# (50) 合成接合による枠付き鉄骨ブレースにおけ る座屈長さ係数の評価法

城戸 將江1・津田 惠吾2・山川 哲雄3

<sup>1</sup>正会員 北九州市立大学准教授 国際環境工学部建築デザイン学科 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区 ひびきの1-1)

E-mail:kido-m@kitakyu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 北九州市立大学教授 国際環境工学部建築デザイン学科 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:tsuda-keigo@kitakyu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 琉球大学名誉教授 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1) E-mail: yamakawa@tec.u-ryukyu.ac.jp

本研究の目的は、合成接合による枠付き鉄骨ブレースの座屈長さを算定し、ブレースの設計に用いる座 屈長さ係数評価方法を示すことである.座屈長さ係数は、釣り合い微分方程式により算定し、座屈荷重を 算定するための設計図表を示した.

Key Words : Effective length factor, Bracing, Equilibrium equation, Design chart

#### 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の耐震補強法の一つとして, 枠付き鉄骨ブレースによる補強がある<sup>1)</sup>. 既存RCフレー ムと枠付き鉄骨ブレースの接合方法は,既存躯体には頭 付きあと施工アンカー,鉄骨枠には頭付きスタッドを設 け,モルタルを充填する間接接合がある<sup>1)</sup>.

著者らの一人は、既存RCフレームと鉄骨ブレースの 新しい接合方法を提案している.その接合方法は、既存 RCフレームおよび鉄骨フレームの上、左右を鋼板およ びPC鋼棒を用いて接合する方法で、合成接合と呼んで いる<sup>3,3</sup>.合成接合の特徴としては、1)耐力と靱性の同 時向上が可能であること、2)あと施工アンカーの使用本 数と穿孔数の大幅削減が可能となること、3)施工現場に おける騒音、粉じんの削減が可能となること、4)既存の RC造柱や梁も同時にせん断補強が可能となること、が 挙げられる<sup>4</sup>.

これまでに、枠付き鉄骨ブレースを合成接合したピロ ティフレームの耐震性能に関する研究を行い、鉄骨ブレ ースを合成接合することで、大幅に耐力が増加すること を示している<sup>3</sup>.

ブレースの終局時保有水平耐力の算定には、圧縮ブレ ースの座屈強度を算定する必要がある.座屈強度の算定 には、ブレースの座屈長さが必要である. 文献1)では、 「座屈長さは部材の両端部における固定度によって決定 してよい」とされている.

合成接合により接合した鉄骨ブレースの端部は、コン クリートに拘束されている部分があり、端部の固定度が、 一般的な接合方法とは異なるものと考えられ、座屈強度 を精度よく評価するためには、合成接合法による鉄骨ブ レースの端部の固定度を考慮した、座屈長さ評価法を確 立する必要がある.

本研究の目的は、合成接合による枠付き鉄骨ブレース の座屈長さ係数を、釣合微分方程式を用いて算定し、ブ レースの設計のための座屈長さ係数評価法を提案するこ とである.本論では、文献2)に示された試験体の諸量を 用い、合成接合による枠付き鉄骨ブレースの座屈長さ係 数を解析的に求め、座屈強度を算定するための設計図表 を作成した.

## 2. 解析

#### (1) 解析モデルと問題の設定

解析するブレースのモデル化の過程を図-1(a)~(e)に示 す.図(a)に示すように,鉄骨ブレースの端部はコンクリ ート内部に埋め込まれている. ブレースのみを取り出したものを図(b)に示す. 図中 l はブレース全長である. 鉄骨ブレースと鉄骨枠は溶接により接合されている(付録 1 参照)が,鉄骨枠とブレース重心の交点をピン支点としてモデル化した. コンクリートに埋め込まれた部分の長さは、l, b ( $l \leq b$ )であり、埋め込まれた部分は、図(c)に示すように均一化して考える. さらに、コンクリート部分は安全側の評価とするために短いほうの長さをとり、座屈に対する拘束をばねとして考える. また、解析する際は図(e)に示すように、モデルの半分を取り出して算定する.

本研究における問題は図 1(e)に示す曲げ剛性 EI (E: ヤング係数, I: 断面 2 次モーメント)で、端部の  $l_c$ の 長さの範囲にばね剛性 K を持つ柱の座屈荷重 P および 座屈長さ係数  $\gamma$  を算定することとする. 図中, x (= $\xi$ l) は座標(位置)を表しており、 $\xi$ =x/lである.

なお、付録1に、既存 RC フレームと鉄骨枠の接合方 法を、付図-2に、その接合方法を図示している.ブレー スの端部は、既存 RC 部材と鋼板のあいだに増し打ちさ れたモルタル(本論ではコンクリートと記す)により拘 束されている.

## (2) 釣合微分方程式と境界条件・連続条件

合成接合による枠付き鉄骨ブレースにおける釣合微分 方程式は下式となる.

$$EIw_1^{W} + Pw_1'' + Kw_1 = 0 \qquad (0 \le x \le l_c) \qquad (1)$$

$$EIw_2^{\text{IV}} + Pw_2^{"} = 0 \qquad \left(l_c \le x \le \frac{l}{2}\right) \qquad (2)$$

 $w_1: 0 \le x \le l_c$ の間のたわみ,  $w_2: l_c \le x \le \frac{l}{2}$ の間のたわみ

$$w_1^{\rm IV} + p^2 w_1^{\prime\prime} + \frac{q^4}{4} w_1 = 0$$
(3)

$$w_2^{\rm IV} + p^2 w_2^{"} = 0 \tag{4}$$

また、境界条件式は(5)式、連続条件式は(6)式となる.

$$\begin{cases} \xi = 0, w_1 = 0 \qquad \xi = 0, w_1'' = 0 \\ \xi = \frac{1}{2}, w_2' = 0 \qquad \xi = \frac{1}{2}, w_2^{\text{III}} = 0 \end{cases}$$
(5)

$$\begin{cases} \xi = \xi_c, w_1 = w_2 & \xi = \xi_c, w_1' = w_2' \\ \xi = \xi_c, w_1'' = w_2'' & \xi = \xi_c, w_1^{\text{II}} = w_2^{\text{III}} \end{cases}$$
(6)



*ξ*: 全長に対する片側コンクリート部分の長さの割合

# (3) 一般解

(3)式をp > q, p = q, p < qに場合分けをして解く.得られた一般解を次に示す<sup>9</sup>. p > qのとき

$$w_1 = C_1 \cos A\xi + C_2 \sin A\xi + C_3 \cos B\xi + C_4 \sin B\xi$$
 (/)

$$A = \frac{\sqrt{p^2 + q^2} + \sqrt{p^2 - q^2}}{2}, \quad B = \frac{\sqrt{p^2 + q^2} - \sqrt{p^2 - q^2}}{2}$$

50 - 2

p=qのとき

$$w_{1} = (C_{1} + C_{2}\xi)\cos\frac{p}{\sqrt{2}}\xi + (C_{3} + C_{4}\xi)\sin\frac{p}{\sqrt{2}}\xi$$
(8)

*p*<*q*のとき

$$w_{1} = C_{1}e^{C\xi}\cos D\xi + C_{2}e^{C\xi}\sin D\xi$$

$$+ C_{3}e^{-C\xi}\cos D\xi + C_{4}e^{-C\xi}\sin D\xi$$
(9)

$$C = \frac{\sqrt{q^2 - p^2}}{2}, \quad D = \frac{\sqrt{q^2 + p^2}}{2}$$
また, (4)式の一般解は(10)式となる.

$$w_2 = C_5 \cos p\xi + C_6 \sin p\xi + C_7 + C_8 \xi$$
(10)

ここで、C1~C8は積分定数である.

#### (4) 座屈条件式

(6)式をそれぞれ代入すると、座屈条件式が得られる. それを行列式で表したものが(11)式~(13)式である.

# 3. 合成接合による枠付き鉄骨ブレースの座屈長 さ係数γの算定

# (1) ばね剛性Kの算定

図-2 にコンクリートに埋め込まれた部分のブレース 部分の断面図を示す. ブレースが座屈するときに曲がろ うとする機構を,幅 H-2t,長さhの領域のコンクリー ト部分が拘束する力を(14)式に示す.

$$F = \sigma \left( H - 2t_f \right) \tag{14}$$

ここで, σはコンクリートに生ずる応力である.

Fによるコンクリートの縮みを $\Delta$ とすると, (15) 式 が得られる.

$$\Delta = \varepsilon h = \frac{\sigma}{E_c} h \tag{15}$$

前節で得られた(7)式~(10)式に,境界条件である(5)式, ここで, εはコンクリートのひずみ, Ecはコンクリー トのヤング係数である.

> (14)式と(15)式より、コンクリートのばね剛性 K を評 価する式が得られる.



図-2 コンクリート部分のブレースの断面図

$$K = \frac{E_c \left( H - 2t_f \right)}{h} \tag{16}$$

座屈荷重 *P* と座屈長さ係数γの関係は(17)式のように 表される.

$$P = \frac{\pi^2 EI}{(\chi)^2} \tag{17}$$

また,座屈長さ係数γは(18)式で表現できる.

$$\gamma = \frac{\pi}{p} \tag{18}$$

(10)

#### (2) 座屈荷重に影響を与えるパラメータ

式(11)~(13)を支配するパラメータは無次元化座屈荷重 p, 無次元化ばね剛性 q, 全長に対する片側コンクリー ト部分の長さの割合をである.それらを構成するものが 下記のものである.

- 1) &: 全長に対する片側コンクリート部分の長さの割 合
- 2) l : ブレースの全長

$$6) \frac{H-2t_f}{h}$$
:拘束長さ係数

H: ブレースせい, ț; フランジ厚, h: ウェブからコンク リート拘束部分の長さ

鉄骨ブレースのヤング係数 Eは  $2.05 \times 10^5$  (N/mm<sup>2</sup>)で一 定であるから,設計図表を作る際のパラメータは鉄骨ブ レースのヤング係数 E以外の 7 つとなる.

#### (3) 計算例

文献 2)に示されている試験体の諸量を用い,式(11)~ 式(13),およびばね定数 Kを算定した.実験の諸量,ばね 定数は下記のとおりである.ただし,図-2におけるコ ンクリート拘束部分の長さ hについては,実際の試験体 の諸量ではなく,150mm として算定したものを示して いる.



図-3 端部をピンと仮定した場合の座屈モード

$$H = 75$$
(mm),  $t_f = 4.5$ (mm)  
 $h = 150$ (mm),  $\xi_s = 0.118$ 

$$K = \frac{2.83 \times 10^4 \cdot (75 - 2 \times 4.5)}{150} = 12452 \quad (\text{N/mm}^2)$$

コンクリートのヤング係数は、下式で計算した.  $F_c=36N/mm^2$ のときを例として示している.

$$E_{c} = 3.35 \times 10^{4} \times \left(\frac{24}{24}\right)^{2} \times \left(\frac{36}{60}\right)^{\frac{1}{3}}$$
$$= 2.83 \times 10^{4} (\text{N/mm}^{2})$$

また、ここでは、合成接合による枠付き鉄骨ブレース における座屈長さ係数のとり得る範囲として図-3のよ うに考えた. コンクリートは剛として考え、端部をピン としている. このとき、座屈長さ係数γのとり得る範囲 は(19)式となる.

$$0.5(1 - 2\xi_{\rm e}) \le \gamma \tag{19}$$

計算の結果, p > q, p = qにおいては条件を満たす数値 が得られなかった. p < qのときは p = 7.06 となり,  $\gamma = 0.45$  という結果が得られた. すなわち, 支点を固定端と した場合の座屈長さ係数 $\gamma = 0.5$  よりもさらに座屈長さ係 数を短く取ることができることを示している.

#### (4) 設計図表

前節に示した諸量を用い、p < qのときの行列式((13) 式)から設計図表を作成した. 図-4 はコンクリート設 計基準強度  $F_c \epsilon r^{3}$ ラメータとし、座屈長さ係数 $\gamma$ とコン クリートの埋め込み長さ $\xi$ の関係を示したものである. 図中に、式(19)で示した座屈長さ係数の取りうる範囲を 示している. ◆印は、前節で算定した実験値である. 図 によれば、コンクリート強度  $F_c$ の影響は顕著でないこ とがわかる. また、 $\xi$ が 0.07 程度よりも小さい範囲で、 座屈長さ係数が 1 から 0.5 まで変化し、 $\xi$ が 0.07 よりも 大きくなると $\gamma$ の値が 0.5 より小さくなることがわかる.

図-5は埋め込み長さ&をパラメータとし、F<sub>c</sub>=36N/mm<sup>2</sup> のときの拘束長さ係数と&の関係を示している.図によ れば、拘束長さ係数が0から0.1程度までの間は座屈長さ 係数の値が急激に変化するが、0.2を超えると座屈長さ 係数の変化は緩やかになり、拘束長さ係数の影響は小さ くなるということがわかる.



## 4. 結論

本論では釣合微分方程式を用いて鉄骨ブレースの 1/2 モデルの座屈条件式を算定し、合成接合による枠付き鉄 骨ブレースの座屈長さ係数を解析的に求め、座屈長さ係 数を算定するための設計図表を作成した。

謝辞:本研究は、日本学術振興会の平成 22 年度科学研 究費補助金(基盤研究(A),課題番号:20246091,代 表者:山川哲雄)の助成を受けた.また、試験体の図お よび写真は、前田興輝氏(株式会社 仲本工業 鉄構 部)よりいただいた.本研究は、平成 23 年度津田研究 室卒論生である正岡佳奈氏による卒業論文である.関係 各位に感謝します.

## 付録1 合成接合の概要

付図-1(a)~(c)に, 文献 2)に示されている試験体を示す.

鉄骨枠組とブレースは、溶接により接合されている.

付図-2 に、試験体の例を示す. 柱断面に示すように、 既存 RC フレームに枠付き鉄骨ブレースを組み込み、側 柱をコ形に加工した鋼板で巻き立て、鉄骨枠柱及び鋼板



(a)枠付き鉄骨ブレース全体





- (b) 柱と下側梁との 接合部
- (c) 上側梁との接合部
- **付図-1**文献 2)に示された試験体の枠付き鉄骨ブレース とその接合部



(a) 試験体全体



付図-2 文献 2) に示された試験体の枠付き鉄骨ブレース と既存躯体との接合法 に PC 鋼棒を貫通させ緊結材とし、鋼板を型枠材として モルタルを増し打ちしている<sup>2)</sup>.硬化後、型枠材として 使用していた鋼板を PC 鋼棒及びナットを介して緊張力 を導入し、増設壁部分に圧着させている<sup>2)</sup>.既存 RC 梁、 鉄骨枠梁についても同様である.

#### 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課 財団法人日本建築防災協 会:2001 年版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修 設計指針同解説,2001 年 10 月
- 2) 平良香菜子・山川哲雄・小林慎・Pasha JAVADI: 枠付き鉄 骨ブレースを合成接合した 1 スパン 1 層ピロティフレーム

の耐震性能その1 実験概要,日本建築学会九州支部研究報告 第48号・1 構造系, pp537~540,2009年3月

- 3) 小林慎・山川哲雄・Pasha JAVADI・平良香菜子:枠付き鉄 骨ブレースを合成接合した1スパン1層ピロティフレーム の耐震性能その2実験結果及び解析,日本建築学会九州支 部研究報告 第48号・1 構造系,pp541~544,2009年3月
- 山川哲雄:壁と鉄骨ブレースに関する耐震補強技術,震災の教訓と地震被害の軽減化を目指して,pp77~90,2011 年 9 月
- 5) WAI-FAH CHEN: Theory of Beam-Columns, volume 1, McGraw-Hill, 1976年

# A FORMULA FOR EVALUATING AN EFFECTIVE LENGTH FACTOR OF A BRACE INSTALLED BY USING HYBRID CONNECTION

# Masae KIDO, Keigo TSUDA and Tetsuo YAMAKAWA

The purpose of this study is to calculate the effective length factor of the brace installed by using hybrid connection and present the evaluation method of the effective length factor for design of bracing. The effective length factor is calculated by using the equilibrium equation. The design charts is presented for calculating the buckling strength.