

曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質に関する研究

藤田正則*, 中村 慎**

Mechanical properties of structural steels subjected bending history

Masanori FUJITA*, Makoto NAKAMURA**

1. 序論

鋼構造の部材リユースは、図1に示すように既存建物より柱・大梁・小梁などを丁寧な解体工法により採取して新規の建物に再度使用することである[1-5]。リユース部材は、既存建物から採取された部材、または、既存建物から採取予定の部材であり、接合部・架構を含む。鋼構造の部材リユースにあたっては、丁寧な解体により損傷の少ない部材を採取することが重要である[6]。部材の損傷には、曲がり、ねじれ、反りなどの生じた部材曲や腐食(部分腐食・全面腐食)または減肉などがあるが、軽微な損傷を受けた部材の場合、修復できれば、その適用範囲を広げることできる。例えば、解体時の敷地条件や部材ディテールなどにより図2に示すような変形やねじれなどである。ここでは、曲がりの生じた変形を曲げ加工により新材と同等の形状に修復することを想定する。曲がりの修復には、新材の場合において加熱矯正や冷間曲げが実施されており、加熱温度や範囲、あるいは冷間曲げ時のスプリングバックの影響を少なくする工夫がなされている[7,8]。その際、曲げ半径、曲げ回数、歪速度などが鋼材の機械的性質に及ぼす影響などは、割れが発生しないように経験的に行われていることが多い。

本論は、損傷を有するリユース部材に着目し、曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質に関する基礎的な研究である。まず、鋼材の JIS 試験片を用いて冷間プレス加工による曲げ・曲げ戻しの成形を行い、曲げ半径の異なる鋼材の硬度と歪の関係を把握する。次に、曲げ・曲げ戻しを繰り返して施した鋼材の引張試験を行い、曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質について明らかにする。

2. リユース部材と損傷

2.1 リユース部材の対象

リユース部材には、リユース部材の対象は、日本工業規格材(以降、JIS 規格材という)、大臣認定品および F 値(建築基準法施行令で定められた基準強度)が設定された鋼材である[8]。ただし、ボルト、

溶接材料などの接合材料は除いている。これらは、主に鉄鋼メーカーがプレハブ化した低層建物の鉄骨造、すなわち、工場・作業場、倉庫、事務所などの主要構造部材のうちその大部分を占める JIS 規格材の一般構造用圧延鋼材や溶接構造用圧延鋼材などである。リユース部材の性能評価にあたっては、解体材より試験片を採取できれば破壊試験により性能評価が可能であるが、解体前の試験片の採取は容易ではない。非破壊検査により硬度より、引張強さを推定する方法が提案されている[9-15]。

2.2 鋼材の曲げ加工と曲げ半径

鋼材の冷間曲げ加工には、規格材として冷間ロール成形角形鋼管(BCR)、プレス成形角形鋼管(BCP)などがある。この場合、角部外側の曲率半径の標準値は板厚 t に対して、ロール成形において $2.5t$ ($6\text{mm} \leq t \leq 22\text{mm}$)、プレス成形において $3.5t$ ($6\text{mm} \leq t \leq 40\text{mm}$)とされている。これらは、冷間曲げを受けて角部だけではなく、平坦部においても降伏点が上昇し、ばらつきが大きくなることを考慮して、降伏点のレンジや降伏比が定められている[9]。また、冷間曲げ加工の場合、柱、ブレースなど塑性変形能力が要求される部位における内側曲げ半径は、応力方向が面に沿った方向において $8t$ 以上、応力方向が面と直角方向において $4t$ 以上、塑性変形能力が要求される部位の内側曲げ半径は、応力方向が面に沿った方向において $8t$ 以上、応力方向が面と直角方向において $4t$ 以上、塑性変形能力が要求されない部位においては、 $2t$ 以上とさ

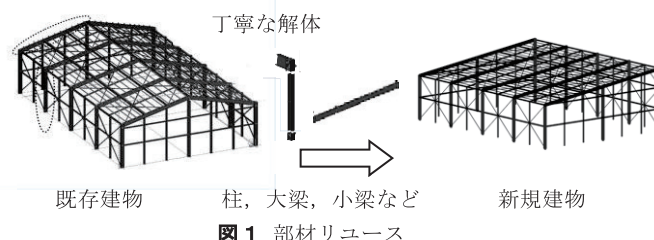


図1 部材リユース



(a) ウェブ (b) フランジ

図2 解体時のH形鋼の残留変形

*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture and Building Engineering

**特別助手 建築学科

Research Associate, Dept. of Architecture and Building Engineering

れている[16]。これらは、曲げ加工時の板厚の外表面に生じる割れによって曲げの加工限度により最小曲げ半径が規定されている。上記を踏まえて、ここでは、L字やV字曲げなどのベンダー曲げを想定した冷間曲げ加工による部材の修復を取り上げる。

3. 実験概要

3.1 試験体形状

試験体のパラメータは、リユースを想定した曲げ履歴を受けた鋼材とし、表1に示すような鋼材の曲げ半径、曲げ回数、板厚とする。試験体の内側曲げ半径は、 $R=1t, 2t, 8t$ とし、試験体の形状は図3に示すようなJIS引張試験片1A号とする。試験体数は板厚12mm、22mmごとに各8体の計16体とし、使用鋼材は各板厚ごとに同一ロットから採取した一般構造用圧延鋼材(SS400)とする。曲げ加工の回数は、部材の損傷の程度によっても異なるが、正曲げ・曲げ戻しを1サイクルとして曲げ加工として3回まで行う。

3.2 試験体の製作・計測

曲げ加工は、通常曲げ加工に使用しているプレス機(500t)を用いて、鋼材を各曲げ半径 $R=1t, 2t, 8t$ になるよう曲げ加工を施す。その際、曲げ加工時の鋼材の引張側の歪(中央部)を計測する。曲げ加工を施した後、鋼材を裏返し、再び载荷して元の形状に曲げ戻す。曲げ加工・曲げ戻し加工の1サイクルを模式図を図4に示す。その際、図5に示すような曲げ半径を有する曲げ加工用治具を载荷側と支点側に製作する。なお、曲げ半径 $R=1t, 2t, 8t$ に鋼材を曲げ加工した範囲を図3に示している。超音波硬度計を用いて、曲げ加工・

曲げ戻し後の表面のビッカース硬さ(以降、硬度という)を計測する。計測箇所はグラインダーで研磨した状態で、3点の平均値とする。試験体の曲げ加工状況、曲げ戻し加工の状況を図5に各々示す。鋼材の正曲げにおいて、試験体の引張側と接触する治具に溝をつけて、曲げ加工時に接触しないように歪ゲージを添付する。試験体の曲げ加工況を図5(a)(b)、曲げ戻し加工を図5(c)(d)に各々示す。鋼材の正曲げにあたっては、曲率半径に対してスプリングバックを考慮して曲げ加工を行う。また、曲げ戻し加工の際、架台にステンレスプレートを設置して摩擦を少なくしている。

4. 実験結果

各試験体の曲げ加工の前後の硬度および引張試験の実験結果一覧表を表2に示す。

4.1 曲げ加工と硬さ

1回目の曲げ加工後の各試験体の状況を図6に示す。曲げ半径 R が $1t$ の2回目の曲げにおいて、試験体に割れが発生し、 $R=2t$ およ

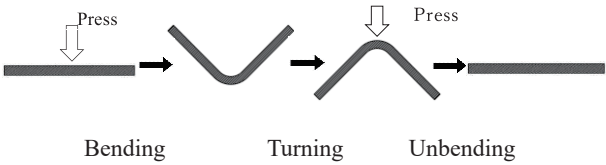


図4 曲げ加工のプロセス

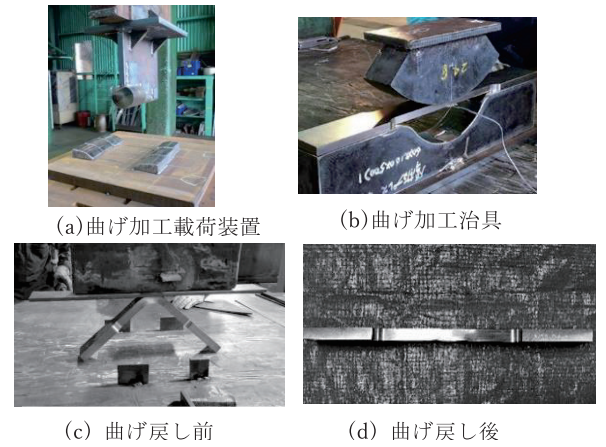


図5 曲げ加工

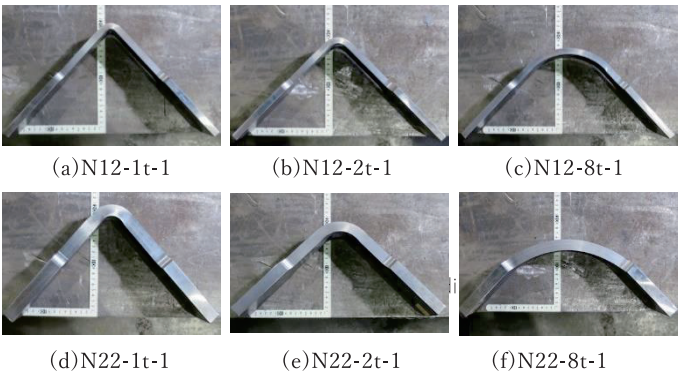


図6 曲げ加工後の試験体

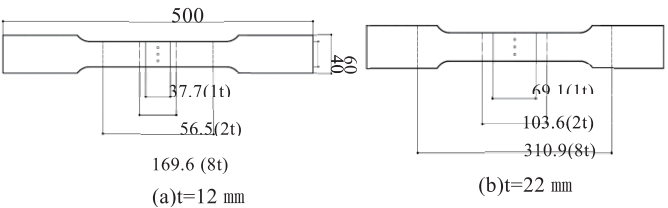
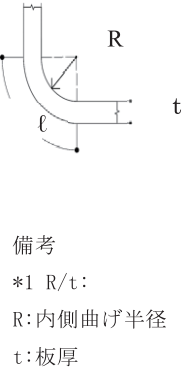


図3 試験体形状

表1 試験体リスト

Specimen	Thickness mm	R/t	R mm	Bending count
N12-R0t	12	-	-	0
N12-R1t-1		1	12	1
N12-R2t-1		2	24	1
N12-R2t-2		2	24	2
N12-R2t-3		2	24	3
N12-R8t-1		8	96	1
N12-R8t-2		8	96	2
N12-R8t-3		8	96	3
N22-R0t	22	-	-	0
N22-R1t-1		1	22	1
N22-R2t-1		2	44	1
N22-R2t-2		2	44	2
N22-R2t-3		2	44	3
N22-R8t-1		8	176	1
N22-R8t-2		8	176	2
N22-R8t-3		8	176	3



び 8t において曲げ加工による各試験体の割れは全て発生しなかった。

試験体の曲げ加工前後の表面のビッカース硬さの分布を図 7 に示す。各試験体ビッカース硬さは共に中央部で最大となっており、端部になるに連れて小さくなる傾向にある。試験体中央より左右対称となっていることから、曲げ加工は概ね均等になっていると考えられる。

4.2 引張試験

曲げ加工した試験体のうち、板厚 22 mm の R=8t の試験体の破断位置は曲げ半径範囲 ℓ 内であるが、その他の全て試験体は半径範囲 ℓ の外側に位置している。これは、t=22 以外の試験体の破断は曲げ関係の外側に位置することから、曲げ半径による曲げ加工を施した際、曲げ範囲内において歪硬化の影響を受けて強度が大きくなったものと考えられる。同様に、同じ曲げ半径においても板厚 22 mm は歪硬化の影響が板厚 22 mm より小さいものと考えられる。板厚に対する曲げ半径が小さい場合、塑性変形量が大きくなったものと考えられる。試験体の曲げ加工前後の表面のビッカース硬さと曲げ回数との関係を図 8 に示す。ビッカース硬さは曲げ回数が増えるに連れて大きくなる傾向にある。各板厚ともに曲げ回数が増えるに伴い、表面硬度は徐々に大きくなり、3 回目の曲げ加工の板厚 t=12, 22mm の硬さ

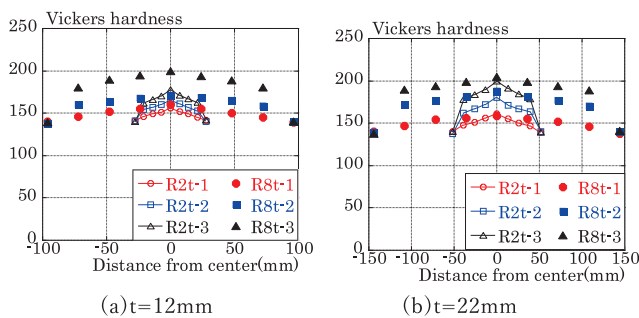


図 7 ビッカース硬さの分布

(中央部) は 1 回目の各々 1.23, 1.28 倍であり、歪硬化の影響を受けていることがわかる。

試験体の曲げ加工前後の表面のビッカース 1 回目の曲げ加工した試験体の荷重歪曲線を図 9 に示す。ただし、試験体中央部の引張側の歪であり、曲げ加工無しの試験体と合わせて示しており、図 9 (c)(d) は、R=8t の試験体の部位の歪を抽出したものである。各試験体共に 1 回目の曲げ加工において、板厚が 12mm と 22mm の場合においても降伏棚が消失したランドハウス型の荷重歪曲線になっている。2 回目以降の曲げ回数においても同様である。R=8t の場合、降伏棚は 1 回目において消失するものの、歪硬化の影響が観察される。t=12mm の場合、試験体中央部が局所的に歪硬化の影響が見られるのに対して、t=22mm の場合には、曲げ半径全体に渡って歪硬化の影響を受けている。

5. 考察

5.1 曲げ半径と最大歪の関係

鋼板が冷間均等曲げを受ける場合、最外縁の歪 ε は下式で表すことができる。

$$\varepsilon = \frac{1}{1+2\left(\frac{R}{t}\right)} \quad (1)$$

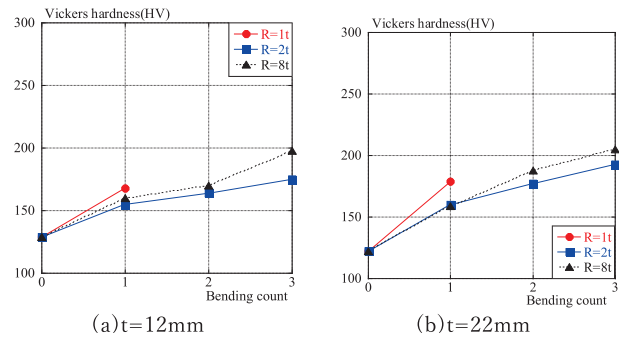


図 8 ビッカース硬さと曲げ回数

表 2 実験結果一覧表

No.	Specimen ^{*1}	Thickness t (mm)	Vickers hardness HV ①	After bending			②/①	Tensile test								
				Maximum strain(%)				Vickers Hardness s ② HV	Tensile strength N/mm2	Fracture location (mm)	*3	Elongation (%)	Yield strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)		
				1st ⁻ bending	2rd ⁻ bending	3rd ⁻ bending										
1	N12-R0	12	129	-	-	-	129	1.00	433	55	-	31	298	69	Remark *1 N13(thickness) -R1t(Bending radius) -1(Bending count) *2 Not measured *3 Failure location I: inside bending radius, O:Outside bending radius	
2	N12-R1-1		129	16.0	-	-	-	168	1.30	452	-112	O	12	279		62
3	N12-R2-1		124	19.0	-	-	-	155	1.25	452	113	O	11	292		65
4	N12-R2-2		131	18.9	*2	-	-	164	1.25	458	110	O	13	283		62
5	N12-R2-3		129	22.5	*2		-	175	1.36	463	-118	O	12	288		62
6	N12-R8-1		129	6.7	-	-	-	160	1.24	452	123	O	7	308		68
7	N12-R8-2		135	6.8	8.6	-	-	170	1.26	460	108	O	8	294		64
8	N12-R8-3		127	7.0	8.7	9.6	-	198	1.56	467	-117	O	9	306		66
1	N22-R0	22	122	-	-	-	122	1.00	427	8	-	38	290	68		
2	N22-R1-1		134	24.2	-	-	-	179	1.34	480	-129	O	7	325	68	
3	N22-R2-1		139	14.0	-	-	-	160	1.15	475	-110	O	15	310	65	
4	N22-R2-2		136	17.6	*2	-	-	177	1.30	479	117	O	9	332	69	
5	N22-R2-3		137	22.0	*2		-	193	1.41	476	-120	O	9	311	65	
6	N22-R8-1		129	7.3	-	-	-	159	1.24	476	38	I	25	361	76	
7	N22-R8-2		131	7.1	8.6	-	-	188	1.44	488	80	I	21	384	79	
8	N22-R8-3		131	6.7	7.9	7.4	-	205	1.57	493	79	I	18	386	78	

Remark
^{*1} N13(thickness)
 -R1t(Bending radius)
 -1(Bending count)
^{*2} Not measured
^{*3} Failure location
 I: inside bending radius,
 O: Outside bending radius

t: 鋼板の板厚, R: 鋼板の内側曲げ半径

(1)式は、板厚が大きく、曲げ半径が小さいほど曲げひずみが大きくなり、最大歪が大きくなることを示している。曲げ加工に伴う歪速度、バウシinger効果、残留歪の影響は考慮されていないものの、 $R=1t, 2t, 8t$ の均等曲げを受けると、(1)式による最大歪は各々33%, 20%, 6%程度となる。

各試験体の1回目の曲げ加工時の R/t と最大曲げ歪の関係を図10に示す。ここで、曲げ加工時の試験体中央部の引張側における最外縁の最大歪である。1回目の曲げ加工時の最大曲げ歪は、(1)式の近傍に概ね分布していることがわかる。各試験体の曲げ回数と最大曲げ歪の関係を図11に示す。曲げ半径 $R=8t$ の試験体の最大曲げ歪は板厚 $t=12\text{mm}$ および 22mm 共に1回目の曲げ加工で大きくなるものの、2回目以降概ね一定になる。曲げ半径 $R=2t$ の最大曲げ歪は、1回目の曲げ加工で大きくなった後、2回目以降やや増大する傾向となる。これは、 $R=2t$ の試験体は $R=8t$ よりも歪硬化の影響を受けているものと考えられる。

曲げ半径 $R=8t$ の試験体の残留ひずみは、曲げ回数に関係なく概ね同じである。ただし、残留ひずみは各曲げ回数時の最大ひずみと曲げ戻し後の最大ひずみの差分である。

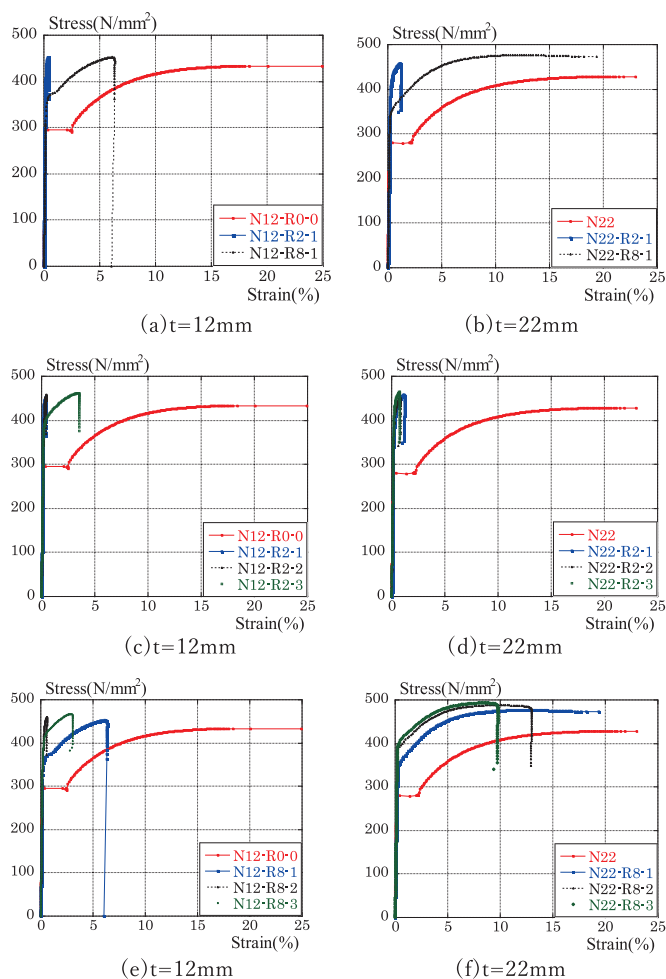


図9 荷重ひずみ曲線

5.2 機械的性質と曲げ回数の関係

各試験体の板厚ごとの引張強さと曲げ回数の関係を図12(a)(b)に示す。各試験体の引張強さは曲げ加工を受けると大きくなるが、板厚と曲げ半径によってその傾向はやや異なる。 $t=12\text{mm}$ の場合、引張強さは、曲げ回数が増えるに連れて緩やかに増大し一定になる。これは、全ての試験体において破断位置が曲げ半径の外側であり、歪硬化の影響を受けていない箇所に該当するためである。 $t=22\text{mm}$ の場合、引張強さは曲げ回数が増えるに連れて1回目でやや増大するものの、2回目以降概ね一定になる。

各試験体の板厚ごとの降伏耐力と曲げ回数の関係を図13(a)(b)に示す。板厚 12mm の試験体の降伏耐力は、曲げ回数に関わらず概ね一定の値となる。これに対して、 $N22-8t$ の降伏耐力は曲げ回数が増えるに連れてやや増大する。破断位置が曲げ半径の内側であり、歪硬化の影響をやや受けているためである。

各試験体の板厚ごとの伸びと曲げ回数の関係を図14(a)(b)に示す。各試験体の伸びは1回目の曲げ加工を受けると大きく減少するが、2回目以降、板厚によりその変動は異なる。板厚 12mm の試験体の伸びは、2回目以降、概ね一定になっている。 $N22-2t$ および $N22-8t$ の試験体は曲げ回数が増えるに減少するが、その減少の割合は、 $N22-2t$ が大きい。

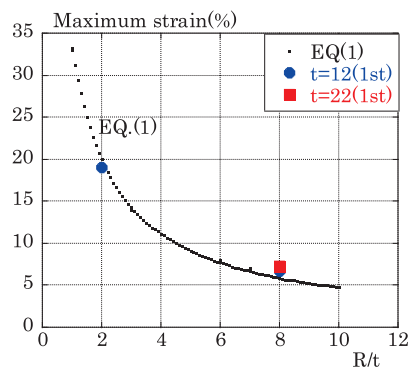


図10 最大曲げひずみと R/t

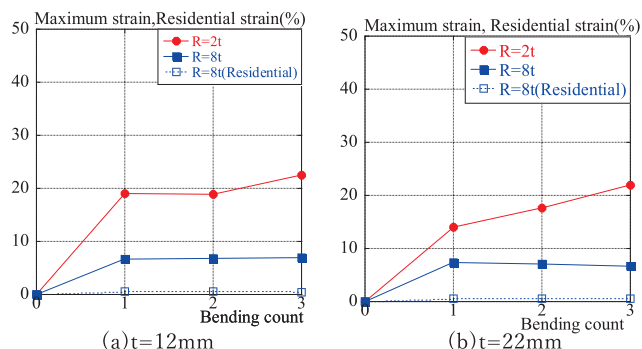


図11 最大曲げひずみと曲げ回数

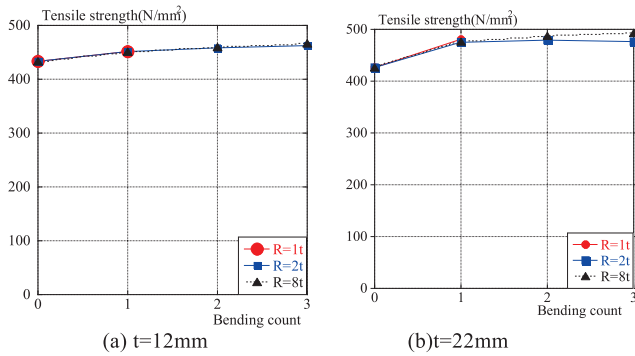


図 12 引張強さと曲げ回数

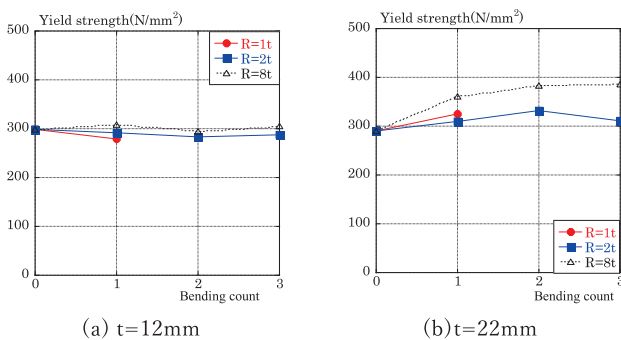


図 13 降伏耐力と曲げ回数

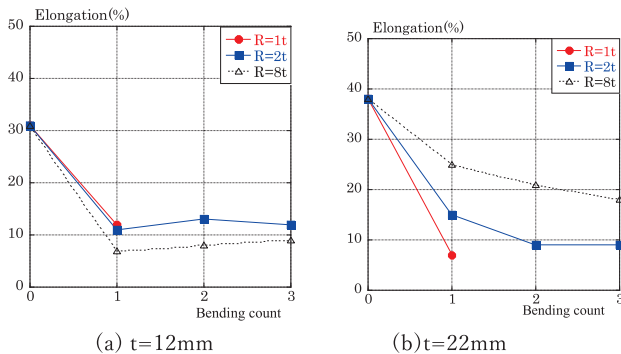


図 14 伸びと曲げ回数

6. 結論

本論では、リユースを想定して曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質について検討した結果、下記のことが明らかになった。

- 1) 曲げ加工時の引張側における最外縁の最大歪は、(1)式の近傍に概ね分布している。
- 2) 鋼材のビッカース硬さは、曲げ回数が増えると徐々に大きくなり、3回曲げ時に最大で曲げ加工前の1.6倍程度になる。
- 3) 鋼材の引張強さは、1回目の曲げ加工においてやや大きくなるものの、2回目以降、概ね同じになる。
- 4) 鋼材の降伏耐力は、板厚12mmにおいて曲げ加工の回数にかかわらず概ね同じであるが、板厚22mmにおいて曲げ半径の影響を受け、変動する。
- 5) 鋼材の伸びは、1回目の曲げ加工において大きく減少し、その変動は2回目以降、板厚の影響を受ける。

謝辞

本研究は、神奈川大学工学研究所との共同研究により実施されたものです。各関係者に謝意を表します。

参考文献

- [1] 日本建築学会：鋼構造環境配慮設計指針（案）-部材リユース-，2015.12
- [2] 日本建築学会構造委員会 鋼構造運営委員会：建築鋼構造における環境性とは何か，日本建築学会大会 構造部門パネルディスカッション，2002.8
- [3] 日本建築学会：建築部材のリユースマニュアル・同解説，2009.10
- [4] 日本建築学会 構造委員会 鋼構造運営委員会：鋼構造のリユースの現状と今後のあり方，日本建築学会大会（東海）構造部門パネルディスカッション，2012.9
- [5] 日本建築学会，構造委員会鋼構造運営委員会：東京五輪を契機に鋼構造環境配慮設計をどのように次世代に引き継ぐか，日本建築学会大会（東北）構造部門パネルディスカッション，2018.9
- [6] FUJITA, M., IWATA, M.: Reuse System of Building Steel Structures, STRUCTURE & INFRASTRUCTURE ENGINEERING, Vol. 4, No. 3, Taylor & Francis, pp. 207-220, 2008.6
- [7] 日本塑性加工学会：塑性加工入門，コロナ社，2007.8
- [8] 岡松眞之，橋本潔，望月晴雄，窪田蔵：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版，1993.5
- [9] 遮断法人鋼材倶楽部：新しい建築構造用鋼材，鋼構造出版，1998.1
- [10] 藤田正則，前田親範，岩田 衛：建築鋼構造のリユースシステムに関する研究 -リユース材の構造性能-，日本建築学会環境系論文集，第600号，pp. 83-89，2006.2
- [11] 藤田正則，文蔵亮介，岩田 衛：建築鋼構造のリユースシステムに関する研究-リユース材の加工とその性能評価-，日本建築学会環境系論文集，第620号，pp. 97-102，2007.10
- [12] 藤田正則，村井正敏，前田親範，岩田 衛：建築鋼構造のリユースシステムに関する研究 -サステナブルビル構造の試施工によるリユースの検証-，日本建築学会環境系論文集，第75巻 第656号，pp. 923-928，2010.10
- [13] 藤田正則，田知也，山本正幸，岩田 衛：リユースを想定した鋼構造部材の性能評価 -材質の推定例-，日本建築学会技術報告集，第20巻，第44号，pp. 45-48，2014.2
- [14] 藤田正則，岡崎駿介：桁面ブレースを有する鋼構造建物の部材リユース -設計理フローの検証-，日本建築学会技術報告集，第24巻，第58号，pp. 1047-1051，2018.10
- [15] 藤田正則，吉岡 励，中澤祥二，加藤史郎：リユース部材を用いた鋼構造建物の設計法に関する研究 -桁方向ブレース構造の耐震性能評価-，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第748号，pp. 903-911，2018.6
- [16] 日本建築学会，建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事，2018.1