

ブレース付鋼架構に関するアンケート調査と構造特性係数の性能評価

Questionnaire Survey of Steel Braced Frame Design and Evaluation of Prescribed Structural Characteristic Factors

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 高田慎一郎

Abstract

The state of practice of steel braced frame design was examined by two approaches. First, a questionnaire survey on the design choices for steel braced frames was conducted targeting registered professionals. The answers indicated that steel brace frames are regarded as a viable choice for various building types, but the design assumptions and procedure vary significantly within the profession. Second, the adequacy of the current design standard was examined by comparing the cumulative energy dissipation of braces obtained from a number of cyclic loading tests against that implicitly assumed in the structural characteristic factor, D_s , specified in the design standard. The factor D_s was found to be very conservative to represent the experimental performance of braces.

Keywords: Steel structures; Braced frames; Survey; Design; Structural characteristics factor; Connections

1. はじめに

ブレース付鋼架構の設計法は、現行基準¹⁾や指針^{2),3)}で明確に示されていないために、様々な設計が混在している。その実態を把握するために、2014年⁴⁾と2018年に、建築構造設計者を対象にアンケート調査を実施し、設計の考え方や方法が、設計者によって異なっている実態を把握した。

本報告では、2018年のアンケート調査をまとめ、また、構造特性係数に基づく現行規準¹⁾が、ブレースの耐震性能をどこまで正しく反映しているかを、実験データを通して検討する。

2. ブレース構造に関するアンケート調査

2018年11月30日から、日本建築構造技術者協会や日本建築構造設計事務所協会の各支部の協力を仰ぎ、建築構造設計に従事される実務設計者を対象に、アンケート調査を実施した。2019年2月7日までに、メールで68名、郵便で6名の合計74名から回答をいただいた。アンケートは、①回答者、②適用範囲、配置方法と断面形状、③設計法、④接合部の型式、⑤接合部の設計の5項目、合計26の質問で構成された。

回答者74人の内訳は、構造設計を業務とする法人の代表者が36%、構造設計を職業とする個人が33%、法人内で構造設計を業務とする部署の代表が26%、法人内で構造設計以外を業務とする部署の代表が1%、その他(総括設計事務所の代表、複数業務を経験)が11%で、業種は、設計事務所が73%、ゼネコンが20%、鉄工所・ファブリケーターが1%、その他(研究機関、指定適判機関)が7%であった。なお、全体を通して、座屈拘束ブレースを採用するので、適切に回答できない、という回答も少なからずあった。

ブレース付鋼架構を採用する建築用途として、事務所建築、自走式駐車場、大規模店舗の3つに注目して質問した。これらにブレース付鋼架構を検討するかどうか、という質問に対して、採用するとの回答が67, 78, 68%で、特に自走式駐車場で高かった。図1に、ブレースの細長比による部材種別を質問した結果を示す。BA材の回答が多かったが、座屈拘束ブレースが廉価になってきたために、近年はBA、BBの採用例が少なくなった、あるいは、限られた構面で剛性を確保する目的で、大断面ブレースを使用する、などの追記があった。

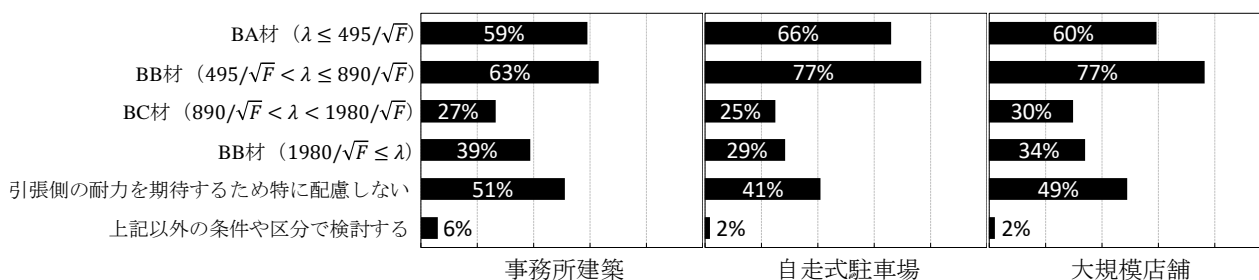


図1 ブレースに採用する細長比

ブレース断面と接合部の決定要因を質問したところ、断面は、保有水平耐力計算（65%）または許容応力度設計（53%）との回答がほとんど（両方の回答が17%）で、層間変形角 $\leq 1/200$ の制限（4%）、その他の細則（4%）はわずかだった。接合部は、保有耐力接合（92%）が多く、許容応力度設計（8%）、その他の細則（4%）はわずかだった。図2に、2次設計のルート3で保有水平耐力を算定する際に用いるブレースの圧縮耐力の算定方法を質問した結果を示す。座屈耐力との回答が多かったが、短期許容圧縮応力度に基づく（43%）、長期許容圧縮応力度に基づき安全率を $\nu=1$ にとる（18%）、『限界状態設計指針・同解説²⁾』の座屈荷重（22%）と算定方法が一つに限らなかった。『限界状態設計指針・同解説』の座屈後の安定耐力（38%）との回答も多かった。一方、現行基準の解説¹⁾で述べられる座屈耐力の1/3（3%）との回答は少数だった。

ブレース接合部の仕様に関する、6つの諾・否の質問に対して、ブレースが構面内に座屈するように工夫（諾が26%）、構面外に座屈するように工夫（同11%）、座屈方向は問わない（同38%）、接合部の損傷を抑える目的で接合部をなるべく剛強にする（同51%）、ブレースの変形に追従させる目的で接合部をなるべく柔らかくする（同0%）、ガセットプレートの変形を抑えるために縁に水平・鉛直補剛板をつける（同63%）との回答を得た。図3に、H形断面ブレースに、7種の接合部のうちのどの型式を採用するかを質問した結果を示す。接合部を水平・鉛直スチフナで補剛したDとEが多く選ばれ、ブレースを構面内に座屈させるFや、ブレース端の変形拘束が小さなCやGはあまり選ばれなかった。スチフナの有無だけが異なるAとBのうち、Aが全く選ばれなかったことは興味深い。諸外国で一般的に用いられる現場溶接式Gも、若干の回答者に選ばれた。レースの座

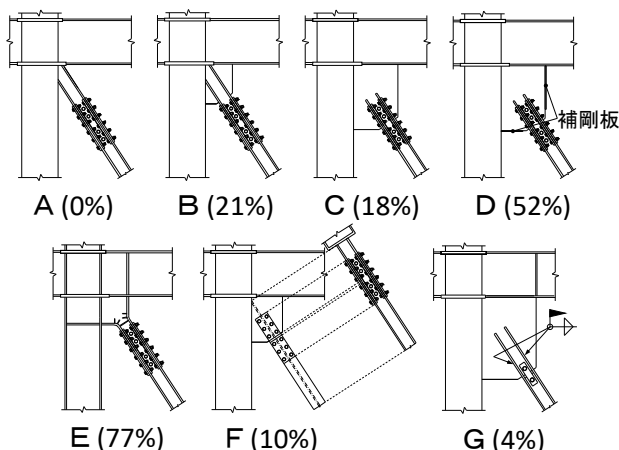


図3 H形断面ブレースに採用する接合部形式

屈長を質問したところ、回答が多かった接合部B、D、Eでは、柱・梁・ブレースの節点間距離を材長にとり、有効座屈長さ係数を1とする回答が大多数だった。「柱・梁に塑性化の恐れがなく、梁中央部の直行小梁の剛性が十分な場合は『柱・梁の面間距離』を材長にとり、逆の場合は『節点間距離』を材長にとる」などの追記があった。

柱・梁・ブレースの取り合いで、ブレースの軸線が柱・梁節点を通らず、偏心する場合を質問したところ、必ず柱と梁の節点または他の筋かいと梁の節点に一致させる（47%）、解析モデルに偏心を表現する（14%）、解析モデルに偏心を表現しないが、ブレース接合部の設計では付加曲げを考慮する（49%）、詳細計算をしないが、偏心の影響を考慮してブレース接合部を補強する（21%）、所定以下の偏心であれば無視する（3%）の回答を得た。無視できる偏心量として「梁せいの1/4~1/5程度」との追記があった。図4に、K形ブレースにおける不釣合力への対策を質問した結果を示す。梁中央が塑性化しないように梁断面を決定する（46%）、梁中央を補強して塑性化を制御する（37%）、不釣合力が生じないように座屈拘束ブレースを採用する（53%）との回答が多かった。梁中央の塑性化をある程度許容する（24%）との回答には、「偏心ブレース構造とする」、「建物規模や種別、重要度によって設計方法を選択する」などの追記があった。K形ブレースで特に注意する事項を質問したところ、ブレースが付く位置で、梁に直交小梁

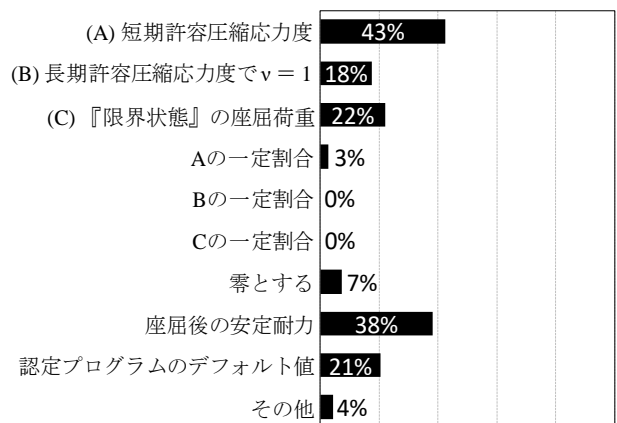


図2 保有水平耐力の算定に用いるブレースの圧縮耐力

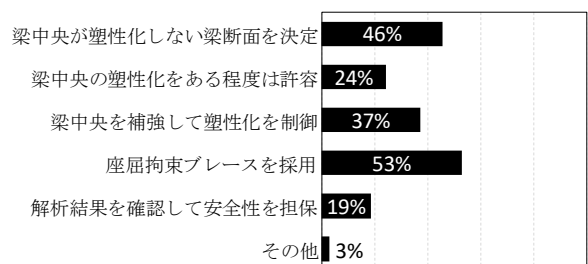


図4 K形ブレースにおける不釣合力への対策

を配置する (66%), 同位置で, 日ノ字断面にする (7%), 梁にダブルプレートを溶接する (21%), 水平・鉛直の補剛板を入れる (68%), 塑性化しない梁を選択しているのので特に補強しない (15%) の回答を得て, 設計者によってさまざまに工夫している様子が分かった。

3. ブレースの構造特性係数 $D_{s,b}$

2章のアンケート結果から, 保有水平耐力計算に用いるブレースの圧縮耐力が, 設計者により異なることを確認した。本章では, ブレースの圧縮耐力の算定法にも注意して, ブレースの構造特性係数 $D_{s,b}$ が, 実験データにみる耐震性能をどこまで正しく反映しているかを検討する。

保有水平耐力計算の検定式¹⁾を, 式(1)に示す。

$$Q_u \geq Q_{un} = D_s \cdot F_{es} \cdot Q_{ud} \quad (1)$$

ここで, Q_u は該当する層の保有水平耐力, Q_{un} は同層の必要保有水平耐力, F_{es} は同層の剛性率と偏心率を考慮する係数, Q_{ud} は地震力によって同層に生ずるせん断力である。 D_s は構造特性係数と称され, 鋼構造の場合は, 柱や梁, ブレースの部材ランク, および保有水平耐力にブレースが占める割合 β に基づいて求められる。柱や梁の部材ランクは径厚比や幅厚比で定まり, ブレースの部材ランクは細長比で定まる。

図5の荷重・変形関係に, D_s 値の基本原則である, エネルギー一定則の考え方を示す。この法則にしたがうと, D_s は式(2)で定義される。

$$D_s = \frac{Q_y}{Q_L} \quad (2)$$

ブレース付鋼架構の最大線形応答 Q_L , 骨組の最大線形応答 $Q_{L,f}$ とブレースの最大線形応答 $Q_{L,b}$ について, 式(3)の関係が成立する。

$$Q_L = Q_{L,b} + Q_{L,f} \quad (3)$$

β の定義により, 式(4)が成立する。

$$Q_{L,b} = \beta Q_L, \quad Q_{L,f} = (1 - \beta) Q_L \quad (4)$$

ブレースと骨組の復元力特性がいずれも完全弾塑性と仮定すると, 架構全体の降伏耐力 Q_y は, ブレースの降伏耐力を $Q_{y,b}$, 骨組の降伏耐力 $Q_{y,f}$ の和であり, 式(5)が成立する。

$$Q_y = Q_{y,b} + Q_{y,f} \quad (5)$$

ブレースの構造特性係数を $D_{s,b}$, 骨組の構造特性係数を $D_{s,f}$ とおくと, ブレースと骨組の降伏耐力はそれぞれ式(6)のように表すことができる。

$$Q_{y,b} = D_{s,b} \cdot Q_{L,b}, \quad Q_{y,f} = D_{s,f} \cdot Q_{L,f} \quad (6)$$

式(2)から(6)を用いて, 式(7)が成立する。

$$D_s = D_{s,b} \cdot \beta + D_{s,f} \cdot (1 - \beta) \quad (7)$$

規準¹⁾は, D_s と $D_{s,f}$ を定義するが, $D_{s,b}$ をこのようには定義しないことに注意する。式(7)を $D_{s,b}$ について解くと, 式(8)を得る。

$$D_{s,b} = \frac{D_s - (1 - \beta) D_{s,f}}{\beta} \quad (8)$$

図7に, 規準¹⁾が規定する構造ランクと D_s , $D_{s,f}$ の関係に基づいて, 式(8)から得た骨組ランクがFAまたはFCの場合の $D_{s,b}$ を示す。

秋山ら²⁾は, 図8に示すように, 最大線形弾性応答 δ_L で消費されたエネルギーは, 振幅 δ_{cyc} の完全弾塑性の繰返しで消費されたエネルギーと等しいと仮定する設計法を提案した。塑性率 $\mu_b = \delta_{cyc}/\delta_y$ と δ_{cyc} に到達した回数 n_{eq} を用いると, 式(9)の関係を得る。

$$n_{eq} = \frac{1}{8D_{s,b}^2(\mu_b - 1)} \quad (9)$$

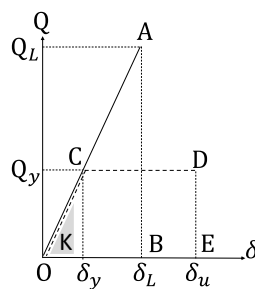


図5 エネルギー一定則

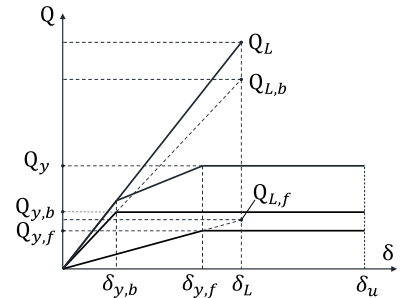


図6 架構全体のモデル

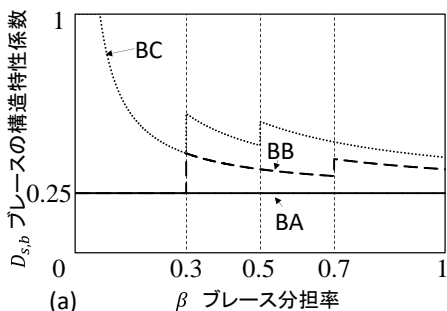


図7 ブレースの構造特性係数 $D_{s,b}$: (a) 骨組がFAの場合、(b) FCの場合

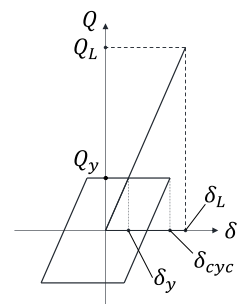


図8 繰返しと一方向の関係

以下、基準¹⁾で規定された、ブレース付鋼架構の $D_{s,b}$ 値の妥当性を検討する。式(9)による n_{eq} と μ_b を、幾つかの異なる繰返し载荷履歴による、松本ら⁶⁾の実験結果と比較した。試験体は、H形鋼SN400Bが5体、円形鋼管STKR400が14体、角形鋼管BCR295が9体であった。部材ランクBAとBB、あるいはBBとBCの境界に近いブレースが多かったが、13体はBBランク、15体はBCランクと判定された。

松本ら⁶⁾の試験体H140-6.0-61を例に、非線形な実験応答を、耐力 $Q_{y,b}$ に座屈耐力 N_{cr} をとった完全弾塑性履歴に置換する方法を説明する(図9参照)。基準¹⁾に基づく N_{cr} を、実験的に得た弾性剛性で除して、降伏変位 δ_y を算出する。図10に示すように、実験的に測定したエネルギー吸収量 W_{exp} と、同じ変形履歴に対する完全弾塑性モデルのエネルギー吸収量 W_{cr} が、最後に交差した载荷段階を、設計上のエネルギー吸収能力とする。その点までに到達した最大変位 δ_b を δ_y で除した値を μ_b とし、 W_{cr} を、 N_{cr} と δ_b で定義される平行四辺形の面積を1サイクル分のエネルギー吸収量で除した値を n_{eq} とする。

図11の各点は、この手続きを全28体の試験体に対して実施して得た、 n_{eq} と μ_b の関係である。図9の例のように圧縮耐力と引張耐力を N_{cr} とした場合を○印で、引張耐力に N_y をとり圧縮耐力に N_u をとった場合を×印で示す。同図に、 $D_{s,b}$ を、骨組ランクがFAの場合の(図7(a)参照)の最大値

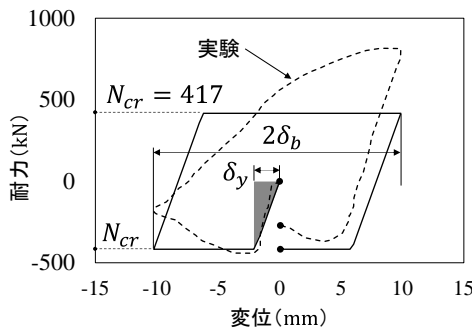


図9 モデル化

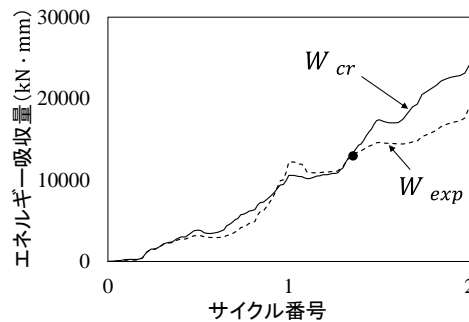


図10 エネルギー関係

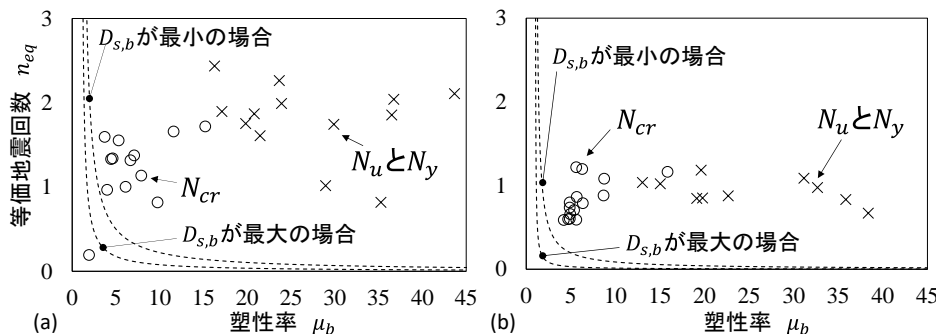


図11 部材ランクごとの分布: (a) BB ランク, (b) BC ランク

と最小値にとった式(9)の関係を示す。松本ら⁶⁾の実験結果は、耐力の算定方法、部材ランクを問わず、式(9)と基準¹⁾の想定よりを遥かに上回るエネルギー吸収能力を示した。 $Q_{y,b}$ のとり方は、 N_y と N_u の組合せの方が、 N_{cr} よりも実験結果に合う。

4. まとめ

ブレース付鋼架構の設計法に関するアンケート調査を実施し、以下の結果を得た。

- 事務所建築, 自走式駐車場, 大規模店舗にブレース付鋼架構を検討するかとの質問に対して、諾の回答が7割あった。
- 保有水平耐力の算定に用いるブレースの圧縮耐力を質問したところ、座屈耐力をとるとの回答が多く、その算定法も一つでなかった。
- H形断面ブレース接合部詳細を質問したところ、ブラケット形式を採用し、材長は節点間距離、有効座屈長さ係数は1を採用するとの回答が多かった。

現行の規準で定められている構造特性係数を松本ら⁶⁾の実験データと比較して、ブレースの実際の保有エネルギー吸収能力は、部材ランクに関わらず、設計基準¹⁾の想定を大きく上回っていることを確認した。

謝辞

アンケートを実施するにあたって、日本建築構造技術者協会および日本建築構造設計事務所協会連合会の協力を仰ぎました。協力くださった関係者諸氏に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 建築行政情報センター: 建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2015
- 2) 日本建築学会: 限界状態設計指針・同解説, 2010
- 3) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 丸善出版, 2012
- 4) 岡崎太郎, 緑川光正, 麻里哲広: 北海道のブレース付鋼架構の設計に関するアンケート調査, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 88, pp. 55-60, 2015.6
- 5) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999
- 6) 後藤ほか: 座屈後挙動を考慮したブレース付ラーメン骨組の耐震設計法に関する研究_その1: ブレースの繰返し载荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 753-754, 2016.8