

大深度地下のシールドトンネルにおける 鋼製セグメントの主桁の局部座屈に関する研究

Study on Local Buckling at Main Girder of Steel Segment
in Great Depth Shield Tunnel

甘粕雅俊¹・小泉淳²

Masatoshi Amakasu and Atsushi Koizumi

¹学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

Shield tunneling method, one of the excavation methods, expands of demand in underground space at great depth. In underground space at great depth, the ground is stable, and axial force generated in shield tunnel excels. Therefore, in case of using steel segments at great depth shield tunnel, we must take local buckling at main girder into consideration.

In this study, we prove local buckling at main girder of steel segment in great depth shield tunnel by experiment and Finite Element Method.

Key Words : local buckling, great depth shield tunnel, steel segment, Finite Element Method

1. はじめに

近年、主要都市部への人口集中による都市部の過密化に伴い、生活機能の効率化と環境整備の充足に力が注がれている。特に、通信・電気・ガス・上下水道などのライフラインと交通のための土木構造物の建設が大きく進展している。これらの構造物は、用地制限、環境保全、公害の防除および交通の阻害などの問題を考慮して、現在では地下に設ける場合がほとんどである。また、最近では景観の向上、道路工事の抑制、災害時における安全性などの理由から、道路の地下空間にライフラインを一体的に収納する共同溝の建設も都市部を中心に進められている。

この共同溝の建設は各種ライフラインの地下におけるコンパクト化にも役立っている。それでもなお、大都市部において特に道路下における中浅深度の地下空間の幅員化が進み、地下インフラの建設空間を確保することが非常に困難な状況になってきている。このため、今後の地下インフラの建設は大深度地下空間へと移行せざるをえない。

このような情勢から、平成13年4月1日より「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が施行され、大深度地下空間におけるインフラ建設の必要性

が再確認されるとともに、建設への着手が容易になった。このような状況において、シールド工法は周辺環境に与える影響が少なく、大深度地下への施工が可能であることから、大深度地下でのライフライン建設に多く利用される。そのため、シールド工法は、都市トンネルを構築する工法としてますます需要が増大している。

わが国におけるシールド工法の技術開発は、その需要の多い都市部でなされている。自立性に乏しい軟弱粘性土層、またはルーズで崩壊性の高い帯水砂層への対応を中心に進められてきた。しかし、比較的地盤の安定した大深度地下では、シールドトンネルに発生する断面力において、軸力が曲げモーメントやせん断力に比べて卓越している。そのため、鋼製セグメントを用いる場合には、軸力による主桁の座屈を考慮しなくてはならない。

実際に鋼製セグメントの設計に局部座屈の考慮もなされているが、安全率を高くとって対応しているため、主桁における局部座屈のメカニズムが明らかになれば、覆工厚および用いる鋼材の量を抑えることができ、安全性を確保しながら大きなコストダウンが達成できると考えられる。

本研究では、このような比較的地盤が安定した大

深度地下，すなわち，断面力において，軸力が曲げモーメントやせん断力に比べて卓越している施工空間を想定している．そこで，鋼製のセグメント主桁部分における局部座屈の挙動を実験および解析により，そのメカニズムを明らかにしようとするものである．

2. 鋼製セグメントに関する従来の考え方

これまでに行われてきた鋼製セグメントの主桁の設計は，構造計算によって求めた断面力に対し，局部座屈の影響を受ける板厚で設計すると，幅厚比（板幅／板厚）で許容応力度が変わり，設計が煩雑となるためシールド工用標準鋼製セグメント¹⁾では局部座屈の影響を受けない板厚を用いて設計している．しかし，シールド工用標準鋼製セグメントの中には局部座屈の影響を受ける主桁もあるため，許容応力度として非常に安全側に設計の基準を設定している．

その許容応力度を求める構造計算式¹⁾として主に用いられているのが，3辺単純支持1辺自由の圧縮力を受ける板に対する板座屈の理論である．

標準セグメントの主桁の厚さは，表-1に示すように局部座屈の影響を受けない幅厚比，JIS²⁾に示される鋼種および鋼板の市場性とを加味して定められている．

表-1において，

$$f = 0.65\phi^2 + 0.13\phi + 1.0 \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \quad (\sigma_1 \leq \sigma_2) \quad (2)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{2.33}{(l_r/h)^2} + 1.0} \quad (3)$$

ここに， l_r ：主桁の座屈長さ

h ：主桁の高さ

t_r ：主桁の板厚

f ：応力勾配による修正

K_r ：座屈係数の比

σ_1, σ_2 ：主桁の縁応力度

また，道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編3章³⁾によれば，圧縮応力を受ける部材を編成する板の設計において，許容応力度は表-2に示すように局部座屈の影響を受けない場合と受ける場合とで，幅厚比によってそれぞれ定められている．表-2は，1辺自由，他の3辺が単純支持された無限長の長方形板が純圧縮を受ける場合の座屈係数に基づいて定めているものである．

しかし，鋼製セグメントの場合，縦リブが補剛材となり，縦リブの純間隔または縦リブブーリング間のボルトの間隔が主桁の有効座屈長にあたる．このため座屈係数補正が考慮できるので表-1は，これらの点を勘案して表-2を補正しているものである．²⁾

表-1 鋼製セグメントの座屈に対する許容応力度¹⁾

鋼種	局部座屈の影響を受けない場合		局部座屈の影響を受ける場合	
	幅厚比 (板幅/板厚)	許容応力度 (N/mm ²)	幅厚比 (板幅/板厚)	許容応力度 (N/mm ²)
SS400 SM400	$\frac{h}{t_r \cdot f \cdot K_r} \leq 13.1$	160	$13.1 < \frac{h}{t_r \cdot f \cdot K_r} \leq 16$	$27200 \cdot \left(\frac{t_r \cdot f \cdot K_r}{h} \right)^2$
SM490A	$\frac{h}{t_r \cdot f \cdot K_r} \leq 11.2$	215	$11.2 < \frac{h}{t_r \cdot f \cdot K_r} \leq 16$	$27200 \cdot \left(\frac{t_r \cdot f \cdot K_r}{h} \right)^2$

表-2 自由突出板の局部座屈に対する許容応力度³⁾

鋼種	局部座屈の影響を受けない場合		局部座屈の影響を受ける場合	
	幅厚比 (板幅/板厚)	許容応力度 (N/mm ²)	幅厚比 (板幅/板厚)	許容応力度 (N/mm ²)
SS400 SM400 SMA400W	$\frac{h}{t_r} \leq 13.1$	140	$13.1 \leq \frac{h}{t_r} < 16$	$24000 \left(\frac{t_r}{h} \right)^2$
SM490	$\frac{h}{t_r} \leq 11.2$	190	$11.2 \leq \frac{h}{t_r} < 16$	$24000 \left(\frac{t_r}{h} \right)^2$

3. 模型実験

(1) 実験の概要

本実験は、ほぼ実際の鋼製セグメントを切り出した形にした。これにより現場で使用される鋼製セグメントを忠実に再現した。この供試体2つを主桁の中央部においてボルト締結し、球面座を用いて主桁に等しく軸力を加え、座屈に至るまでの縦リブ間の主桁、その他各部分の変形、および座屈荷重、座屈形状を評価する事を目的としている。供試体はシールド工用標準セグメント¹⁾に示される局部座屈の影響を受ける主桁長を参考に、さらに細長比を考慮し、縦リブ間が400mmと600mmの2種類の供試体を作成した。また主桁同士をボルト締結する事により、主桁にどのような影響を及ぼすかを検証するため、中央部をボルト締結したものとボルト締結しないものを2種類、計4体により実験を行った。供試体の詳細は(2) 模型実験に用いた供試体に示す。

表-3 実験条件

実験条件	縦リブ間 (mm)	ボルト締結
CASE1	400	あり
CASE2	400	なし
CASE3	600	あり
CASE4	600	なし

表-4 供試体の材料特性

	主桁	縦リブ	スキンプレート
材質 JIS	SM490		SPA-H
降伏点 (N/mm ²)	366		383
引張強さ (N/mm ²)	527		549
伸び(%)	25		26

表-5 供試体の寸法

	CASE1 CASE2	CASE3 CASE4
供試体長さ L	740	940
供試体幅 B	676	
縦リブ間長さ l	400	600
主桁厚さ T	8	
主桁高さ H	100	
スキンプレート厚	3	
スキンプレート幅	330	
スキンプレート長さ	730	
縦リブ厚さ t	10	
縦リブ幅 b	100	

単位: mm

(2) 模型実験に用いた供試体

実験に用いた供試体4体を実験条件に合わせて、CASE1～CASE4とした。また、材質は主桁および縦リブに溶接構造用圧延鋼材 (SM490)、スキンプレートには初期偏心を抑え、なおかつ実験結果に影響を及ぼさないように高耐候性圧延鋼材 (SPA-H) を使用した。

表-3、表-4、表-5、図-1に供試体の概要を示す。

(3) 模型実験の方法

偏心を抑え供試体の主桁に均等に荷重がかかるように球面座を用い、載荷面にはゴム板を敷き載荷する。載荷には大型圧縮試験機、大型2軸構造物評価装置 (EHF-SG5MN/1MN-20L) を使用し、主桁のひずみ発生および応力の状況を把握するために各所にストレインゲージを貼付した。荷重速度は800kNまで0.5kN/s、800～1000kNは0.4kN/s、1000kN以上では0.3kN/sとした。本実験において荷重の計測は最大荷重を迎え荷重が下降するまでを計測した。

図-2に実験条件を示す。

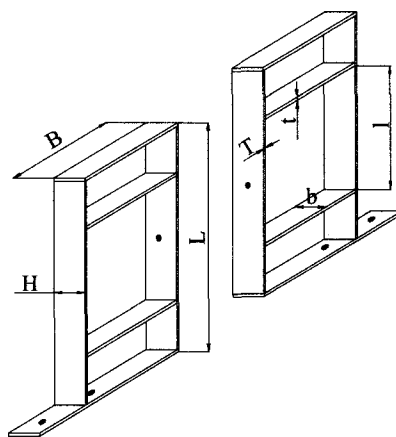


図-1 供試体の概略

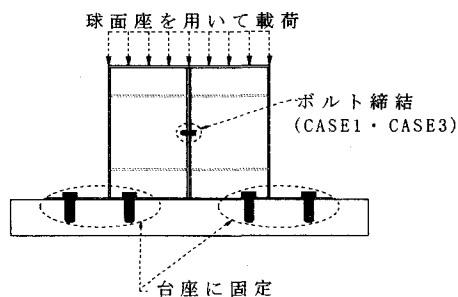


図-2 実験条件の概略

表-6 模型実験の座屈荷重および最大荷重

実験条件	座屈荷重	最大荷重
CASE1	981.6	1369.3
CASE2	995.6	1343.9
CASE3	928.2	1329.9
CASE4	1063.3	1233.8

単位：kN

表-7 模型実験の座屈応力度

実験条件	座屈応力度	
	左主桁	右主桁
CASE1	311.9	297.4
CASE2	268.1	297.4
CASE3	310.6	240.5
CASE4	282.8	305.1

単位：N/mm²

(4) 模型実験の結果

模型実験の結果を表-6、表-7に示す。座屈荷重はR²検定を用いて、これを定めた。また、座屈応力度はストレインゲージのひずみ発生状況より座屈が生じた箇所における応力度である。

4. 板の弾性座屈理論による解析³⁾⁴⁾

(1) 板の弾性座屈理論の概要

板は通常長方形の形をしているので、4辺を持っている。そして、この4辺の支持条件によって、座屈の形態が違ってくることがわかっている。

板の座屈を考える上で、まずは板の4辺が単純支持されていて一方に等分布の面内圧縮荷重を受け、他方には面内荷重は作用していない場合を考える。この時、圧縮荷重を受ける方向に板は座屈するが、座屈の波の数は板の長さとの幅の比によって変わってくる。荷重を受けない方向には波の数が1つしか発生しない場合がもっとも座屈しやすいことになる。このように、幅方向に波が1つ発生する場合の板の弾性座屈応力度 σ_{cr} は次の式(4)で与えられる。

$$\sigma_{cr} = k\sigma_E \quad (4)$$

ここに、 σ_{cr} ：板の弾性座屈応力度

k ：板の座屈係数

σ_E ：板のオイラー座屈応力度

板のオイラー座屈応力度 σ_E は板の幅 b を部材長とする次のような座屈強度式になる。

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5)$$

ここに、 E ：ヤング率

t ：板の厚さ

ν ：ポアソン比

また、板の座屈係数 k は荷重方向にできる波の数と板の支持条件によって与えられる。多くの場合、座屈応力と幅厚比との関係は、降伏点との関係を加味した無次元化表示で表される。これを板の幅厚比パラメータ R と呼んでおり、式(6)で与えられる。

$$R = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 \cdot k}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (6)$$

ここに、 R ：板の幅厚比パラメータ

σ_y ：降伏応力

したがって σ_{cr}/σ_y と R の関係は2次の双曲線で表され、 $R=1$ の時、座屈応力は降伏点に一致することとなる。完全弾性体が降伏点を超えて応力が増加することはない。したがって鋼を完全弾塑性体とみなせば σ_{cr}/σ_y と R との関係を示す曲線は $\sigma_{cr}/\sigma_y=1$ の水平線によって上部を切り取られることになる。わが国の道路橋示方書では、この幅厚比パラメータ R を用いて、初期不整を考慮した以下の基準耐荷力曲線を採用している。

$$\begin{cases} \sigma = 1.0 & (R \leq 0.2) \\ \sigma = 1.109 - 0.545R & (0.2 < R \leq 1.0) \\ \sigma = 1.0 / 0.773 + R^2 & (1.0 < R) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $\sigma = \sigma_{cr} / \sigma_y$

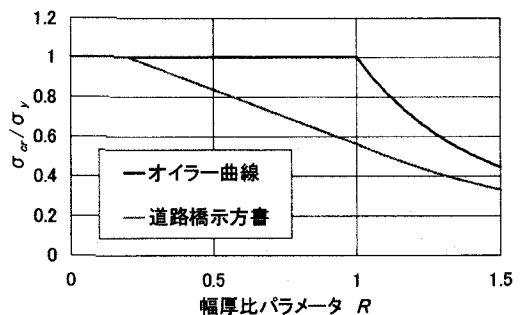


図-3 耐荷力曲線

上記に述べているオイラーの座屈理論の耐荷力曲線と道路橋示方書の条件における耐荷力曲線を図-3に示す。

本研究では、鋼製セグメントの主桁の局部座屈に関し、主桁を板と考えスキンプレート、縦リブおよびボルト締結部分での拘束を、板の弾性座屈理論に置き換え考えることにする。

(2) 解析条件

本実験では実際の鋼製セグメントの一部を切り出した供試体を採用した。(1) 板の弾性座屈理論の概要で述べた板の弾性座屈理論を導入するにあたり、縦リブ、スキンプレート、ボルト締結での境界条件を板の座屈の境界条件に近似し適用する。

鋼製セグメントの縦リブ間の主桁を一枚の板と考え、2辺が縦リブでの拘束、1辺がスキンプレートでの拘束、そして1辺が自由端として、板の座屈理論の以下の境界条件での座屈応力を求めることにする。実験供試体では縦リブ間が400mmおよび600mm、また縦リブボルト締結間が200mmおよび300mmである。従って、ボルト締結の拘束も考え、板の長さが200mm、300mm、400mm、600mmの場合に対しての座屈荷重および座屈応力を求め、実験との適合性をはかる。

板の弾性座屈理論を適用するにあたり、座屈係数 k は、平板構造強度設計便覧⁹⁾、弾性安定論⁹⁾を元に導き出す。また、板の弾性座屈理論において載荷縁が固定の場合には板長を a 、板幅 b をとすると、 a/b が大きくなると載荷縁単純支持の場合の座屈係数 k に漸近することが知られている。また、単純支持より固定支持の方が拘束力が強いので、必ず単純支持の場合より固定支持の場合の方が k の値が大きくなる。このことから、 a/b が大きいときには、載荷縁固定支持に近い場合であっても実用的には載荷縁単純支持の座屈係数 k を設計上仮定する。従って平板構造強度設計便覧の圧縮座屈係数曲線⁹⁾を参照し、今回の実験のように1辺が自由の場合は、 $a/b \geq 3$ において載荷縁の固定条件と単純支持の座屈係数 k は同じ値をとるとする。また今回の理論での a/b の値は2, 3, 4, 6なので、3, 4, 6においては3辺単純支持1辺自由圧縮板、2辺固定1辺単純支持1辺自由圧縮板の座屈係数 k の値および3辺固定1辺自由圧縮板、2辺単純支持1辺固定1辺自由圧縮板の座屈係数 k の値は同じであるとする。

縦リブボルト締結間が200mmのCASE1に関しては、板の座屈においては $a/b=2$ となり、弾性座屈範囲ではなく塑性座屈範囲であるため、今回の理論を

表-8 解析条件

境界条件	3辺単純支持1辺自由圧縮板
	3辺固定1辺自由圧縮板
	2辺単純支持1辺固定1辺自由圧縮板
	2辺固定1辺単純支持1辺自由圧縮板
板長 (mm)	200
	300
	400
	600
板高(mm)	100
板厚(mm)	8

適用することはできない。ここに解析条件を表-8に示す。

本研究では、表-8の解析条件より座屈係数 k の値を決定しその値をもとに幅厚比パラメータ R を求め、式(7)の道路橋示方書の基準耐荷力曲線を用いて座屈荷重を計算した。

(3) 板の弾性座屈理論による解析結果

板の弾性座屈理論を適用するに当たり、境界条件の選定は、4辺のうち1辺が自由であり、なおかつ $a/b \geq 3$ となる場合のみ検証すればよい。また、本実験の供試体に相当する a/b においては、座屈係数 k が固定と単純支持とではほぼ一致し、載下面が固定の場合と単純支持の場合とは近似することができる。よって、a) 3辺単純支持1辺自由圧縮板および2辺固定1辺単純支持1辺自由圧縮板、b) 3辺固定1辺自由圧縮板および2辺単純支持1辺固定1辺自由圧縮板の2つの場合についてのみ、板の弾性座屈理論から理論値を求める。

a) 3辺単純支持1辺自由圧縮板および2辺固定1辺単純支持1辺自由圧縮板

3辺固定1辺自由圧縮板および2辺単純1辺固定1辺自由圧縮板に関しては、 $a/b > 1.64$ のとき $k=1.28$ である。 a/b は、それぞれ3.0, 4.0, 6.0で全てにおいて $a/b > 1.64$ なので座屈係数 k は1.28で統一される。

実験においては、主桁4本分を座屈させるので主桁の本数を乗した値を表-9に示す。

表-9 板の弾性座屈理論により求めた座屈応力度および座屈荷重(3辺単純支持1辺自由)

実験条件	座屈応力度 σ_{cr} (N/mm ²)	座屈荷重 P (kN)
CASE1		
CASE2	255.7	795.8
CASE3	248.3	796.7
CASE4	242.3	775.3

表-10 板の弾性座屈理論により求めた座屈応力度
および座屈荷重(3辺固定1辺自由)

実験条件	座屈応力度 σ_{cr} (N/mm ²)	座屈荷重 P (kN)
CASE1		
CASE2	309.1	989.2
CASE3	309.1	989.2
CASE4	309.1	989.2

また、CASE1についてはボルト縦リブ間が200mmとなり、塑性座屈の範囲となるため、本理論は適用できない。

b) 3 辺固定 1 辺自由圧縮板および 2 辺単純支持 1 辺固定 1 辺自由圧縮板

3辺固定1辺自由圧縮板および2辺単純1辺固定1辺自由圧縮板に関しては、 $a/b > 1.64$ のとき $k=1.28$ である。 a/b は、それぞれ3.0, 4.0, 6.0で全てにおいて $a/b > 1.64$ なので座屈係数 k は1.28で統一される。

実験においては、主桁4本分を座屈させるので主桁の本数を乗した値を表-10に示す。

また、CASE1についてはボルト縦リブ間が200mmとなり、塑性座屈の範囲となるため、本理論は適用できない。

5. 有限要素法 (FEM) による解析

(1) 有限要素法 (FEM) の概要⁷⁸⁾

有限要素法とは、物体あるいは構造物を有限個の未知量を含んだ有限要素または単に要素と呼ばれる部分領域の集合体によって近似し、工学の問題を解く一つの方法である。本研究においては、接触解析を取り入れたため、三次元有限要素法モデルを採用した。

本実験では鋼製セグメントの座屈についての評価を行う。板の座屈は柱の座屈のように急激に耐荷力を失うのではなく、座屈による変形が進むにつれて耐荷力は降伏後も上昇するため、非線形解析が必要となる⁴⁾。

ここでは、今回解析条件で用いた弧長増分法について述べることにする。弧長増分法は、増分パラメータとして弧長 r を採用するもので、通常に分岐現象や飛び移り現象も、この数値解法にとってみれば、単なるつり合い径路上の枝分かれやカーブにすぎず、連続性をもつ空間曲線であれば、常に次段階のつり合い点を見いだすことが可能である。ここでは、弧長増分法とNewton-Raphson収束過程とを組み合わせる方法を説明する。

$$\text{弧長条件式: } \{d\}^T \{d\} + \lambda^2 = r^2 \quad (7)$$

ここに、 r は任意の大きさのパラメータであり、計算を実行する際に与える量となる。

収束過程で、この r が大きすぎると収束が遅くなり、小さすぎると計算ステップが多くなる。収束過程における修正方程式は、収束操作のステップ数を n として肩に添字で示すことにすれば、次式のように表わすことができる。

$$[K(D^0 + d^{(n)})] \{\Delta d^{(n)}\} - \lambda^{(n)} \{f\} = \{p^{(n)}\} \quad (8)$$

$$\{d^{(n)}\}^T \{\Delta d^{(n)}\} + \lambda^{(n)} \Delta \lambda^{(n)} = Q^{(n)} \quad (9)$$

$\{D^0\}$, λ^0 は前回のステップで収束した解ベクトルおよび荷重パラメータである。式(8), 式(9)をマトリックス表示すると、

$$N \begin{bmatrix} K^{(n)}(D^0 + d^{(n)}) & -\{f\} \\ \{d^{(n)}\}^T & \lambda^{(n)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d^{(n)} \\ \Delta \lambda^{(n)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P^{(0)} \\ Q^{(n)} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

式(10)が弧長増分法における修正Newton-Raphson収束過程の基礎式である。

弧長増分法を用いて、弾性座屈後の領域を含む高度な非線形を有する問題を解析した結果より、増分パラメータとして弧長を利用することの方が合理的であり、非線形方程式に対して安定した性能をもちうる事が予想される。

(2) 有限要素法 (FEM) と板の弾性座屈理論との比較

本研究では、実験の解析において有限要素法と板の弾性座屈理論とを用いているが、ここで有限要素法と板の弾性座屈理論との適合性の検討を行う。有限要素法と板の弾性座屈理論との比較にあたり、オイラーの板の座屈理論における耐荷力曲線を元に検討する。

オイラーの板の弾性座屈理論の耐荷力曲線は、鋼板の降伏応力度を考慮し、 σ_{cx}/σ_y は1を超えることはないよう調整されている。したがって解析モデルの決定にあたっては、 $\sigma_{cx}/\sigma_y \geq 1$ および $\sigma_{cx}/\sigma_y < 1$ の寸法を用い、 $a/b \geq 3$ のモデルを選定する。

3辺単純支持1辺自由と3辺固定1辺自由について各4種類の条件で有限要素法による解析を行い、モデルA~Dと定める。有限要素法における解析モデル

の寸法を表-11に、座屈応力度を表-12、表-13、および図-4に示す。また、解析モデルについてDは、オイラーの弾性座屈理論の耐荷力曲線では σ_y の降伏応力度をとるが、今回は、有限要素法において、降伏応力を考慮しない弾性座屈解析を行ったため、オイラーの弾性座屈理論においても降伏応力を考慮せずに比較した。また、有限要素法による解析での座屈応力度は、座屈した箇所におけるひずみより求めている。

表-11 解析モデルの寸法

解析 モデル	板厚 t	板幅 b	板長 a	a/b	座屈係数 k
A	10	300	1000	3.33	1.28
B			3000	10	
C		15		0.43	
D					

単位：mm

表-12 解析より求めた座屈応力度
(3辺単純支持1辺自由)

モデル	座屈応力度 σ_{cr} (理論)	座屈応力度 σ_{cr} (MARC)
A	269.9	270.7
B	269.9	276.8
C	90.7	91.6
D	607.4	602.8

表-13 解析より求めた座屈応力度
(3辺固定1辺自由)

モデル	座屈応力度 σ_{cr} (理論)	座屈応力度 σ_{cr} (MARC)
A	269.9	337.4
B	269.9	276.8
C	90.7	97.5
D	607.4	621.0

単位：N/mm

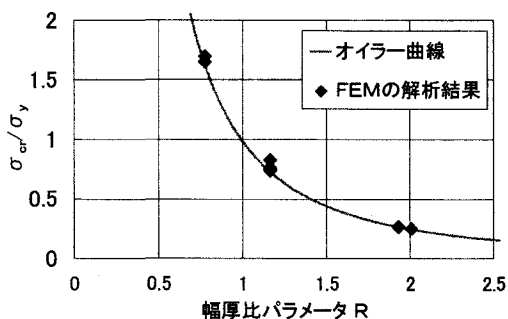


図-4 板の弾性座屈理論と有限要素法による解析結果

図-4をみると有限要素法による解析と板の弾性座屈理論による解析がよく一致していることがわかる。

(3) 解析条件

実験の諸条件をできるだけ解析で再現するため、実験条件のMODEL1～MODEL4の4つのモデルを作成、それぞれに対応するように解析条件を設定し、三次元有限要素法解析を行った。

各モデルの拘束条件および载荷条件を以下に示し、各モデルの解析条件を表-14、表-15に示す。

今回の実験は、供試体の下端部をボルトにより固定して行ったため、解析モデルも下端部を完全固定とした。

また、MODEL1およびMODEL3にはボルト締結部を忠実に再現するために、結合させ、拘束した。今回の実験において、供試体の上端部にのみ载荷し、スキンプレートには、直接载荷をしていないため、解析においてもモデルの上端部のみに载荷した。

载荷する際は、载荷速度を定めて軸力を加え、座屈をさせたため、有限要素法による解析においても時間をおって荷重を増やして载荷することを条件とした。

実験において、供試体は2体のセグメントを接触させている状態である。解析のモデルにおいても実際の供試体をモデル化しているため、お互いのセグメントは接触している。この状態で荷重をかけたことによりお互いのセグメントが影響することを考慮し、接触解析の条件を組み込むことにする。この際、変形によって両者で力および変位を伝播できるような条件を加えた。実験結果の荷重－ひずみ曲線から、座屈後の挙動を明らかにするために、降伏応力度、破壊応力度を設定する。また、解析モデルが座屈した後も荷重をかけ続けることとする。

表-14 解析条件

実験条件	縦リブ間	荷重	ボルト締結部
MODEL1	400(mm)	POINT	拘束あり
MODEL2			拘束なし
MODEL3	600(mm)	LOAD	拘束あり
MODEL4			拘束なし

表-15 解析に用いた物性値

ヤング係数	210(kN/mm ²)
降伏点	366(kN/mm ²)
引張強さ	527(kN/mm ²)
最大伸び	25(%)

表-16 有限要素法解析より求めた
座屈荷重および最大荷重

解析条件	座屈荷重	最大荷重
MODEL1	1189.7	1537.3
MODEL2	1141.8	1541.4
MODEL3	1112.8	1475.9
MODEL4	1117.2	1484.8

単位：kN

(4) 解析結果

有限要素法解析によって得られた座屈荷重および最大荷重を表-16に示す。

6. 実験結果と解析結果との比較および考察

(1) 実験結果と板の弾性座屈理論による解析結果との比較および考察

4. 板の弾性座屈理論による解析でも述べたように、板の弾性座屈理論を適用するにあたり、 a/b がある一定以上の値を超えると載荷面の支持条件が固定支持であっても単純支持に近似することができる。本研究における実験の供試体の縦リブ間の主桁を板と考えると全ての供試体において $a/b \geq 3.0$ であるため、境界条件を以下の2つに近似して考えた。

- ① 3辺単純支持1辺自由圧縮板 $\approx$ 2辺固定1辺単純支持1辺自由圧縮板
- ② 3辺固定1辺自由圧縮板 $\approx$ 2辺単純支持1辺固定1辺自由圧縮板

また、CASE1およびCASE3は2枚の主桁が中心部でボルト締結されているため、ボルト締結部分での拘束を考慮する。したがって、板の弾性座屈理論の解析値（道路橋示方書³⁾）と比較する際、板長 $a=200\text{mm}$ 、 400mm 、板長 $a=300\text{mm}$ 、 600mm で比較する。表-17に実験結果と板の弾性座屈理論による解析結果を示す。

表-17 実験結果と解析より求めた座屈荷重

実験条件	実験結果	3辺単純支持 1辺自由	3辺固定 1辺自由
CASE1	981.6		
CASE2	995.6	795.8	989.2
CASE3	928.2	796.7	989.2
CASE4	1063.3	775.3	989.2

単位：kN

弾性座屈理論から求めた座屈荷重と実験値を比較してみると、全体的に実験値は、3辺固定支持1辺自由の値に近い値をとっていることがわかる。これは、縦リブおよびスキンプレーットの主桁に与える拘束が固定支持の条件に近いということがいえる。確かに、今回の実験での供試体において、スキンプレーットと主桁の接着部分は、千鳥型に溶接してあるため、固定支持に近い条件だといえる。

次に、2枚の主桁のボルト締結による拘束について考えてみる。CASE1とCASE2とを比較してみると、縦リブボルト締結間の長さ200mmでは塑性座屈の条件に入ってしまう。したがって、主桁をボルトで締結しても、2枚の主桁は同じ材質、寸法であるため縦リブ縦リブ間の長さの弾性座屈が起こったのではないかと予想される。

またCASE3とCASE4については、板の弾性座屈理論によると縦リブボルト締結間の長さ縦リブ縦リブ間の長さでは座屈荷重は変わらない。しかし、実験によると多少の誤差が生じている。表-7を参照すると左右の座屈応力度の差が大きいことがわかる。CASE3において左側の鋼製セグメントの座屈荷重が全ての結果において下回っている。このことから、CASE3においての供試体は他の供試体に比べ初期不整が大きかったのではないかとはいえる。そのことを考慮すると、座屈自体においてはボルト締結をしても、縦リブ間の距離から座屈荷重は変わらない値をとるのではないかと考えられる。

今回の実験で板の弾性座屈理論と実験値から言えることは、供試体の座屈は道路橋示方書の板の弾性座屈理論の3辺固定1辺自由圧縮板に近似できると思われる。また、座屈荷重に関しては、供試体の寸法、ボルト締結に関わらずほぼ同じ値をとることがいえる。

(2) 実験結果と有限要素法(FEM)による解析結果との比較および考察

次に、実験結果と有限要素法(FEM)による解析結果とを比較、考察することにする。実験値と解析値を比較するにあたり、実験の供試体をそのままモデル化し、また弾性座屈解析に加え、後座屈挙動も解析するために座屈後も荷重をかけ非線形解析を加えた。

その結果を表-18、図-5～図-8に示す。

座屈荷重および最大荷重において、解析値のほうが大きい値をとっている。これは解析値と板の弾性座屈理論を比較したときに明らかになったように、有限要素法(FEM)による解析では初期不整を考慮し

表-18 実験結果と有限要素法解析より求めた

座屈荷重および最大荷重

実験条件	解析条件	実験結果		解析結果	
		座屈荷重	最大荷重	座屈荷重	最大荷重
CASE1	MODEL1	981.6	1369.3	1189.7	1537.3
CASE2	MODEL2	995.6	1343.9	1141.8	1541.4
CASE3	MODEL3	928.2	1329.9	1112.8	1475.9
CASE4	MODEL4	1063.3	1233.8	1117.2	1484.8

単位：kN

ていないために大きくなったのであると思われる。また、解析値の座屈荷重においても、今回の供試体の縦リブ縦リブ間の長さでは400mm、600mmに対して変わりがないことがわかる。またボルト締結による影響も座屈荷重に関しては特に影響がないということが言える。今回のボルト締結の有無による座屈荷重の違いに差がないのは、主桁同士の材質および寸法が同じであったため、お互いの主桁の座屈荷重は同じである。そのことから、ほぼ同時に座屈したために影響を及ぼさなかったのではないかと考えられる。

また、有限要素法による解析では、後座屈の挙動についても解析を行った。結果は、縦リブ間が400mmのほうが縦リブ間が600mmに比べ最大荷重が大きくなった。座屈荷重は両方ともほぼ同じ値をとっているため、座屈してからの主桁の挙動に原因があると考えられる。板は柱と違い載荷方向以外の側面にも拘束ができるため座屈後に最大荷重が増加する。これは、座屈後に板が変形する事によって板の中央部に引張応力が生じ、板中央部への負担が軽減するからである。その板中央部の引張応力の増加とともに増える板端部への圧縮応力がその板の降伏応力に達したとき、その板が部材として破壊することとなり、そのときの荷重が最大荷重となる。板長が大きいということは板中央部への引張応力が大きいいため、それだけ端部への圧縮応力も大きくなり早く降伏応力に達する。このような原因により縦リブ間の短い方が最大荷重が大きくなると考えられる。次にボルトの有無についてだが、実験ではボルトがある場合の方が最大荷重が大きくなったが、解析ではほぼ同じ値をとっておりその誤差は0.3%と0.6%ほどである。これは、解析ではボルトのある位置の要素を結合させたが、実際の実験では2枚の主桁をボルトで繋いでいるため、主桁だけでなく、そのボルト自体にも応力が生じる。そのため主桁にかかる応力が軽減され、その結果、主桁の最大荷重が増加したのではないだろうかと考えられる。

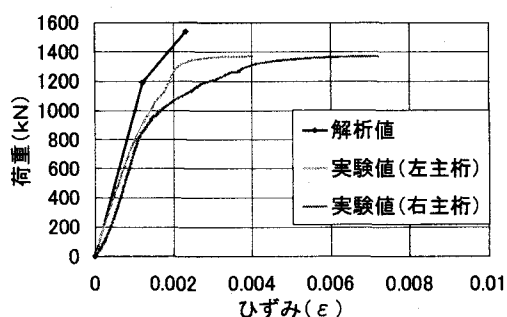


図-5 荷重-ひずみ曲線(CASE1・MODEL1)

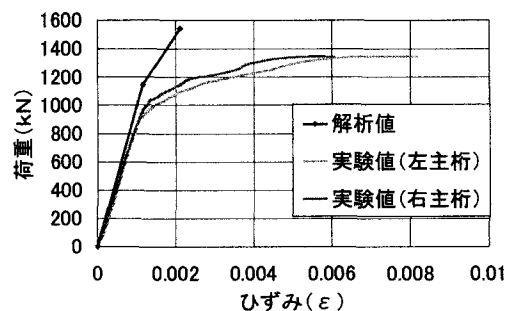


図-6 荷重-ひずみ曲線(CASE2・MODEL2)

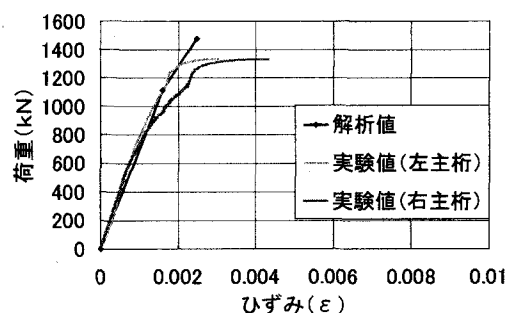


図-7 荷重-ひずみ曲線(CASE3・MODEL3)

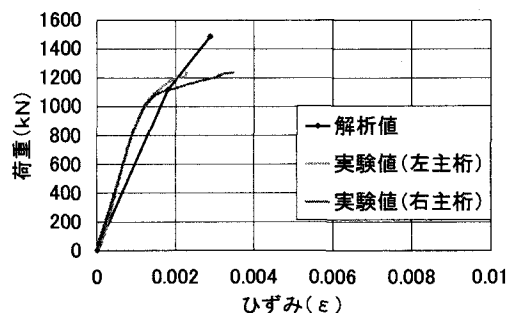


図-8 荷重-ひずみ曲線(CASE4・MODEL4)

7. おわりに

板の長さ a と板の幅 b との比である a/b がある一定値より大きい値をとるならば、主桁の長さが600mm, 400mmという条件、またボルト締結の有無という条件にも関わらず座屈荷重は同じ値をとることがわかった。また、実験における座屈荷重と座屈応力の値は板の弾性座屈理論から初期不整を考慮して導かれる道路橋示方書の鋼板の局部座屈に関する理論値と非常によく適合している。さらに、有限要素法(FEM)による解析値も実験値との適合性はあるといえる結果が得られた。ただし、有限要素法(FEM)による解析は板の理想体に関するオイラー理論に基づいて解析しているので、実際の供試体の解析に適用させるには解析条件として初期不整を考慮しなければならない。鋼製セグメントの材質・形状的に統計学的見地に基づいて、どの程度の初期不整をどのように解析に組み込んでいくかが今後の課題の1つとなると考えられる。主桁の最大荷重については、実験値と解析値の結果から座屈の場合と違い主桁の長さが短い方が大きくなるという結果が得られた。

一方、今回の研究により鋼板の弾性座屈について様々なことが判明した。板の座屈において4辺それぞれの境界条件の違いが座屈に非常に多大な影響を与えることもその1つだが、本実験では実際の鋼製セグメントとは違い千鳥型に溶接した供試体を用いた。今後の実験では実際の鋼製セグメントと同様に

片側溶接した供試体を用いて本研究で判明したことを裏づける実験を行い、また、鋼製セグメントの座屈後の挙動についてはまだまだ未知な部分が多いので、その実験において座屈後のデータにも注目して座屈後の鋼製セグメントのメカニズムについても解明していく予定である。また、今後に関連した課題を幅広く研究することにより、局部座屈のメカニズムが明らかになり、座屈後の経過時間によらず安定性が保証されれば、設計強度として最大荷重を用いることも可能であると考ええる。

参考文献

- 1) 土木学会, 日本下水道協会: シールド工事中用標準セグメント, pp. 1-9, pp. 85-86, 2001.
- 2) 日本規格協会: JISハンドブック②鉄鋼Ⅱ, pp. 68-77, pp. 125-136, pp. 153-169, 2002.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編, pp. 68-77, pp. 125-136, pp. 153-169, 2002
- 4) 熱田稔雄ほか: 座屈のはなし, pp. 129-131, pp. 133-149, 1986.
- 5) 関谷壮ほか: 平板構造強度設計便覧, pp. 94-109, 1982.
- 6) Timoshenko, S.P., Gere, J.M.: 弾性安定論(下), pp. 332-349, pp. 376-388, 1974.
- 7) 川井忠彦ほか: 有限要素法ハンドブックⅡ 応用編, pp. 157-158, pp. 167-169, 1974.
- 8) Zienkiewicz, O.C.: マトリックス有限要素法, pp. 506-510, 1984.