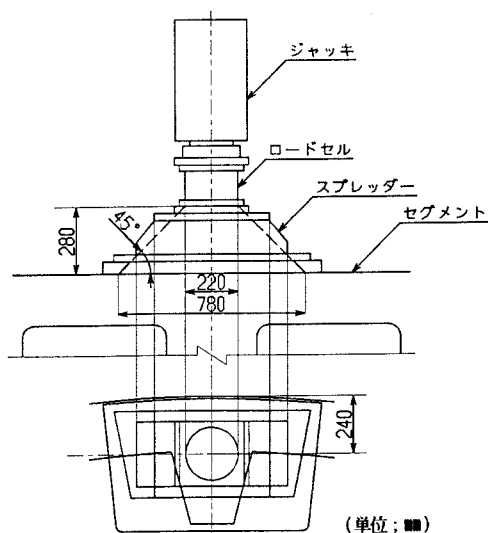


図8 推力载荷治具の形状

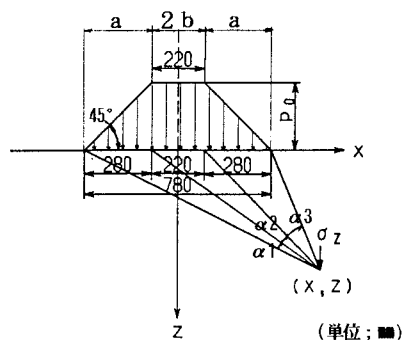


図9 推力荷重のモデル化

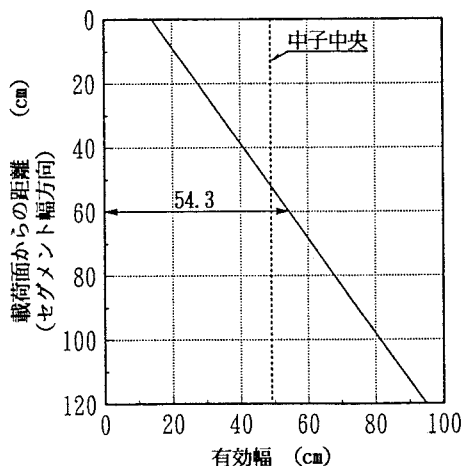


図10 理論解の最大ひずみを用いて逆算した有効幅

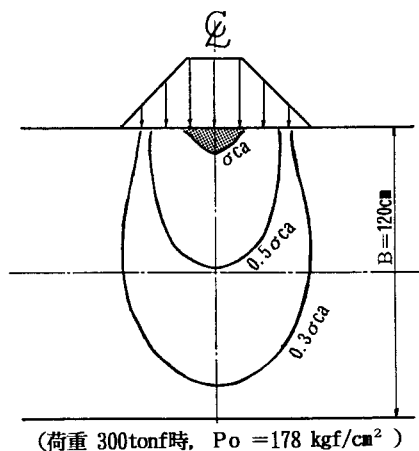


図11 理論解より得られる圧力球根

図7をみると、計測値と HOLL, D. L. の方法により求めた理論値とはよく符合している。これより、背板中の载荷方向の応力分布はジャッキの形状を考慮した堤状分布荷重を用いて、弾性理論解により把握できるものと考えられる。

次に、図10は縦リブ中央に载荷した場合の、载荷面からの距離と载荷中心直下の任意の点におけるひずみの理論値を用いて逆算した有効幅との関係を示したものである。これをみると、载荷面からの距離と有効幅とは直線的な関係にあり、平均的な有効幅はセグメントの中央で得られ、その値は約54cm（片側）である。また、図11は縦リブ中央に载荷した場合の圧力球根を示したものである。図中、 σ_{ca} はコンクリートの長期許容曲げ圧縮応力度（170 kgf/cm²）である。図中のシェーディングした領域は、許容応力度を越えるが、この領域は周辺からの拘束により破壊に至ることはない。また、セグメント幅の中央における応力度は約 $0.5\sigma_{ca}$ であり、セグメント中央における有効幅を圧縮に対する平均的な有効幅とみなしてもさほど問題がないと考えられる。

これらのことから、平均的な有効幅（片側54cm）は中子中央間の全幅（片側49cm）よりも大きく、圧縮に対する有効幅は、この全幅と考えても良いことがわかる。また、実際のセグメントの縦リブには偏心曲げが作用するが、一般に偏心量は小さく引張応力は発生しない。したがって、圧縮に対する有効断面は曲げに対しても有効と考えられるため、ジャッキ推力に対する背板の有効幅は中子中央間の全幅として良いと思われる。

一方、式(2)により背板の有効幅を算定する場合、セグメント幅 l が大きくなると、有効幅が増大することになり、推力によって生じる曲げモーメントの反曲点間距離をセグメント幅として有効幅を決定するという考え方には疑問がある。

以上のことから、ジャッキ推力に対する背板の有効幅は、中子中央間の全幅と考える方がより合理的であると思われる。

5. 結 論

中子形セグメント（セグメント外径；9500mm，セグメント幅；1200mm，桁高；530mm，背板厚；230mm）の単体曲げ試験および推力試験により、背板の有効幅を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 土水圧、自重等の荷重により、セグメントに曲げおよび軸力が作用する場合の主断面の応力度および剛性の計算にあたって、背板は全幅有効とみなした方が合理的である。したがって、セグメントの主断面は背板断面を含む全断面となる。
- (2) 縦リブ中央部に推力が作用する場合の応力度の計算にあたって、背板は縦リブ一本あたり縦リブを中心に両側の中子中央まで有効とみなした方が合理的である。

以上、得られた結論を述べたが、今後、本試験に用いた中子形セグメントと幅、主桁高、背板厚、または縦リブ間隔などの諸量が異なるセグメントについても同様の検討を行い、その妥当性をより詳細に検証することが望まれる。

6. 参考文献

- 1) 藤木，中村，秋山，秋田谷；縦リブ撤去式中子型セグメントの構造性能 (1) 曲げに対する性能，第47回土木学会年次学術講演会，Ⅲ-1，平成4年9月
- 2) 中島，藤木，白木，木村；縦リブ撤去式中子型セグメントの構造性能 (2) 推力に対する性能，第47回土木学会年次学術講演会，Ⅲ-2，平成4年9月
- 3) 土木学会；トンネル標準示方書（シールド編）・同解説，昭和61年改訂版，p57
- 4) 土木学会；コンクリート標準示方書（昭和55年版），pp64～65
- 5) 木村孟；土の応力伝播，鹿島出版会，pp77～80