

最小曲げ半径以下に加工した 鋼アーチ支保部材に関する基礎実験

前田志保¹・西原直哉²・植田 潔²・吉武 勇³・中川浩二⁴

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: m035vf@yamaguchi-u.ac.jp

²非会員 株式会社マシノ (〒733-0822広島市西区庚午中1-19-23)

³正会員 山口大学大学院准教授 理工学研究科 (〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴フェロー会員 NPO法人臨床トンネル工学研究所 (〒755-0084山口県宇部市川上)

トンネルの支保部材に用いられる鋼アーチ支保部材は、トンネル標準示方書で定められる最小曲げ半径以下で曲げた場合の特性把握がほとんどなされていない。そこで本研究では、H鋼材を最小曲げ半径以下まで曲げ加工し、その形状変化を調べるとともに、切り出した試験片を用いて物性試験を行った。その結果、曲げ加工によりフランジの波打ちや、ウェブの座屈等の形状変化がみられた。また、非載荷部位から切り出した試験片と比べて、曲げ加工後の試験片の強度はほぼ同等であったが、ヤング係数は54～96%に低下した。

Key Words : steel arched support member, minimum radius, curvature, Young's modulus

1. はじめに

山岳トンネル施工に用いられる鋼アーチ支保部材については、耐荷重や応力状態に関する研究がこれまで数多くなされている。そのなかでも応力状態については、ひずみゲージや、磁歪法¹⁾などを用いた実験により、さまざまな研究成果が報告されている。しかし、これらはいずれもトンネル標準示方書²⁾(以下、示方書)の最小曲げ半径内で曲げられた鋼材に関する研究であり、鋼材を最小曲げ半径以下で曲げた場合の特性把握はほとんどなされていない。

鋼アーチ支保部材は、示方書により、最小曲げ半径がH形鋼材のサイズごとに定められている。この最小曲げ半径は設計値のため安全側の指標となっているが、その設定根拠は、高炉メーカー各社が支保工製品の品質一定化を前提に設定したものと考えられる。しかし明確な理由は不明瞭であり、ロールベンダー加工機のパフォーマンスによっては、その最小曲げ半径まで加工できない場合もある。また、こういった最小曲げ半径程度まで加工したH形鋼材の特性は、これまで十分に検討されていないのが実状である。最小曲げ半径以下のH形鋼材の特性を把握することで、状況により小断面設計での計画を余儀なくされる場合などに、その利用が可能になるものと考えられる。そこで本研究では、H形鋼材を最小曲げ半径以下まで曲げ加工試験を行い、その変形状況を確認すると

ともに、試験後の供試体から切り出した試験片を用いて圧縮・引張試験を行い、その物性評価を試みた。

2. 曲げ加工試験

(1) 試験概要

本研究で実施した曲げ加工試験には、表-1に示すようにH-200×200(11.5m長)と、H-125×125(9.0m長)の鋼

表-1 最小曲げ半径

断面形状	最小曲げ半径(mm)	
	示方書	加工機のパフォーマンス
H-200×200×8×12	R=4,200	R=4,500
H-125×125×6.5×9	R=1,500	R=1,500



写真-1 曲げ加工状況

材（SS400）をそれぞれ各3本，計6本を用いた．なお，表-1には各鋼材の最小曲げ半径も併記している．また，鋼材の曲げ加工状況を写真-1に示す．

本研究で用いたロールベンダー加工機の概略図を図-1，図-2に示す．いずれも油圧モーター式で，本研究では図-1に示す曲げ加工機をH-200に用い，図-2に示す曲げ加工機をH-125に用いた．なお，本試験に用いたロールベンダー加工機の性能上，これまでの加工実績に基づいてH-200の最小曲げ半径の基準を $R=4,500\text{mm}$ としていたが，本研究においては，示方書に記載される最小曲げ半径 $R=4,200\text{mm}$ に設定した上で，曲げ加工試験を実施した．

(2) 試験方法

計測に用いた器具を表-2にまとめて示す．まず鋼材の外フランジ中心，内フランジの付け根の2箇所ポンチを用いて $x=1,000\text{mm}$ 程度間隔でマーキングを行った（図-3）．鋼材の形状寸法を計測後，ばね式手秤を用いて50Nの力で鋼巻尺を引張り，鋼材に磁石で固定した状態で，ポンチ位置を約30mm手前まで計測した後，残り長さをデジタルノギスを用いて1/100mmまで計測した．このとき室温も同時に計測し，温度補正を行った．鋼巻尺読値と温度補正值，およびノギス計測値を加算したものを計測点間の実長さとした．なお，同じ箇所を3回測定し，その平均長を求めた．H-125については， $x=500\text{mm}$ 間隔でH-200の場合と同様の計測を行った．

ポンチマーキング間の計測後，写真-1に示すような曲げ加工をそれぞれ行い，曲げ加工前と同様の手順で各区間の長さを計測した．各区間の長さを基に，一線上に座標化し，曲げ加工前後の計測値からひずみを算出した．

(3) 試験結果

a) 変形状況と終局限界状態

曲げ加工を行ったH-200およびH-125の曲率半径設定値を表-3に示す．始めに，H-200についてだが，示方書に記載される最小曲げ半径 $R=4,200\text{mm}$ に設定した供試体H200-aの変形状況については，特筆する変化等はみられなかった．設定曲げ半径を $R=3,500\text{mm}$ とした供試体H200-bは，曲げ起点に大きなねじれ，計測点5～7番間，9番目の内フランジに波打ち，10番付近で座屈がみられた上，基準とした木型に比べて全体的に曲げ不足であった．そのため，供試体H200-bに関しては，ウェブにおける各ポンチマーキング間の長さ計測は行わなかった．設定曲げ半径を $R=3,800\text{mm}$ とした供試体H200-cは設定曲げ半径での加工が可能であったが，全体的に座屈とねじれが生じ，特に計測点10～11番間で内フランジで波打ちがみられた．曲げ加工前後のフランジの内寸法の計測値を表-4に示す．また同じ計測点で，ウェブに型取りゲージ

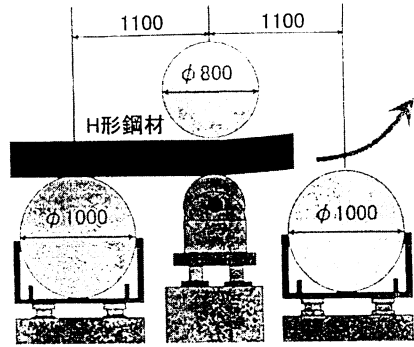


図-1 曲げ加工機概略図(H-200, 単位mm)

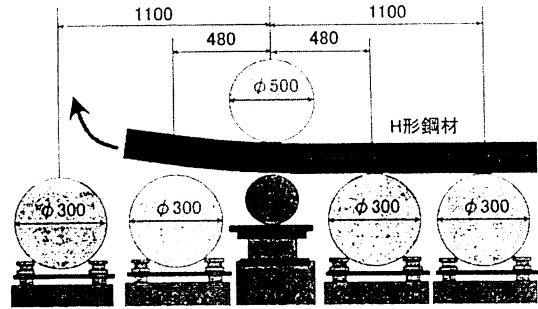


図-2 曲げ加工機概略図(H-125, 単位mm)

表-2 計測器具

器具名	仕様
鋼巻尺	線膨張係数 $11.5\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
デジタルノギス	繰返し精度 0.01mm
ばね式手秤	50N
デジタル温度計	測定精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$

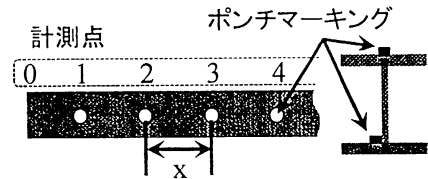


図-3 マーキング位置

表-3 曲率半径設定値

(mm)	供試体 a	供試体 b	供試体 c
H-200	$R=4,200$	$R=3,500$	$R=3,800$
H-125	$R=1,250$	$R=1,500$	$R=1,400$

表-4 H-200のフランジ内寸法(単位mm)

供試体	計測点		端部	5	8
b	上側	加工前	176.52	176.57	176.71
		加工後	174.57	171.28	172.92
	下側	加工前	176.61	175.76	176.88
		加工後	176.04	178.78	178.82
c	上側	加工前	176.55	176.52	176.57
		加工後	174.31	172.76	174.14
	下側	加工前	176.35	175.97	176.47
		加工後	175.83	179.23	178.35

を用いてトレースしたものを図-4に示す。この結果に示されるように、曲げ加工後のウェブの座屈変形による凹凸が、概ね同様となっていることが分かる。

次に、H-125 についてだが、設定曲げ半径を $R=1,250\text{mm}$ とした供試体 H125-a は、写真-2 に示すように形状変化が著しく、曲げ加工途中で切断せざるを得なかった。そのため、以降の検討では供試体 H125-a の結果は示していない。また供試体 H125-a の試験結果を踏まえ、供試体 H125-b は、示方書の最小曲げ半径 ($R=1,500\text{mm}$) に設定し、曲げ加工を行った。その結果、特に大きな形状変化はみられなかった。供試体 H125-c は、最小曲げ半径より 100mm 小さい設定値 ($R=1,400\text{mm}$) で曲げ加工を行った。その結果、曲げ加工はできたが、全体的に大きくはないものの、局所的な座屈がみられた。以上の曲げ加工結果より、ここで用いたロールベンダー加工機による曲げ半径の限界は、H-200 で $R=3,800\text{mm}$ 程度、H-125 で $R=1,400\text{mm}$ 程度と考えられる。

b) ひずみと曲率半径

曲げ加工試験後のH-200およびH-125の長さ変化より求めたひずみをそれぞれ図-5、図-6に示す。これらのグラフより、曲げ起点と曲げ終点近傍のひずみの大きさが小さくなっていることが分かる。また、ひずみの変化が著しい箇所は、ウェブの座屈等の形状変化がみられた箇所であった。

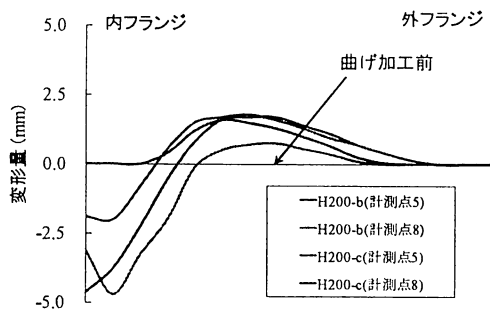


図-4 曲げ加工後のウェブの変形状況



写真-2 供試体H125-a切断状況

ここで、曲げ加工後の鋼材のスプリングバック³⁾を考慮して供試体H200-aのフランジについて、1時間後、3時間後、72時間後に計測点1～11の計測を行い、同様に平均ひずみを求めた。その結果、表-5に示すように最大でも 156×10^{-6} のひずみの差異しかなく、スプリングバックはほとんど生じないことが分かった。

ひずみより求めた曲率半径と設定した曲率半径の比較を図-7にまとめて示す。図-7に示すようにH200-cを除い

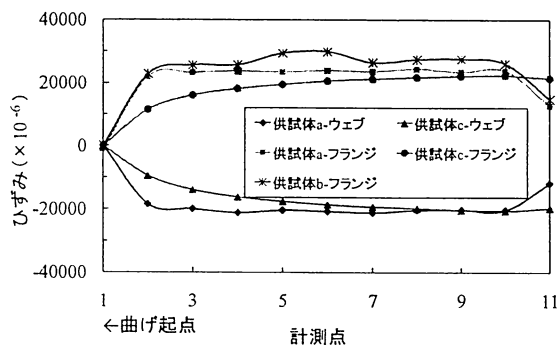


図-5 ひずみ算出結果(H-200)

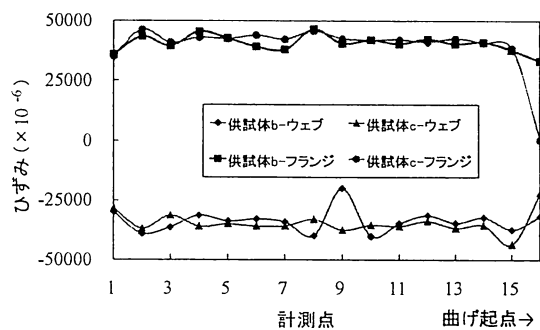


図-6 ひずみ算出結果(H-125)

表-5 計測点1～11の平均ひずみの経時変化

経過時間	平均ひずみ ($\times 10^{-6}$)	経過時間	平均ひずみ ($\times 10^{-6}$)
0h	22540	3h	22575
1h	22696	72h	22546

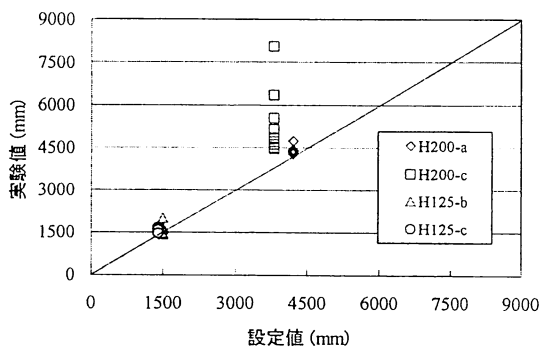


図-7 曲率半径の実験値と設定値の比較

て設定値と曲率半径は、概ね一致していることが分かる。これは、H200-cではひずみにバラツキが生じ、局所的な変形になったためであり、この実験ケースにおいては、曲げ不足であったことが窺える。

3. 物性試験

(1) 試験概要

本研究では、曲げ加工試験後の供試体を数ヶ所切り取り、圧縮・引張強度試験を行った。

圧縮試験は、圧縮試験機（2000kN）の性能上、表-6に示すように曲げ加工試験を行った、H125-bおよびH125-cからそれぞれ2体（供試体高250mm）ずつ採取し、圧縮試験に供した。また比較のため、曲げ加工を行っていない部位から採取した供試体（以下、「非載荷部」と表現）についても、同様の圧縮試験を実施した。なお、いずれの供試体においても、圧縮試験における載荷面を平行にするため、レーザー切断を行った（写真-3）。

引張試験ではJIS Z 2241に基づき、表-7に示すようにH-200を7片、H-125を5片について載荷を行った。このうち、No.1～6およびNo.8～11の試験片は、先述の曲げ加工試験で引張力を受けた外側フランジ部からそれぞれ2カ所ずつ採取したものである（図-8）。また圧縮試験と同様に、非載荷部から採取した試験片（No.7, 12）についても、引張試験を実施した。引張試験に用いた試験片を写真-4に示す。

(2) 試験方法

圧縮試験では、図-9に示すように供試体の外・内フラ

表-6 圧縮試験の供試体一覧

番号	供試体	部位	曲率半径(mm)
No.1	H125-b	9-10間	R=1,500
No.2		15-16間	
No.3	H125-c	8-9間	R=1,400
No.4		14-15間	
No.5	H125直材(非載荷部位)		



写真-3 圧縮試験供試体

ンジ面の中心箇所、それぞれ載荷軸方向にひずみゲージを貼付するとともに、デジタル変位計とダイヤルゲージ式変位計を設置した。そして荷重100kNごとにひずみ

表-7 引張試験一覧

番号	試験片	部位	曲率半径 (mm)
No.1	H200-a	5-6間(上)	R=4,200
No.2		5-6間(下)	
No.3	H200-b	5-6間(上)	R=3,500
No.4		5-6間(下)	
No.5	H200-c	5-6間(上)	R=3,800
No.6		5-6間(下)	
No.7	H200直材(非載荷部位)		
No.8	H125-b	16-17間(上)	R=1,500
No.9		16-17間(下)	
No.10	H125-c	13-14間(上)	R=1,400
No.11		13-14間(下)	
No.12	H125直材(非載荷部位)		

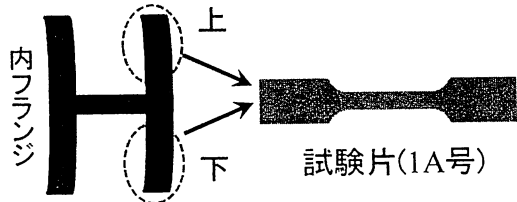


図-8 試験片採取箇所

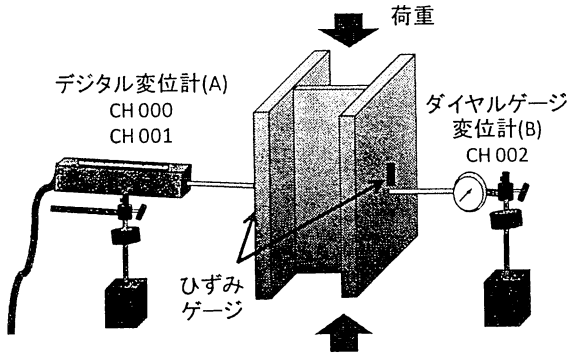


図-9 圧縮試験概略図

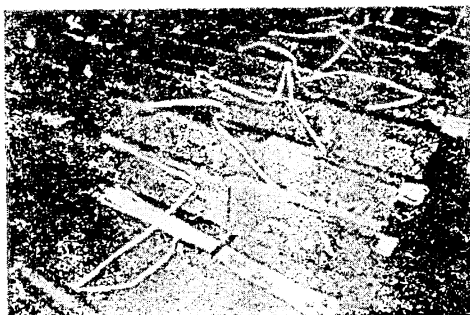


写真-4 引張試験片

と変位を計測した。本試験で外フランジ側に設置したデジタル変位計の読み値が2.0mmを超過した段階で载荷を終了した。

引張試験ではJIS Z 2241に基づき、伸び量と降伏荷重および最大荷重を計測した。この際、試験片の側面にひずみゲージを写真-4に示すように貼付し、载荷過程における応力-ひずみ関係を求めた。

(3) 試験結果

a) 圧縮試験結果

図-10、図-11に圧縮試験結果を示す。いずれの供試体も1100kN前後で降伏したが、非载荷部から採取した供試体No.5に比べ、曲げ加工を行ったNo.1～No.4の方が、全体的に同一荷重に対するひずみが小さい傾向にあった。また、いずれの試験片においても、降伏荷重は非载荷部から採取した供試体No.5とほぼ同程度であり、曲げ加工で生じたフランジ部の波打ちやウェブの座屈の影響はほとんどないことが分かった。

b) 引張試験結果

写真-5に引張試験後の試験片の破断状況を、表-8に引張試験結果を示す。写真-5から破断状況は特筆すべき差異はなかったことが分かる。しかしながら、表-8の伸び量に着目すると、非载荷部から採取した試験片は30%程度伸びたのに対し、曲げ加工した試験片は、20%前後しか伸びていない。これはすでに引張の塑性ひずみが残存

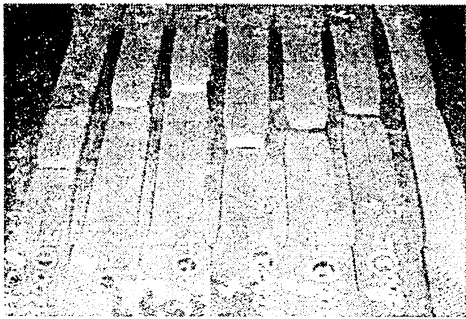


写真-5 試験片No.1～7の破断状況

表-8 引張試験結果

試験片	項目		
	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
No.1	353	469	23
No.2	376	469	24
No.3	368	480	21
No.4	375	483	20
No.5	357	472	22
No.6	363	473	21
No.7	317	454	31
No.8	399	496	17
No.9	378	487	19
No.10	449	531	16
No.11	411	504	18
No.12	347	459	30

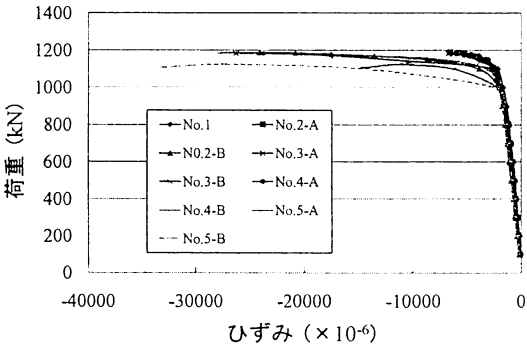


図-10 荷重-ひずみ曲線

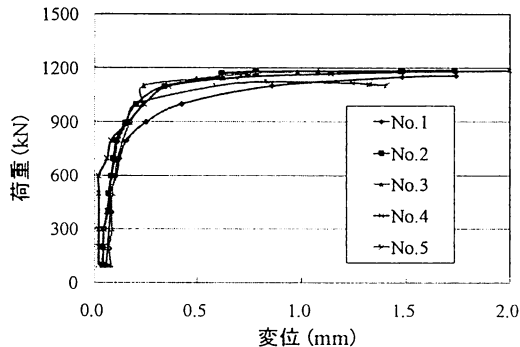


図-11 荷重-変位曲線

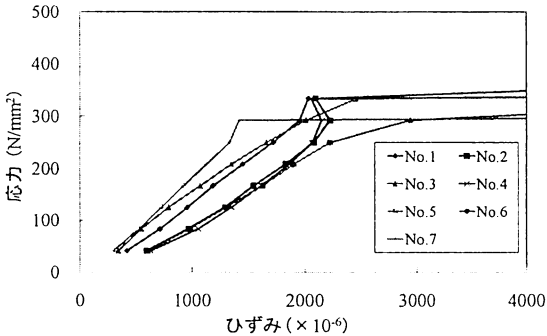


図-12 応力-ひずみ曲線 (H-200)

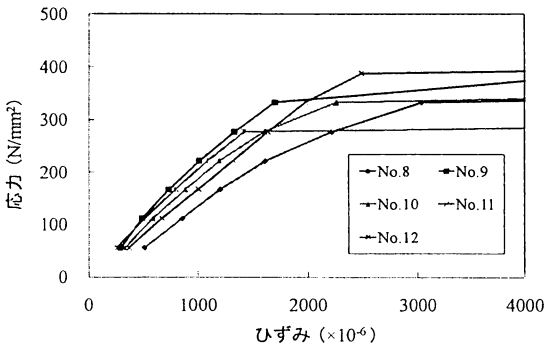


図-13 応力-ひずみ曲線 (H-125)

表-9 ヤング係数結果

番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
ヤング係数 ($\times 10^5 \text{ N/mm}^2$)	1.64	1.73	1.43	1.74	1.38	1.12
番号	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
ヤング係数 ($\times 10^5 \text{ N/mm}^2$)	2.06	1.47	1.98	1.84	1.72	1.84

していたためと考えられる。さらにH-200, H-125ともに非載荷部から採取した試験片の降伏点, および引張強さが最も小さくなっている。これは, 曲げ加工によって試験片が既に降伏し, 加工硬化となっているからと考えられる。

図-12, 図-13に引張試験から求めた応力-ひずみ曲線を示す。降伏するまで線形関係を示していないことから, 曲げ加工によって既に降伏していることが分かる。この応力-ひずみ関係から求めたヤング係数結果を表-9に示す。すべての供試体で, 応力とひずみが直線関係にある範囲だけを取り出し, それを原点を通る直線で回帰し, その傾きをヤング係数とした。ヤング係数は概ね非載荷部から採取した試験片に比べ, 54~96%に低下した。このことは, 曲げ加工条件によってヤング係数が低下するため, 鋼材のひずみから求める応力換算法は見直す必要があることを示唆した結果といえよう。

4. 結論

本試験で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 曲げ起点と, 曲げ終点近傍のひずみの大きさは小さ

くなり, ひずみの変化は, 形状変化が明確に確認できる箇所では変化量が大きい。

(2) 曲げ加工後の経時変化はほとんど生じなかった。

(3) 本試験に用いたロールベンダー加工機による最小曲げ半径は, H-200では $R=3,800\text{mm}$ 程度, H-125では $R=1,400\text{mm}$ 程度であった。

(4) 曲げ加工後の試験片から採取した供試体と, 非載荷部から採取した供試体は, 降伏荷重がほぼ同程度であり, 曲げ加工で生じたフランジ部の波打ちやウェブの座屈の影響はほとんどみられなかった。

(5) ヤング係数は概ね非載荷部から採取した試験片に比べ, 加工硬化の影響で, 54~96%に低下した。

本実験では, フランジの波打ちや, ウェブの座屈等が生じたものの, 塑性変形による強度低下はほとんどないことがわかった。今後は支保工全体に及ぼす影響評価を行う必要があると考えている。また, 曲げ加工試験で, 形状変化が生じていても, 物性試験により, 性能的には問題ないことが確認できれば, 最小曲げ半径以下での曲げ加工が必要である小断面トンネルなどへ活用でき, 適用範囲が広がっていくと考えられる。

参考文献

- 1) 芥川真一, 太田道宏, 安田幸二, 大井健史: 磁歪法を用いたトンネル用鋼製支保工の応力状態, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.117-130, 2005.
- 2) 土木学会トンネル工学委員会: トンネル標準示方書・同解説, 2006.
- 3) 阿部邦夫: 塑性加工, 曲げ加工, 2000.

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON STEEL ARCHED SUPPORT MEMBER UNDER MINIMUM RADIUS

Shiho MAEDA, Naoya NISHIHARA, Kiyoshi UEDA, Isamu YOSHITAKE
and Koji NAKAGAWA

The object of this study is steel arched support members, especially behaviors of the H steel members with radius less than the minimum radius of the specification. The authors investigated deformations of the member after bending test, discussed its properties in this paper. Additionally, we surveyed mechanical properties of some elements obtained from the bending specimen. The bending experiment showed local buckling on web and some corrugations of flange. The elemental test showed Young's modulus of the arched member was lower than that of normal member.