

鋼部材リユースに向けた建築物の実態把握と鋼材の材料科学的分析

Identification of Versatile Modules and Microstructure Analysis of Post-Yield Steel towards Reuse in Steel Structures

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 佐藤史都

Abstract

This research comprised two subjects towards the common goal of making steel reuse a reality. First, engineering drawings were surveyed to identify columns with welded beam stubs that are versatile, i.e., that are of the steel grade and dimensions that are used most frequently in actual buildings, and are therefore suited as reuse modules. Second, steel samples before and after plastic deformation were examined by EBSD analysis and Vickers hardness tests. Based on a survey of 120 steel buildings constructed in Hokkaido, four candidates for column modules were identified. EBSD analysis was able to quantify plastic strain. Vickers hardness proved to be an effective method to analyze progression of strain aging with time.

Keywords: steel structure, reuse, strain aging, EBSD, Vickers hardness test

1. はじめに

本研究は、鋼部材リユースを阻む課題のうち、構造の画一化と、供用歴による性能低下の評価に注目したり。前者については、工場生産される柱、つまり角形鋼管と梁ブラケットを複層分溶接した柱部材（図1参照）のモジュール化を模索した。柱は、溶接量が集中し、構造重量に占める割合が大きいためリユースの意義が大きく、周囲の部材とボルト等で接合されるので解体しやすい等、リユースに適した特性を持つ。そこで、適切なモジュール化を見出す目的で、既存鋼構造建築物の現状を把握し、採用頻度が高い形状や寸法を分析した。後者で最大の懸念は、地震で塑性変形を受けた鋼材の残存性能である。材料試験や繰返し載荷実験によって実証した例²⁾はあるが、材料科学的な解明が求められている。そこで、鋼材のひずみ硬化とひずみ時効を材料組織観察や表面硬さ試験で分析した。

2. 図面調査

北海道内に建設された鋼構造建築物を調査した。調査対象は、許容応力度等計算（ルート2）

または保有水平耐力計算（ルート3）により設計された鋼構造建築物であった。2010年から2022年にかけて審査された合計120件について、設計図面をもとに、①基本情報（階数や用途、構造種、新築・増築の別、延床面積、最高高さ、設計ルート）、②部材長（階高や床梁上端間距離、柱芯間距離、柱継手位置、梁継手位置）、③部材断面と鋼材種、④柱梁接合部（柱につく梁の本数、柱芯と梁軸線の偏心の有無）、⑤柱脚接合部の仕様、⑥構造計算結果（層間変形角や構造特性係数、各階重量）等のデータを収集した。

図2に、120件の構造種別を示す。角形鋼管柱を用いた建物が94件、H形鋼柱を用いた建物が25件、角形鋼管柱とH形鋼柱の両方を用いた建物が1件であった。角形鋼管柱の建物94件は、例外なくラーメン構造で、そのうち2件は、柱にコンクリート充填鋼管（CFT）を使用した。CFTを除外した角形鋼管柱の建物92件は、階数は1階建てから14階建てまでで、3階以下が64件（70%）であった。基準階の床面積は、3,000m²未満が81件（87%）、500m²未満が39件（42%）であった。建物92件に使用された柱

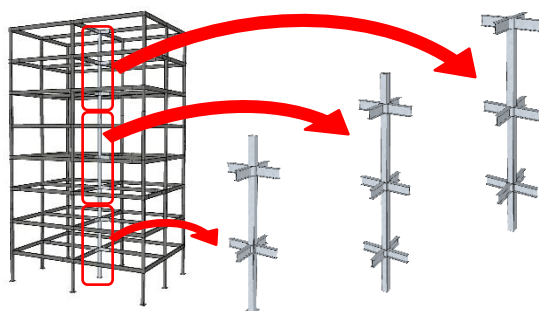


図1 柱部材

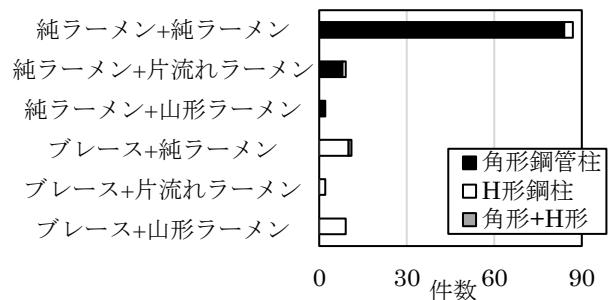


図2 調査建物の構造種別

7,877 本の内訳は、BCR295 が 71%、BCP325 が 27%、SHC355 が 2% (5 階建て事務所 1 件が採用) で、BCP235 はなかった。大梁 11,431 本の内訳は、SS400 が 33%、SN400B が 25%、SN490B が 22%、SM490A が 19% であった。

図 3 に、建物 92 件のそれぞれに使用された柱と大梁の本数と断面数を示す。高層建物や、平面形状が不整形な建物では、柱も梁も断面数が多かったが、柱の断面数が 5 以下の建物が 78 件 (85%)、梁の断面数が 10 以下の建物が 78 件 (85%) を占めた。なお、大梁の寸法規格は、外法一定材を除く JIS 規格材が 65%、外法一定材 (JIS 規格材を含む) が 27%、ビルド材が 6%、不明が 3% であった。JIS 規格の汎用材だけで 61% を占め、建物に使用する全ての大梁が外法一定材を除く JIS 規格材であった建物が 52 件 (57%) があった。

図 4 に、柱 7,877 本の寸法の内訳を示す。断面別で、BCR295 は □-350×350×12、□-400×400×16、□-350×350×16 が多く、BCP325 は、断面別で □-450×450×19 と □-550×550×22 が多く、BCR295 の 94%、BCP325 の 94% が FA の条件を満足した。

図 5 に、大梁 11,431 本のうち、JIS 旧規格材 7,163 本の寸法の内訳を示す。梁せいが、SS400 と SN400B で 400 mm から 500 mm が 57% を、SN490B と SM490A で 600 mm が 72% を占めた。SS400 と SN400B の 99.8%、SN490B と SM490A の 71% が FA の条件を満足した。

3. 柱部材リユースの展望

柱部材 3,699 本のうち、全層の階高が同じ柱部材が 2,114 本、最下層を切断すれば全層の階高を揃えられる柱部材が 1,201 本あり、この両者は汎用性が高く、リユースに適すと考えた。ここから、使用頻度が高い階高と柱・梁断面の組合せ、つまりモジュール候補を見出した。

図 6 に、合計 3,315 本の柱部材の各層階高を示す。事務所や高層店舗では、階高が 3 から 4 m に分布し、工場や倉庫では、階高が 3 から 11 m まで幅広く分布した。3,315 本のうち、階高 3.2 ± 0.1 m と 4.0 ± 0.1 m の柱部材が 453 本 (14%) と 325 本 (10%) を占めた。

図 7 に、階高 3.2 ± 0.1 m と 4.0 ± 0.1 m の柱部材のそれぞれ全 817 箇所と 580 箇所の柱梁節点における、柱と梁の断面二次モーメントの分布を示す。同一節点に梁が複数つく場合は、その最大値をとり、濃淡で個数の多寡を示す。階高 4.0 ± 0.1 m では、柱 □-600×600×25、梁 H-650×300×12×22 の組合せ I と、柱 □-550×550×

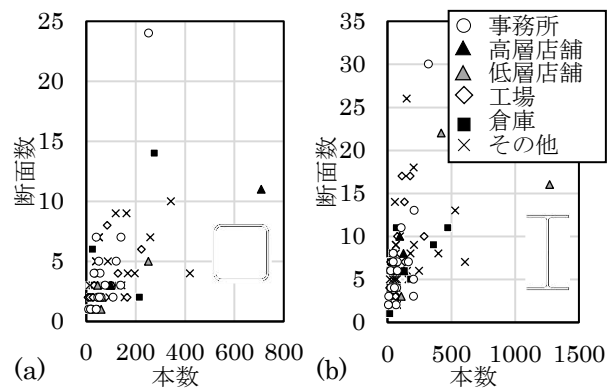


図3 断面数:(a)柱;(b)大梁

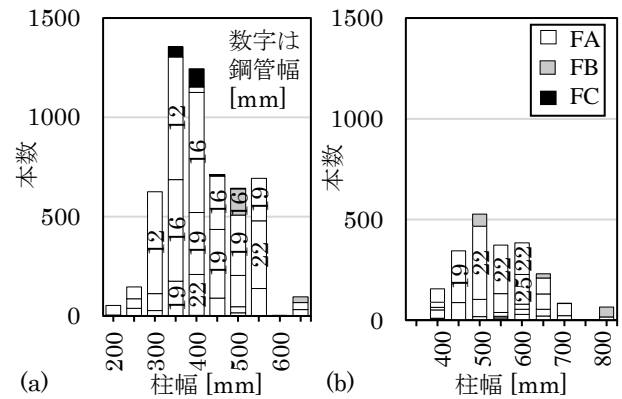


図4 柱寸法:(a)BCR295;(b)BCP325

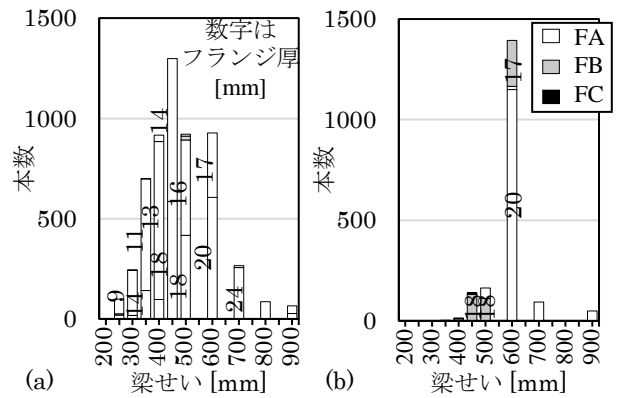


図5 大梁寸法:

(a)SS400・SN400B;(b)SN490B・SM490A

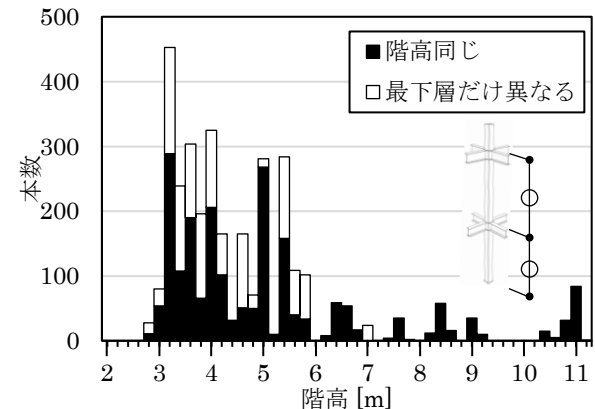


図6 柱部材の階高

22、梁 H-700×300×13×24 の組合せⅡ、階高 3.2 ±0.1 m では、柱□-500×500×19、梁 H-488×300 ×11×18 の組合せⅢと、柱□-300×300×12、梁 H-450×200×9×14 の組合せⅣ近傍の使用頻度が高い。この4者を、近傍範囲を置換するモジュールとした場合に、どれほどの数量と重量を占めるかを算定した。

柱継手が梁上端から 1.2 m、梁継手が柱中心から 1.0 m に位置し、標準的な通しダイアフラム形式の接合部を採用すると仮定すると、組合せⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの一階当たり重量はそれぞれ 2.2 t、1.9 t、1.3 t、0.6 t だった。それぞれの組合せが置換する範囲を、柱幅が同一で、梁せいが同一か1サイズ小まで、柱と梁の断面二次モーメントを+10%から-20%まで、(図7で矩形で囲まれた範囲)とした。階高 4.0±0.1 m では、組合せⅠが 87 個 (15.0%)、組合せⅡが 32 個 (5.5%) を包含し、全重量 973 t のそれぞれ 181 t (18.6%) と 60 t (6.1%) を占めた。階高 3.2±0.1 m では、組合せⅢが 140 個 (17.1%)、組合せⅣが 164 個 (20.1%) を包含し、全重量 763 t のそれぞれ 168 t (22.1%) と 97 t (12.8%) を占めた。全柱部材 3,699 本のうち、組合せⅠからⅣがそれぞれ 1.3%、0.5%、2.1%、2.5% を包含した。全柱部材の全節点の総重量 8,916 t のうち、組合せⅠからⅣが包含する節点の重量はそれぞれ 2.0%、0.7%、1.9%、1.1% で合計 5.7% だった。

この4種の柱・梁寸法は、柱部材モジュールの候補である。柱部材をリユースするには、現在

は溶接接合される柱継手や、頭付きスタッドで梁に接合される合成床スラブの接合法を、解体容易なものに転換する技術開発が待たれる。

4. 材料科学的分析

表1に、ひずみ硬化とひずみ時効を検証するために実施した、(a) 電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM) の電子後方散乱回折 (EBSD) による材料組織観察と (b) ビッカース硬さ試験の構成を示す。SN400B の電炉材と高炉材、SN490B の高炉材 (以下、順に鋼材 A、B、C) から、φ10 の円形断面をもつ JIS 14A 号試験片を採取し、単調引張試験により予ひずみ 8% を与えた。表2に、それぞれの鋼材の全窒素 TN、自由窒素 FN 含有量を示す。ひずみ時効に影響する FN 含有量は、鋼材 B と C より鋼材 A が大きかった。予ひずみを与えた試験部と、予ひずみが入らなかったφ16 のグリップ部を、引張方向に直交する方向に切断し、その表面を鏡面研磨処理した。

試験(a)では、結晶方位解析によって、観察面に直交する方向の結晶方位分布を色別で示す IPF マップと、注目するピクセルと隣接ピクセルとの方位差を表す KAM マップを中心に観察した。試験(b)では、試験荷重 1 kgf、加力時間 15 秒で、7、8 点の硬さを計測し、その最大値と最小値を除いた平均値を当該試料のビッカース硬さ (H_v) とした。

図8と9に、IPF マップと KAM マップをそれぞれ示す。倍率は 500 倍、観察領域は 150 ×

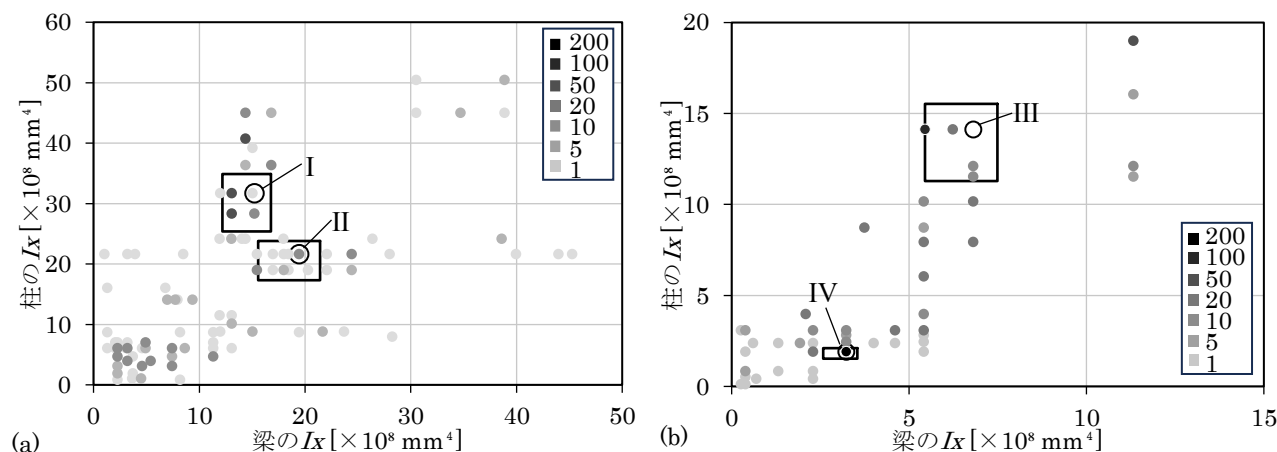


図7 強軸まわりの断面二次モーメント:(a) 階高4.0±0.1 m;(b) 階高3.2±0.1 m

表1 実験計画

実験項目	予ひずみ量	養生期間		
		鋼材 A	鋼材 B	鋼材 C
(a)	なし	0 日	-	0 日
	8%	7 日、2 年以上	-	2 年以上
(b)	なし	0 日	0 日	0 日
	8%	3、7、14、30 日、2 年以上	2 年以上	2 年以上

350 μm 、ステップサイズは 0.5 μm である。IPF マップから、結晶粒の大きさは、鋼材 A では 25 から 30 μm 、鋼材 C では 10 から 15 μm で、予ひずみの有無で大きさの変化はなかった。いずれの鋼材も、予ひずみによって結晶粒内の色にグラデーションが生じ、結晶粒の方位差が生じた。KAM マップから、結晶粒内の方位差を示す KAM 値の平均は、鋼材 C では、予ひずみ前後で 0.584° と 1.229° と相関がみられたが、鋼材 A では、1.528° と 1.104° と相関が逆転した。これは、ひずみ 0% の試料に微細結晶粒領域が多いことが KAM 値を上昇させる要因である可能性が高い。

図 10 に、試験(b)の結果を示す。予ひずみにより H_v は全鋼材で上昇し、その増え幅は鋼材 C よりも鋼材 A、B の方が大きく、電炉材と高炉材による違い、FN 含有量による違いは見られなかった。鋼材 A で、予ひずみを与えたあと、日を経て H_v が上昇した原因は、ひずみ時効に求められる。ひずみ時効は、30 日を経てほぼ収束した。ビッカース硬さ試験が、ひずみ時効を検出する有効な方法であることを確認できた。

5. まとめ

建築鋼部材のリユースを確立する目的で、北海道の鋼構造建築物の図面調査と、ひずみ硬化とひずみ時効を材料科学的に検証する実験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 鋼材リユースを推進するためのモジュールを、階高が $4.0 \pm 0.1 \text{ m}$ と $3.2 \pm 0.1 \text{ m}$ で 2 種ずつ、計 4 種見出した。柱鋼材種は、柱幅 550 mm 以下で BCR295、600 mm 以上で BCP325、梁はなるべく JIS 普及材で、鋼材種は、梁せい 500 mm 以下で SS400 または SN400B、500 mm 以上で SN490B または SM490A が適している。北海道で建設された鋼構造建築物でみると、これらは本数にして、全柱部材の 1.3%、0.5%、2.1%、2.5% を、重量にして、全柱部材の 2.0%、0.7%、1.9%、1.1% で合計 5.7% を包含する。
- 2) 塑性ひずみを受けた鋼材試料は、結晶粒内に方位差を生じさせ、ビッカース硬さが向上した。結晶構造は変わらないまま、時間を経るとビッカース硬さはさらに向上したが、やがて一定値に収束した。ビッカース硬さ試験によって、ひずみ時効を検出できることを確認できた。

謝辞

図面調査を共同実施した、北海道科学大学の前田先生、北海道総合研究機構の森松様、千葉

表2 鋼材の化学成分

	鋼材A	鋼材B	鋼材C
TN [%]	0.0080	0.0051	0.0055
FN [%]	0.0071	0.0048	0.0049

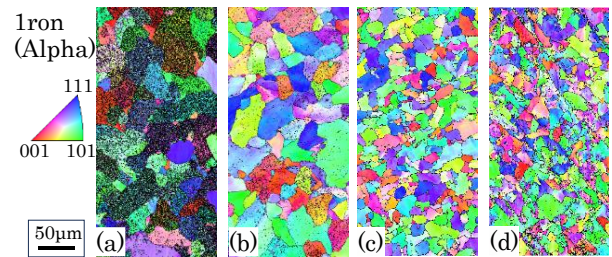


図8 IPFマップ:

- (a) 鋼材A 予ひずみ0%; (b) 鋼材A 予ひずみ8%; (c) 鋼材C 予ひずみ0%; (d) 鋼材C 予ひずみ8%

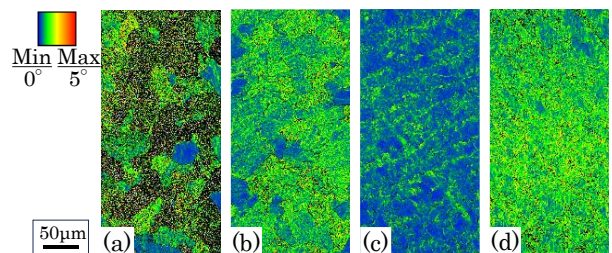


図9 KAMマップ:

- (a) 鋼材A 予ひずみ0%; (b) 鋼材A 予ひずみ8%; (c) 鋼材C 予ひずみ0%; (d) 鋼材C 予ひずみ8%

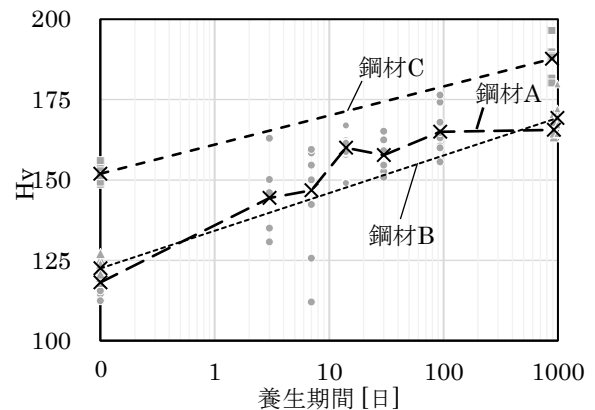


図10 ビッカース硬さ試験結果

様、長瀬様、材料科学分析にご協力いただいた、北海道大学強度システム設計研究室の池田先生に心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) Fujita et al.: Japanese Efforts to Promote Steel Reuse in Building Construction, Journal of Structural Engineering, ASCE, 149(1), 04022225, 2023.1
- 2) 中川ほか: 塑性変形とひずみ時効を経た鋼梁の残存耐震性能と形状不整, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, 第30巻, 497-506, 2022年11月