

(25) コンクリート充填円形鋼管柱に取り付くH形鋼梁の塑性変形能力

城戸 將江¹・末吉 洋平²

¹正会員 北九州市立大学 講師 国際環境工学部建築デザイン学科 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

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

²正会員 北九州市立大学大学院 大学院生 環境工学専攻 建築デザインコース

E-mail: m09e1401@hibikino.ne.jp

コンクリート充填円形鋼管柱に取り付くH形鋼梁の塑性変形能力を、すでに提案されている中空角形鋼管柱に取り付くH形鋼梁の最大塑性回転角の評価式に対し、柱スキンプレーットの面外変形を考慮した円形CFT柱に取り付く梁ウェブ接合部の曲げ耐力を用いて算定した。その結果、次の結論が得られた。1) CFT柱、中空鋼管柱に取り付く場合について比較を行うと、最大相対塑性回転角の値は常にCFT柱に取り付く場合のほうが大きい。2) 降伏比 YR 、アスペクト比 h が大きくなると、中空鋼管柱の場合と比較して、CFT柱の場合では、回転角の上昇率は大きくなる。

Key Words : beam-column connection, steel-concrete composite column, flexural strength, plastic deformation capacity

1. はじめに

米国でのノースリッジ地震や、日本での兵庫県南部地震において、実構造物における梁端溶接接合部の脆性的破断現象が観察された¹⁾。また、通しダイアフラムと梁フランジの完全溶込溶接部近傍に発生した脆性破断のほとんどが、角形鋼管柱・H形鋼梁ラーメン構造の梁端下フランジにおいて発生していた。

上記のような被害を防ぐ目的で、梁端接合部設計法と梁端接合部溶接施工法が示された「鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説」¹⁾（以後、破断防止ガイドライン）が刊行された。その中では、角形鋼管柱に取り付くH形鋼梁の保有塑性回転角（保有変形性能）の評価式が示されている。

梁の塑性変形性能に影響を及ぼす梁ウェブの曲げ耐力を評価する際、柱鋼管の面外変形を考慮する必要がある。梁ウェブ曲げ耐力評価式について、中空円形鋼管柱に取り付く場合については文献2)で提案されている。また、コンクリート充填円形鋼管柱（以後円形CFT柱）に取り付く場合については、文献3)で提案されている。

文献4)では、文献1)で示されているH形鋼梁の塑性変形能力評価式を用いて、H形鋼梁の最大相対塑性回転角を、中空角形鋼管柱の場合と角形CFT柱の場合につ

いて算定し比較を行っている。

本論文では、中空円形鋼管柱および円形CFT柱に取り付く場合の梁ウェブの無次元化曲げ耐力を算定し、その結果を用いて、最大相対塑性回転角の算定を行う。また、中空円形鋼管柱に取り付く場合、円形CFT柱に取り付く場合の比較を行う。さらに、中空鋼管の場合に対するCFTの場合の、無次元化曲げ耐力の上昇率、最大相対塑性回転角の上昇率について、どれほど期待できるかについて明らかにする。

2. 解析方法

(1) 梁ウェブの無次元化曲げ耐力

図-1は文献2)、3)で解析に用いられた崩壊機構を示している。図-1(a)は中空円形鋼管柱の場合で、図-1(b)は円形CFT柱の場合である。解析で得られた梁ウェブの曲げ耐力 M_{mu} を、梁ウェブの全塑性モーメント M_{wp0} で無次元化した無次元化曲げ耐力 m_c の簡略評価式がそれぞれ式(1)、(2)である。

$$m_c \cong \frac{16}{\sqrt{3}} \frac{\omega}{\beta h} \left(\sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\beta}{\sqrt{\omega}} - 4} + \frac{h}{2\sqrt{\omega}} \right) \quad (1)$$

$${}_{CFT}m_c \cong \frac{\xi(2h-\eta)+\eta^2}{2h^2} + \frac{4\omega}{\sqrt{3}\beta h} \left\{ \frac{4\sqrt{\omega}(2h-\eta)}{\xi h} + \frac{2(2h-\xi-2\eta)}{\sqrt{\omega}} + \frac{\eta(\xi+\eta)}{h\sqrt{\omega}} \right\} \quad (2)$$

式(1), (2)の m_c の左添え字 s , CFT はそれぞれ中空鋼管柱, CFT 柱の場合を示している. 図-1 中の寸法 H, A, B を半径 R で無次元化したものを式(3)で定義する. ω は殻の径厚比に依存する殻変数で, 式(4)で定義される. また, 解析に際して, $\beta = {}_bN_y / {}_cN_y$ と定義し, 式(5)において $D_j / t_w = 40$ として計算を行った. なお ${}_bN_y = {}_b\sigma_y \cdot t_w$, ${}_cN_y = {}_c\sigma_y \cdot t_c$ (${}_b\sigma_y, {}_c\sigma_y$: 柱, 梁の降伏点) を表す.

$$h = H/R, \xi = A/R, \eta = B/R \quad (3)$$

$$\omega = M_0 / (N_0 \cdot R) = t_c / (4R) \quad (4)$$

ここで, $N_0 = {}_c\sigma_y \cdot t_c$, $M_0 = {}_c\sigma_y \cdot t_c^2/4$, (${}_c\sigma_y$: 材料の降伏点) である.

$$\beta = \frac{{}_b\sigma_y}{{}_c\sigma_y} \cdot \frac{t_w}{D_j} \cdot \frac{D_m}{t_c} \cdot h \quad (5)$$

式(2)中の ξ, η は, それぞれ式(6)および式(7)で表される.

$$\xi = \frac{4\sqrt{\omega}}{\sqrt{\frac{\sqrt{3}\beta}{2\sqrt{\omega}} - 4}} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{32\sqrt{\omega}(\omega + \xi h) - \xi^2(8\sqrt{\omega} - \sqrt{3}\beta)}{2\xi(8\sqrt{\omega} + \sqrt{3}\beta)} \quad (7)$$

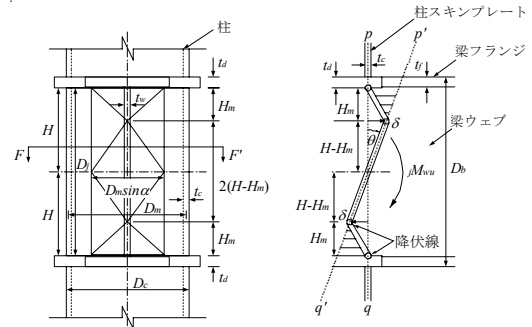
(2) 最大相対塑性回転角の算定

文献4)と同様の方法で, 円形鋼管の場合について, 最大相対塑性回転角 θ_{bpm} の算定を行う. ここでは骨組の中の一部として算定するため, 図-2 に示すような梁の両端にある場合とした式(8)で算定を行う.

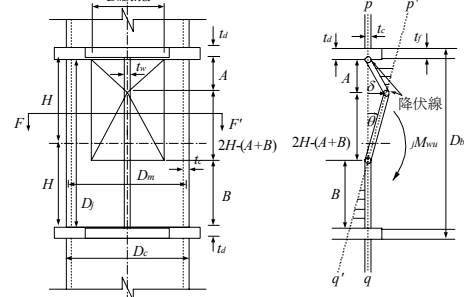
$$\begin{aligned} {}_a\theta_{bpm} &= \frac{F_{wy}}{E} \cdot \frac{L}{D_b} \cdot \frac{a(\alpha-1)}{(b+1) \cdot (b+2)(\alpha_0-1)^2 \cdot \alpha^2} \\ &\times \left\{ \alpha_0^{b+1} \cdot [(b+1) \cdot (\alpha_0-1) \cdot \alpha + (\alpha_0-\alpha)] - [(b+1) \cdot (\alpha_0-1) + (\alpha_0-\alpha)] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, L は梁の長さ, E はヤング係数, a, b は梁フランジの引張強さ F_{fu} と降伏比 YR によって定める係数である. また, α_0, α はそれぞれ梁ウェブ全断面が有効である場合, 有効でない場合の接合部係数であり, 式(9), (10)で表される.

$$\alpha_0 = \frac{{}_jM_{u0}}{{}_bM_p} = \frac{\gamma_f}{YR} \cdot \frac{{}_fZ_p}{Z_p} + \left(1 - \frac{{}_fZ_p}{Z_p} \right) \quad (9)$$



(a) 中空円形鋼管²⁾



(b) 円形 CFT 柱³⁾

D_j : 高さ, D_c : 鋼管外形, t_c : 鋼管の板厚
 D_b : 梁せい, t_f : 梁フランジの板厚
 t_w : 梁ウェブの板厚, t_d : ダイアフラム厚
 $D_j = 2H = D_b - 2t_d$, $D_m = 2R = D_c - t_c$

図-1 柱梁接合部における崩壊機構

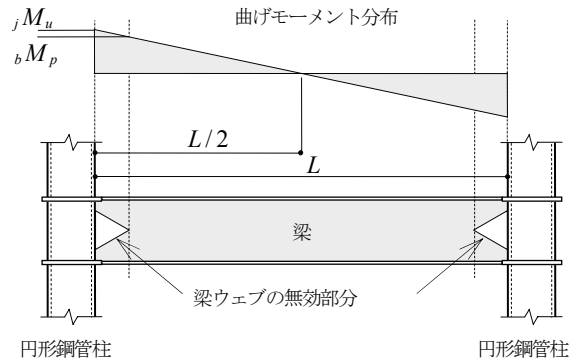


図-2 対象となる梁

$$\alpha = \frac{{}_jM_u}{{}_bM_p} = \frac{{}_jM_u}{Z_p \cdot F_{wy}} \quad (10)$$

ここで, ${}_bM_p$ は梁の全塑性モーメント, γ_f は継手破断耐力係数, ${}_fZ_p$ および Z_p はそれぞれ梁フランジ部のみ, 梁全断面での塑性断面係数である.

また, ${}_jM_{u0}$ および ${}_jM_u$ は梁ウェブ全断面が有効な場合 および有効でない場合の梁端最大曲げ耐力で, 梁フランジが負担できる耐力 ${}_jM_{fu}$ と梁ウェブの負担する曲げ耐力 ${}_jM_{wu0}$ (梁ウェブが全断面有効な場合), ${}_jM_{wu}$ (梁ウェブが全断面有効でない場合) の和で評価する. 式(11), (12) にそれぞれの場合の梁端最大曲げ耐力を示す.

$${}_jM_{u0} = {}_jM_{fu} + {}_jM_{wu0} \\ = \gamma_f \cdot F_{fu} \cdot Z_p + F_{wy} \cdot (Z_p - \gamma_f Z_p) \quad (11)$$

$${}_jM_u = {}_jM_{fu} + {}_jM_{wu} \quad (12)$$

式(12)中右辺の第2項 ${}_jM_{wu}$ については、式(1)、(2)より得られる値をそれぞれ用い、式(13)より求めることができる。

$${}_jM_{wu} = m_c \cdot M_{wp0} \quad (13)$$

ここで M_{wp0} は梁ウェブの全塑性モーメントを表し、次式で表される。

$$M_{wp0} = H^2 \cdot b \cdot N_y \quad (14)$$

式(8)により中空鋼管に取り付く場合、CFT柱に取り付く場合の最大相対塑性回転角を算定する。

(3) 解析パラメータ

式(1)および式(2)より梁ウェブの無次元化曲げ耐力 m_c 、最大相対塑性回転角 θ_{pm} を以下のパラメータにより算定し、中空円形鋼管柱の場合と円形CFT柱の場合とで比較を行う。

- 1) 梁の降伏比 YR : 0.60, 0.70, 0.80
- 2) アスペクト比 h : 1.0, 1.5, 2.0
- 3) 材料強度 (梁): SN400, SN490
(柱): STKN400, STKN490

算定に用いた柱、梁は以下の通りである。

柱: ○ - $400 \times t_c$

梁: H - $400 \times 200 \times 8 \times 13$

H - $600 \times 200 \times 11 \times 17$

表-1 算定式(8)における係数 a, b の値¹⁾

400N/mm ² 級			490N/mm ² 級		
YR	a	b	YR	a	b
0.6	8.25	5.22	-	-	-
0.7	13.4	5.63	0.7	9.31	5.74
0.8	20.1	6.73	0.8	13.8	6.78

H - $800 \times 300 \times 14 \times 26$

なお継手破断耐力係数 $\gamma_f = 1.0$ 、梁せいに対する梁の長さの比 $L/D_b = 10$ とした。 a, b は表-1の値をもとに計算を行った。また、紙面の都合によりSN400, STKN400についての解析データのみを記載する。

3. 結果と考察

(1) 無次元化曲げ耐力

図-3に $YR = 0.7$ の場合の梁ウェブの無次元化曲げ耐力 m_c -径厚比 D_m/t_c 関係を示す。図中太い実線は式(2)で得られるCFT柱に取り付く梁ウェブの無次元化曲げ耐力、細い実線は式(1)で得られる中空鋼管柱に取り付く曲げ耐力である。梁ウェブの降伏強さ $b\sigma_y$ は梁引張強さ $b\sigma_u = 400\text{N/mm}^2$ に降伏比 YR を乗じることにより算定した。

図より、CFT柱に取り付く場合の方が中空鋼管柱に取り付く場合より、耐力が大きいくことがわかる。

図-4に、梁ウェブの無次元化曲げ耐力の上昇率 p -径厚比 D_m/t_c 関係を示す(上昇率 p はCFTから中空を引いた値を中空で割って求めた)。アスペクト比 h の上昇に伴って無次元化曲げ耐力の上昇率は大きくなる。

CFT柱と中空鋼管柱とで、無次元化曲げ耐力について比較を行った場合、CFTの方が、アスペクト比 $h = 1.0$ のとき約35%、 $h = 2.0$ のとき、約50%強まで上昇する。

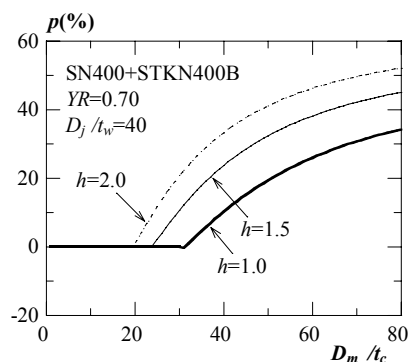


図-4 無次元化曲げ耐力の上昇率

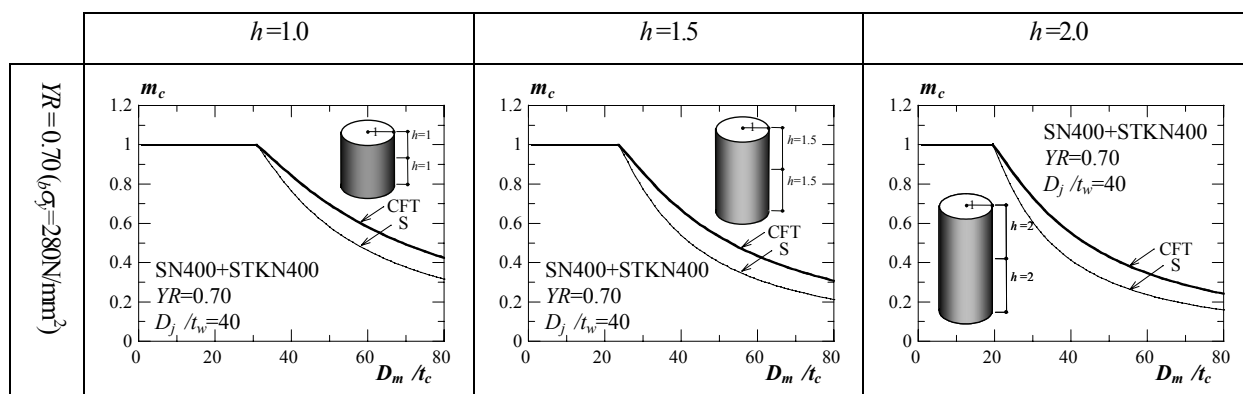


図-3 無次元化曲げ耐力 m_c -径厚比 D_m/t_c 関係

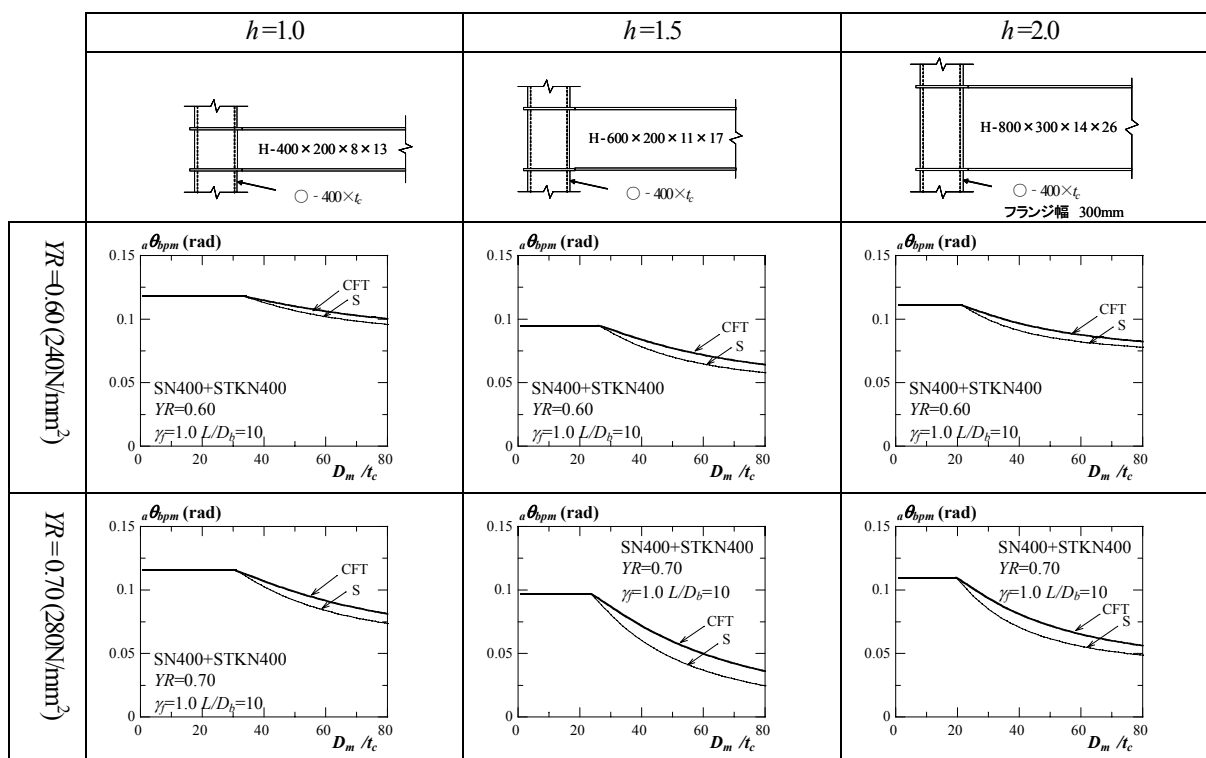


図-5 最大相対塑性回転角 $a\theta_{bpm}$ - 径厚比 D_m/t_c 関係

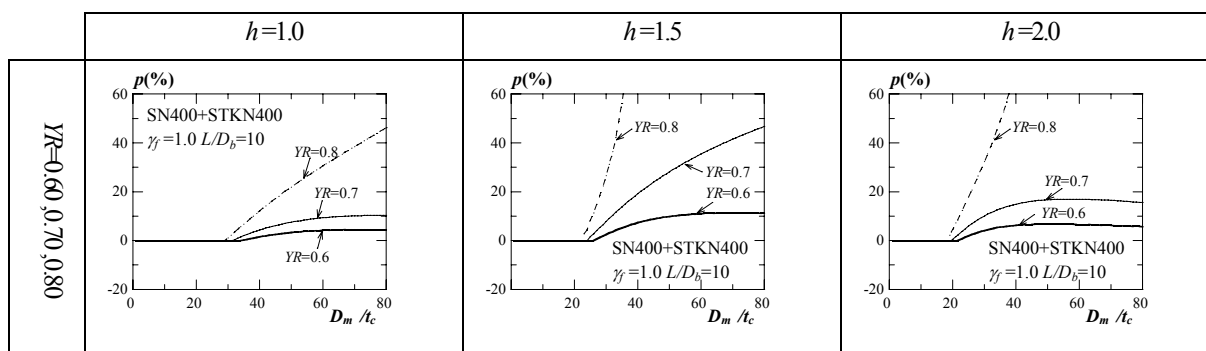


図-6 最大相対塑性回転角の上昇率

(2) 最大相対塑性回転角

図-5 に最大相対塑性回転角 $a\theta_{bpm}$ - 径厚比 D_m/t_c 関係を示す。図中太い実線は梁ウェブの曲げ耐力 jM_{wu} に CFT 柱の場合の式(2)を用いた回転角，細い実線は中空鋼管柱の場合の式(1)を用いた回転角である。いずれの場合も，降伏比 YR の値が大きくなると，回転角 $a\theta_{bpm}$ の値は小さくなるのが観察される。アスペクト比 h については， $h=1.0$ から $h=1.5$ に変化すると，回転角 $a\theta_{bpm}$ は小さくなる。

また，CFT 柱，中空鋼管柱に取り付く場合について比較を行うと，最大相対塑性回転角の値は常に CFT 柱に取り付く場合のほうが大きい。

図-6 に最大相対塑性回転角の上昇率 p - 径厚比 D_m/t_c 関係を示す（上昇率 p は CFT から中空を引いた値を中空で割って求めた）。図より，降伏比 YR が大きくなるにつれて，回転角の上昇率は大きくなる。 $YR=0.60$ のとき

では約 0~10%程度だが， $YR=0.80$ のときでは数 10%上昇している。

降伏比 YR ，アスペクト比 h が大きくなると，中空鋼管柱の場合と比較して，CFT 柱の場合では，回転角の上昇率は大きくなる。

$h=2.0$ では， $YR=0.6$ の時 10%未満の小さな上昇しか見られないが， $YR=0.8$ では数 10%の大きな上昇が見られる。

4. 結論

式(8)で与えられる最大相対塑性回転角を，中空円形鋼管柱および円形 CFT 柱の場合について算定し，比較を行った。結論を以下に述べる。

1) CFT 柱，中空鋼管柱に取り付く場合について比較を

行くと、最大相対塑性回転角の値は常に CFT 柱に取り付く場合のほうが大きい。

- 2) 降伏比 YR , アスペクト比 h が大きくなると、中空鋼管柱の場合と比較して、CFT 柱の場合では、回転角の上昇率は大きくなる。

謝辞：本研究は、平成20年度文部科学省科学研究費補助金（若手研究(B)），課題番号20760379，の援助を受けた。ここに、関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 日本建築センター：鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説，pp.1-2，2003.12
- 2) 田中剛，田淵基嗣，村上裕通：円形鋼管柱梁仕口における梁ウェブ接合部の曲げ耐力評価，鋼構造年次論文報告集，9，pp.457-464，2001.11
- 3) 鮫島由佳，城戸將江，津田恵吾：コンクリート充填円形鋼管柱に取り付く H 形鋼梁ウェブ接合部の曲げ耐力に関する研究，その 1，その 2 日本建築学会九州支部研究報告，47，pp.629-636，2008.3
- 4) 藤田昂丈，城戸將江，津田恵吾：コンクリート充填角形鋼管に取り付く H 形鋼梁の塑性変形能力，鋼構造年次論文報告集，15，pp.513-518，2007.11

PLASTIC DEFORMATION CAPACITY OF H-SHAPED STEEL BEAM CONNECTED TO CONCRETE FILLED CIRCULAR STEEL TUBULAR COLUMN

Masae KIDO and Youhei SUEYOSHI

The plastic deformation capacity of an H-shaped beam connected to a concrete filled circular steel tubular column was calculated by using the evaluation formula which has been already proposed. The flexural strength of the beam web was substituted to the evaluation formula and an out-of-plane deformation of a column skin plate was considered. The maximum plastic rotation angle of the beam connected to the CFT column is greater than that of the beam connected to the hollow steel column. As the yield ratio and the aspect ratio increased, the rising ratio of the rotation angle increased.