

(48) 軸力と曲げを受けるCFT柱の 日・欧・米の設計式の比較

藤永 隆¹・林 和宏²・城戸 將江³

¹正会員 神戸大学 准教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:ftaka@kobe-u.ac.jp

²正会員 豊橋技術科学大学 助教 建築・都市システム学系 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:hayashi@ace.tut.ac.jp

³正会員 北九州市立大学 准教授 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-m@kitakyu-u.ac.jp

建築設計基準の国際化に伴って、我が国の合成構造の設計基準の国際標準規格化が望まれている。本論では、鋼コンクリート合成柱のうちCFT柱の設計法に着目して、現行の合成構造の規準および設計式が諸外国の基・規準および設計式とどのような関係にあるかを検討するものである。比較する設計式は、日本のCFT指針、欧州のEurocode 4、米国のAISCのSpecificationsである。それぞれの基・規準に示されている設計式を紹介するとともに、軸力と曲げを受けるCFT柱の終局耐力の比較を行い、それぞれの基・規準の設計式の対応の検討を行った。

Key Words : Design code, Concrete filled tubular beam-column, Ultimate strength, Slenderness ratio

1. はじめに

現在、建築設計基準の国際化が進んでおり、我が国の合成構造の設計基準に関しても、国際標準規格として国際的に適用されるものであることが強く望まれる。そのため、現行の合成構造の規準および設計式が、諸外国の基・規準および設計式とどのような関係にあるかを検討することは非常に有用である。

これまで、日本と外国の合成構造の設計式の比較をした例として、李らが日本と中国のSRC構造の規準の比較を行っている¹⁾。城戸らは軸圧縮力を受けるCFT柱の日本と欧州の設計式の比較を行っている²⁾。

現在、日本建築学会の合成構造規準国際標準化検討小委員会では、今後国際標準規格として評価される規準の作成が必要であるとの考えより、海外の鋼コンクリート合成構造の設計に関する情報収集を行い、海外の規準の

現状と各国の規準と我が国の規準との関係の比較検討を行ってきている³⁾。

本論では、軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管柱の設計法に着目して、日本、欧州、米国の設計式の比較を行っている(表-1参照)。日本の設計式は日本建築学会(以下AIJとする)のコンクリート充填鋼管構造設計施工指針(以下CFT指針⁴⁾)を使用している。欧州の基準はEuropean Committee for StandardizationのEurocode 4: Design of composite steel and concrete structures⁵⁾によった。米国には合成構造の基準はなく、鋼構造の設計に用いられるAmerican Institute of Steel Construction(以下AISCとする)のSpecification⁶⁾の中に合成構造の記述がある。コンクリート構造の基準であるACI318⁷⁾には合成構造の記述はほとんどなくAISCのSpecificationを参照している。なお、本論中の記号は参照時の使用性のため原著の記号を基本とする。

表-1 比較に用いた基・規準^{4)~6)}

国・地域	団体	基・規準名	年
日本	日本建築学会	コンクリート充填鋼管構造設計施工指針(第2版)	2008
Europe	European Committee for Standardization	Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1994-1-1:2004)	2004
U.S.	American Institute of Steel Construction	Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)	2010

表-2 幅厚比・径厚比制限値

	AIJ CFT指針	Eurocode4	AISC Specifications		
			Compact	Noncompact	Slender
角形鋼管	$\frac{B}{t} = 1.6 \sqrt{\frac{sE}{F_y}} \times 1.5$	$52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\lambda_p = 2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\lambda_r = 3.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
円形鋼管	$\frac{D}{t} = 0.114 \sqrt{\frac{sE}{F_y}} \times 1.5$	$90 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\lambda_p = 0.09 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\lambda_r = 0.31 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.31 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

注) AISC Specificationsの角形鋼管の式はフランジ用のものである。

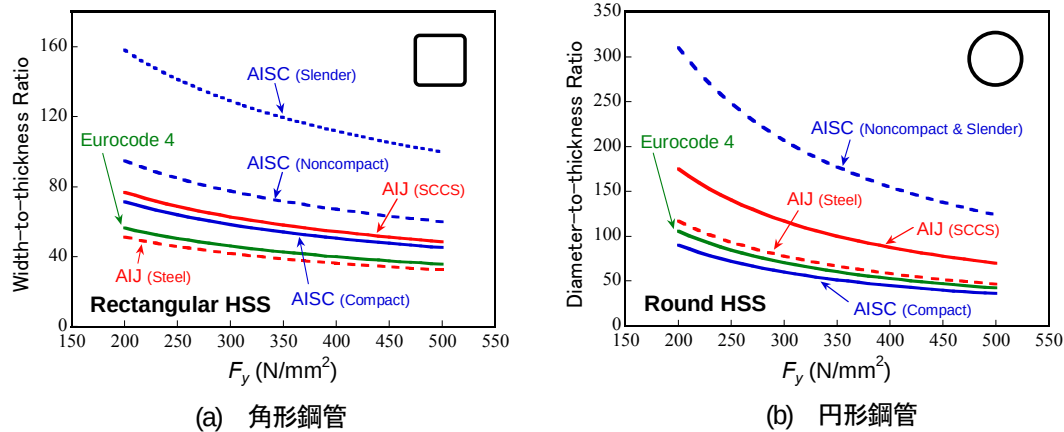


図-1 幅厚比・径厚比制限値の比較

2. 設計諸量の比較

(1) 幅厚比・径厚比

表-2 に各基・規準に規定されている幅厚比・径厚比の制限値を示す。AIJ の CFT 指針では、鋼構造設計規準⁸⁾の幅厚比・径厚比制限値の 1.5 倍まで用いてよいことになっている。AISC では、幅厚比・径厚比の違いによって Compact, Noncompact, Slender の 3 種類に断面が区別されており、設計の際に扱いが異なる。図-1 に幅厚比・径厚比制限値の比較を示す。

角形鋼管では、Eurocode が最も控えめな値で AIJ の鋼構造の幅厚比制限に近く、AISC の Compact 断面の制限が AIJ の CFT の幅厚比制限と近い。

円形鋼管では、AISCのCompact断面の制限値が最も控えめな値で、EurocodeとともにAIJ の鋼構造の径厚比制限に近い。AIJの径厚比制限値はAISCのCompact断面と

Noncompact断面の制限値の中間値に近い。

(2) 部材長の制限

AIJ の CFT 指針では、曲げを受ける材の座屈長さは断面せいの 30 倍以下に制限されている。

Eurocode 4 では、相対細長比 $\bar{\lambda}$ (式(1))を 2 以下にするよう制限している。

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (1)$$

ここで、 $N_{pl,Rk}$ は軸圧縮耐力、 N_{cr} は弾性座屈荷重で、有効曲げ剛性は次式で算定される。

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + 0.6 E_{cm} I_c \quad (2)$$

ここで、 I_a, I_s, I_c : それぞれ鋼、鉄筋、コンクリートの断面二次モーメント、 E_{cm} : コンクリートの割線弾性剛性 ($= 22(f_{cm}/10)^{0.3} \times 10^3$) である⁹⁾。

AISCのSpecificationsには明確な部材長に関する記述は無かった。

3. 軸力と曲げを受ける合成部材の耐力

(1) AIJの設計式

CFT柱の終局曲げ耐力は、短柱は一般化累加耐力が基本で、長柱は座屈を考慮した累加耐力で算定することになっており、中柱は座屈を考慮した累加耐力と直線式で表されている (図-2参照)。

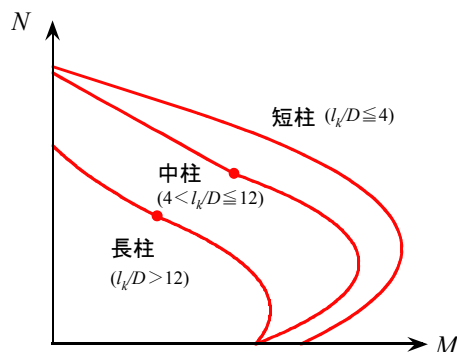


図-2 AIJ CFT 指針の曲げ耐力

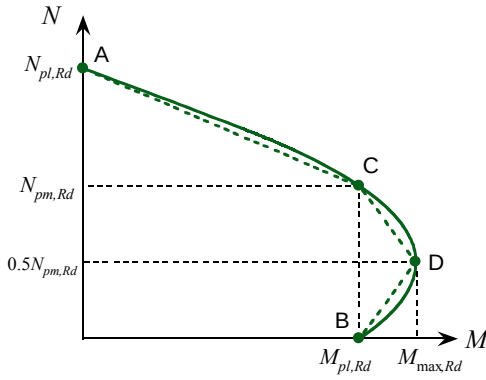


図-3 Eurocodeの曲げ耐力

a) 短柱の耐力 ($k/D \leq 4$)

座屈長さが断面せいの4倍以下の柱の終局耐力は、全塑性状態を仮定した一般化累加強度である。ただし、円形 CFT の場合は、コンクリートと鋼管の相互拘束効果が考慮されており、コンクリート強度は(3)式を用い、鋼管の降伏応力は圧縮側と引張側でそれぞれ 0.89, 1.08 倍される。

$$\sigma_{cB} = F_c + 0.78 \cdot \frac{2t}{D-2t} \cdot F_y \quad (3)$$

b) 長柱の耐力 ($12 < k/D$)

座屈長さが断面せいの12倍を超える柱の終局耐力は、座屈を考慮した累加耐力で算定することになっている。

CFT指針には累加に用いるコンクリート長柱の耐力算定法が示されており、鋼長柱は鋼構造塑性設計指針⁸⁾による。コンクリート長柱の軸耐力を $cN_{cu} = 0.9cN_{cr}$ とすると軸力と終局耐力の相関関係は(4)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} &N_u \leq 0.9cN_{cr} \text{ のとき} \\ &M_u = \left\{ \frac{4N_u}{0.9cN_{cr}} \left(1 - \frac{N_u}{0.9cN_{cr}} \right) cM_{\max} + sM_{u0} \left(1 - \frac{N_u}{N_k} \right) \right\} / C_M \\ &N_u > 0.9cN_{cr} \text{ のとき} \\ &M_u = \left(1 - \frac{N_u - 0.9cN_{cr}}{sN_{cr}} \right) \left(1 - \frac{N_u - 0.9cN_{cr}}{sN_E} \right) \left(1 - \frac{0.9cN_{cr}}{N_k} \right) sM_{u0} / C_M \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 N_k はCFT柱のオイラー荷重で(5)式、 $cM_{\max}$ は基準化細長比 λ_1 のコンクリート長柱の最大曲げ耐力で(6)式、 C_M はモーメント勾配と軸力の大きさの影響係数で(9)式による。

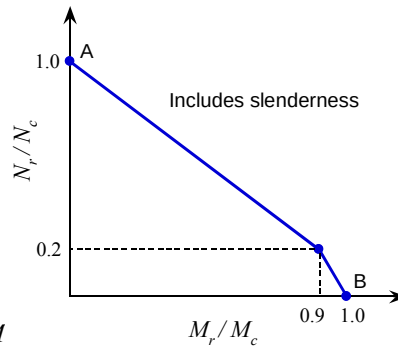
$$N_k = \frac{\pi^2 \left(\frac{cE'_c I}{5} + sE_s I \right)}{l_k^2} \quad (5)$$

$$cM_{\max} = \frac{C_b}{C_b + \lambda_1^2} cM_{\max 0} \quad (6)$$

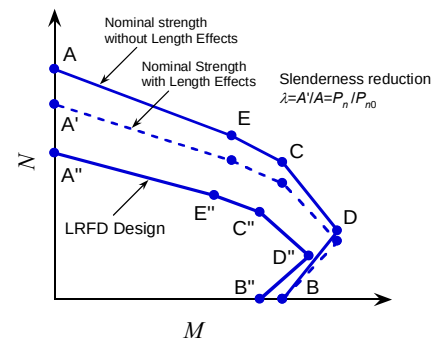
$$cM_{\max 0} = \frac{F_c \cdot D^3}{8} \text{ (角形)}, \frac{F_c \cdot D^3}{12} \text{ (円形)} \quad (7)$$

$$C_b = 0.923 - 0.0045 F_c \quad (8)$$

$$C_M = 1 - 0.5 \left(1 - \frac{M_2}{M_1} \right) \sqrt{\frac{N_u}{N_k}} \geq 0.25 \quad (9)$$



(a) Method 1



(b) Method 2

図-4 AISC Specificationの曲げ耐力

ただし、 M_2/M_1 は単曲率の場合に正である。

c) 中柱の耐力 ($4 < k/D \leq 12$)

座屈長さが断面せいの4倍を超え12倍以下の柱の終局耐力は、低軸力域は長柱の式と同じ(4)式を使用し、高軸力域部($N_u > cN_{cu}$)では直線式である(10)式で算定できる。

$$M_u = sM_{u0} \left(1 - \frac{N_u - cN_{cu}}{N_{cu2} - cN_{cu}} \right) \left(1 - \frac{cN_{cu}}{N_k} \right) \frac{1}{C_M} \quad (10)$$

(2) Eurocodeの設計式

短柱の設計終局曲げ耐力は(11)式で表される。

$$M_{Ed} \leq \alpha_M M_{pl,N,Rd} \quad (11)$$

ここで、 α_M ：曲げに関する係数で、鋼のグレードにより以下の値をとる。0.9 (S235～S355), 0.8 (S420～S460)

$M_{pl,N,Rd}$ と軸力との相関曲線は全塑性状態での一般化累加強度、あるいは相関曲線を単純化した3直線を用いてもよい(図-3参照)。その際のコンクリートの最大応力はCFT柱では $1.0f_{cd}$ としてよい。

二次曲げの影響は(12)式の k を一次の最大曲げ耐力 M_{Ed} に乗じて算定してよいことになっている。

$$k = \frac{\beta}{1 - N_{Ed}/N_{cr,eff}} \geq 1.0 \quad (12)$$

ここで、 $N_{cr,eff}$ は限界荷重で、有効曲げ剛性は(13)式による。 β は等価モーメント係数で(14)式で算定される。ただし、 r は端部曲げモーメント比で単曲率の場合に正である。

$$(EI)_{eff,II} = 0.9(E_a I_a + E_s I_s + 0.5E_{cm} I_c) \quad (13)$$

$$\beta = 0.66 + 0.44r \quad (14)$$

(3) AISCの設計式

a) 軸力と曲げ耐力の相関関係

Compact断面のCFT柱は、鋼柱の耐力に準じた方法(Method 1)、あるいは塑性応力分布に基づく曲げ耐力(Method 2)で算定される。その際のコンクリートの最大応力は $0.85f_c$ で、円形CFTは $0.95f_c$ としてもよい。また、NoncompactとSlender断面のCFT柱は鋼柱の耐力に準じた方法で算定される(図-4(a)参照)。材長を考慮する場合、

材長に関する低減係数 $\lambda (= P_n / P_{n0})$ を適用した後、圧縮および曲げに関する抵抗係数を乗じて求めることになっている (図-4(b)参照)。

$$P_n = \begin{cases} P_{n0} \cdot 0.658^{P_{n0}/P_e} & (P_{n0}/P_e \leq 2.25) \\ 0.877 P_e & (P_{n0}/P_e > 2.25) \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 P_{n0} は材長 0 の短柱の圧縮耐力 ($= F_y A_s + F_{ysr} A_{sr} + 0.85 f'_c A_c$) で、 P_e は弾性座屈荷重で、有効曲げ剛性は次式で算定される。

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_3 E_c I_c \quad (16)$$

ここで、 C_3 は CFT 柱の有効剛性の係数で次式による。

$$C_3 = 0.6 + 2 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.9 \quad (17)$$

呼び曲げ耐力算定の際には、Eurocode と同様に相關曲線を単純化したものを用いてもよく、図-4(b)の AC 間に追加の E 点 (中立軸高さが C 点の半分) を考慮してもよい¹⁰⁾。なお、LRFD 法の抵抗係数は $\phi = 0.90$ である。

b) Compact断面の呼び曲げ耐力

Compact断面 CFT 柱の呼び曲げ耐力 M_n は全塑性状態での一般化累加耐力 M_p で算定される。コンクリートの圧縮強度は $0.85 f'_c$ である。

c) Noncompact断面の呼び曲げ耐力

Noncompact断面 CFT 柱の呼び曲げ耐力は (18) 式による。 M_y は降伏モーメントで、圧縮フランジ縁が降伏した時の耐力である。コンクリートの最大応力は $0.70 f'_c$ に制限されている (図-5 参照)。

$$M_n = M_p - (M_p - M_y) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \quad (18)$$

d) Slender断面の呼び曲げ耐力

Slender断面 CFT 柱の呼び曲げ耐力 M_{cr} は弾性応力分布による降伏耐力で、引張フランジが降伏応力、圧縮フランジは局部座屈応力 F_{cr} ⁹⁾、コンクリートの最大応力は $0.70 f'_c$ に制限されている (図-5 参照)。

e) 二次曲げの影響を考慮した耐力

主として鉛直力を支持する部材のみに適用されるが、二次曲げの効果を考慮した耐力は (19) 式で表される。

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (19)$$

ここで、 B_1 、 B_2 はそれぞれ P - δ 効果、 P - Δ 効果を考慮する係数で、 M_{nt} 、 M_{lt} はそれぞれ構造の横移動が無い場合と

有る場合の一次の曲げ耐力である。

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \alpha P_r / P_{el}} \geq 1 \quad (20)$$

ここで、 $\alpha = 1.0$ (LRFD 法)、 C_m はモーメント勾配に関する係数、 P_{el} は弾性座屈荷重である。

$$C_m = 0.6 - 0.4 (M_1 / M_2) \quad (21)$$

ただし、 M_1 / M_2 は複曲率の場合に正である。

4. 各国の設計耐力の比較

(1) 解析変数

本論では、内蔵鉄筋の配されていない CFT 柱の終局曲げ耐力の比較を行う。比較する変数として、断面形状 (角形、円形)、鋼管の降伏強度 F_y (235, 325, 400 N/mm²)、コンクリートの設計規準強度 F_c (21, 36, 60)、幅厚比 B/t (50, 30, 15) あるいは径厚比 D/t (90, 60, 30)、座屈長さ と断面せいの比を選んだ。断面せいは、角形、円形断面ともに $D = 600$ mm とした。

(2) 設計曲げ耐力の比較

図-6, 7 に、曲げ耐力の比較を示す。図中、赤実線は CFT 指針の耐力、緑実線は Eurocode の耐力、青実線は AISC の耐力を示している。なお、緑破線と青破線はそれぞれ、曲げ耐力に関する係数 α_M を考慮した Eurocode の耐力、LRFD 法の抵抗係数を考慮した AISC の耐力である。曲げ耐力算定の際に、柱の初期たわみや不完全性等による不可避の偏心、また柱頭の横移動は無視している。

Eurocode の耐力算定の際には、コンクリートの設計強度 f_{cd} は f_{ck} と同じとし、耐力線は 3 直線による単純化相關線を用いたものを示している。

AISC では、円形 CFT 柱では Noncompact 断面となる組み合わせのものもあるが、ここでは Compact 断面として図-4(b)の方法で耐力線を求めている。

角形 CFT 短柱の耐力は、各設計式ともほぼ同等の評価をしている。AISC の耐力はコンクリート強度低減係数 0.85 を用いるため、AIJ や Eurocode よりもやや小さめの評価をしている。角形 CFT 長柱の耐力は、AIJ の耐力が最も小さい評価である。AIJ と Eurocode では座屈長さ

と断面せいの比の影響は同様の傾向を示すが、 P - δ 効果を考慮する際の曲げ剛性の評価が異なるため、両耐力に差が表れる。また、AISC の長柱の耐力は、軸耐力に関して耐力の低減を行うため、軸力の小さい領域で曲げ耐力を大きめに評価することとなる。

鋼材の強度が大きい、あるいは幅厚比が小さいといった、曲げ耐力に対する鋼断面の影響が大きい場合には各設

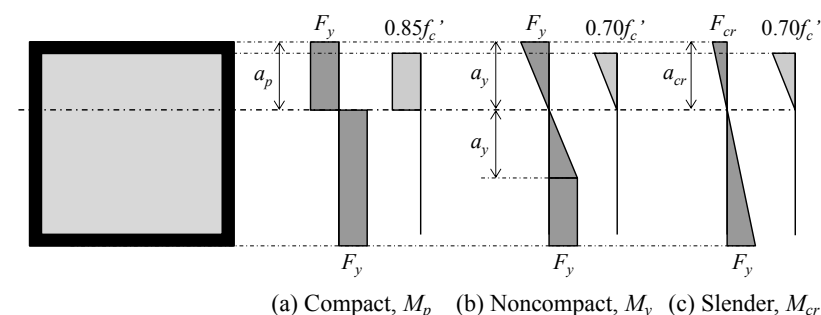
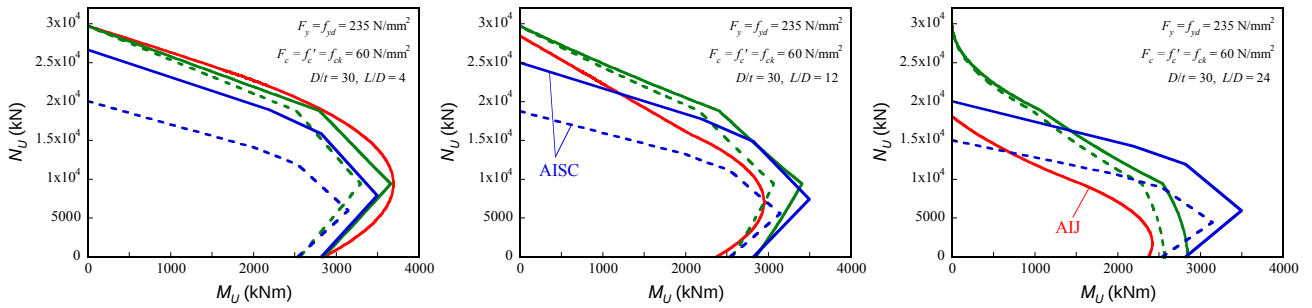
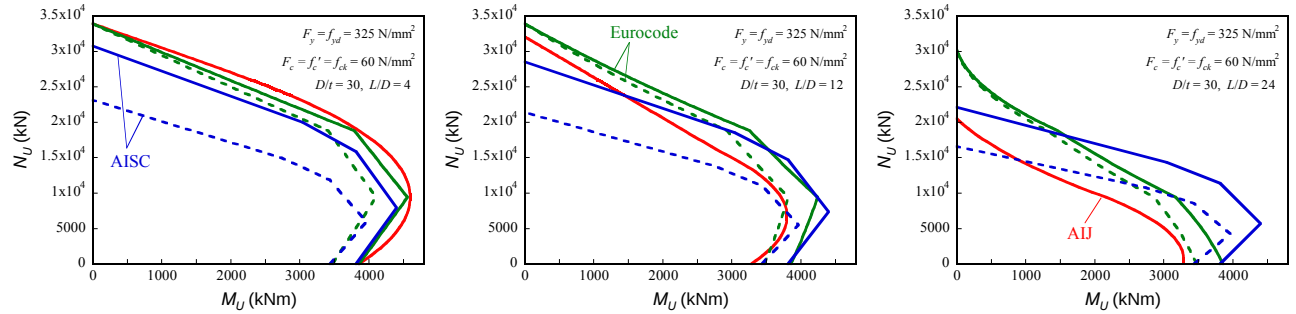


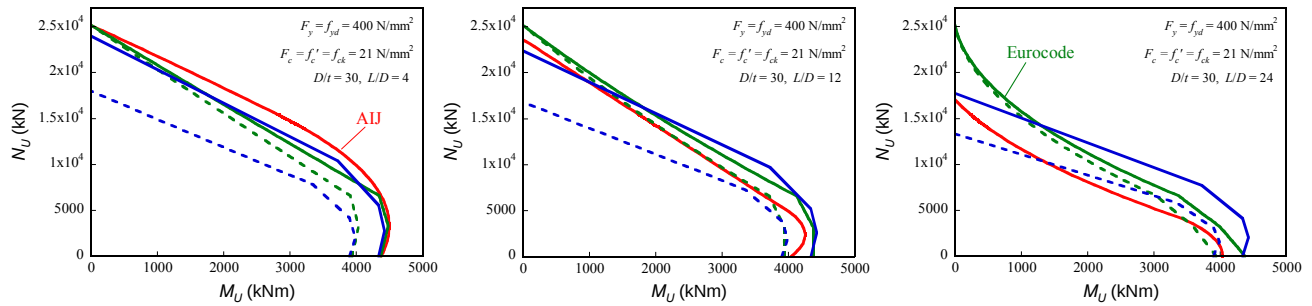
図-5 AISC の曲げ耐力の応力ブロック



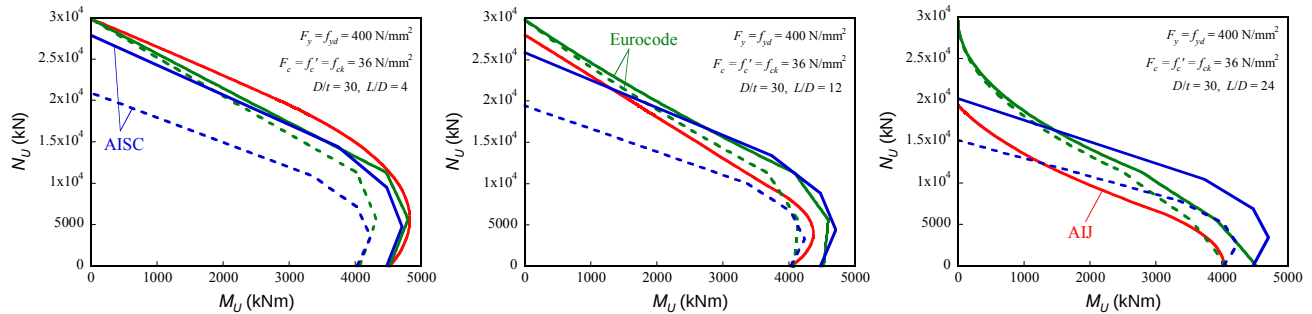
(a) $F_y = f_{yd} = 235 \text{ N/mm}^2$, $F_c = f'_c = f_{ck} = 60 \text{ N/mm}^2$



(b) $F_y = f_{yd} = 325 \text{ N/mm}^2$, $F_c = f'_c = f_{ck} = 60 \text{ N/mm}^2$



(c) $F_y = f_{yd} = 400 \text{ N/mm}^2$, $F_c = f'_c = f_{ck} = 21 \text{ N/mm}^2$



(d) $F_y = f_{yd} = 400 \text{ N/mm}^2$, $F_c = f'_c = f_{ck} = 36 \text{ N/mm}^2$

図-6 角形 CFT 柱の $M-N$ 相関曲線の比較 (続く)

計耐力間の差は小さくなる傾向にあるが、コンクリート強度が大きい、あるいは幅厚比が大きいといった、曲げ耐力に対するコンクリート断面の影響が大きい場合は各設計耐力の差が大きくなる傾向にある。

円形 CFT 短柱の耐力は、AIJ の耐力は拘束効果の影響を考慮するため最も大きい評価となる。AISC はコンクリート強度低減係数 0.95 を用いるためやや小さい評価となる。円形 CFT 長柱の耐力は、角形 CFT 長柱の耐力と同様に、AIJ の耐力が最も小さい評価となり、AIJ と

Eurocode の耐力は $P-\delta$ 効果を考慮する際の曲げ剛性の評価が異なるため両耐力に差が表れ、AISC の長柱の耐力は、軸力の小さい領域で大きめの評価をしている。鋼断面の影響が大きい場合には各設計耐力間の差が小さく、コンクリート断面の影響が大きい場合に各設計耐力の差が大きくなる傾向にある。

AISC の設計式で CFT 長柱の耐力を算定する際には、コンクリート断面の影響が大きい場合には図-4(a)の耐力を用いることで安全側の評価となる。

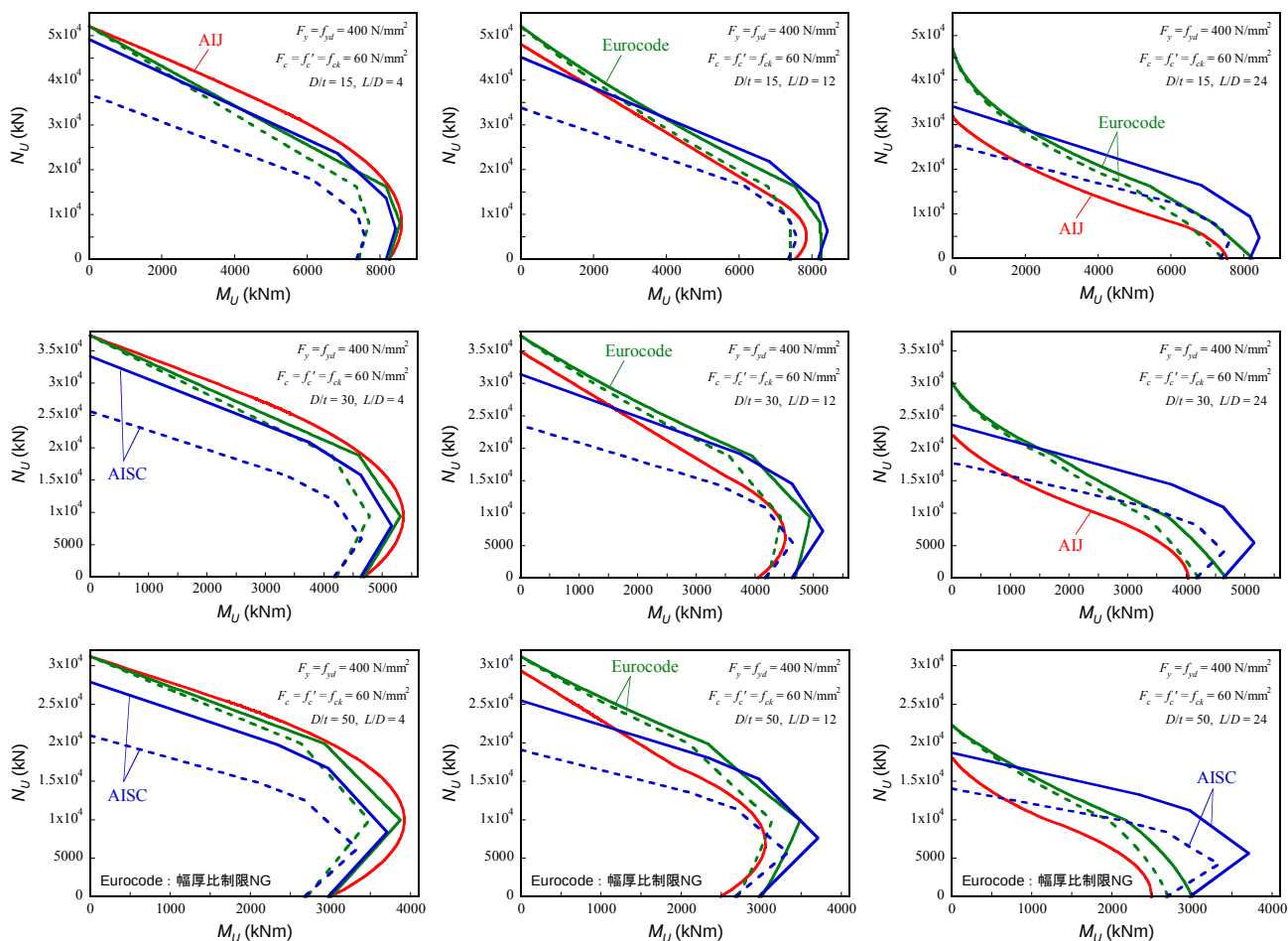


図-6 角形 CFT 柱の M - N 相関曲線の比較 (続き)

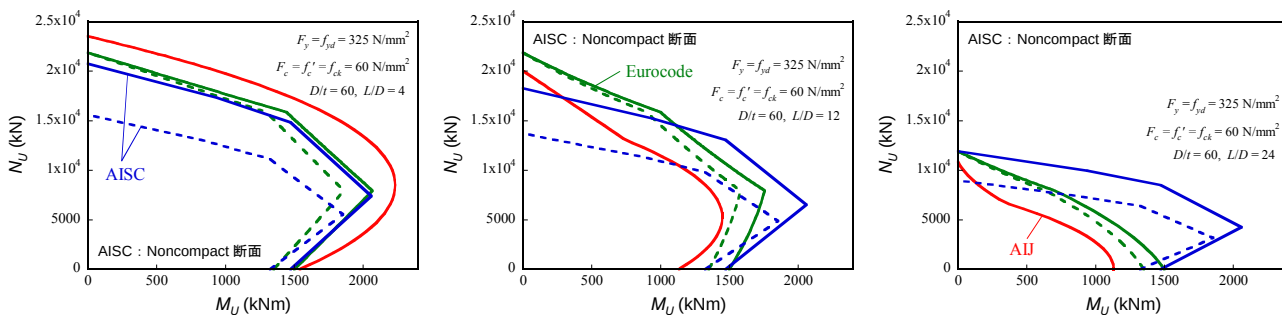
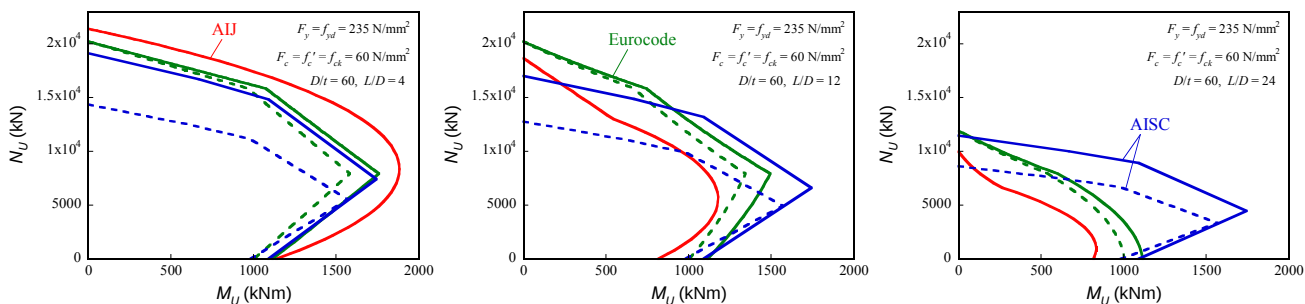
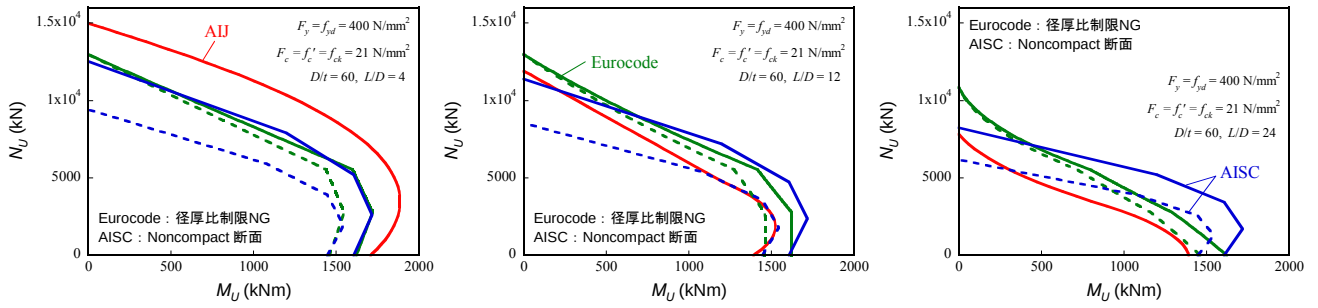
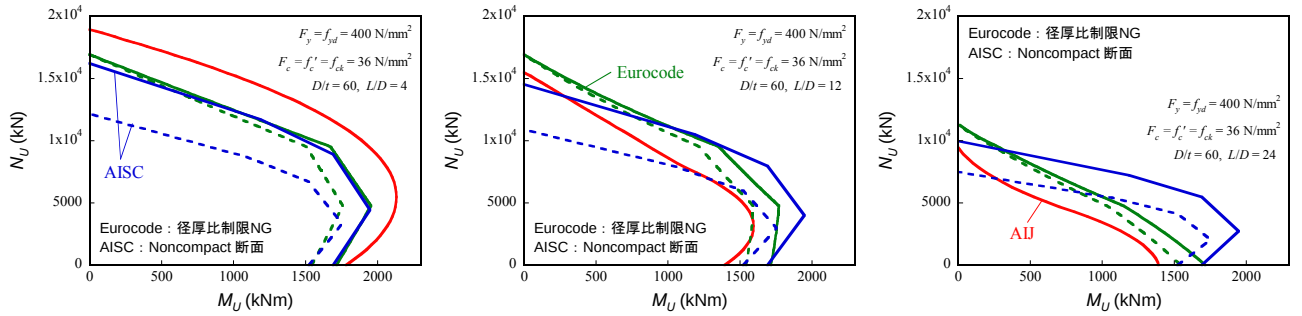


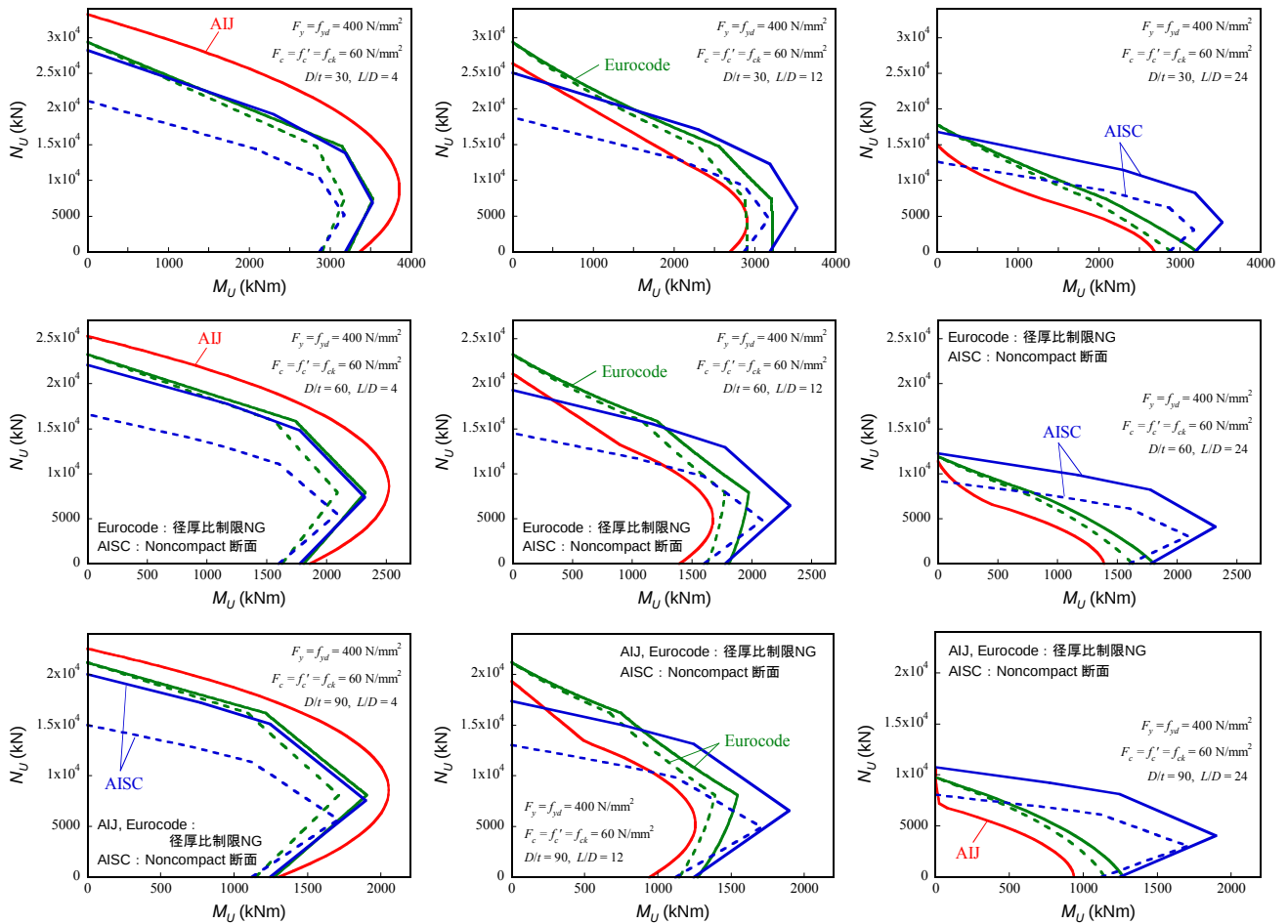
図-7 円形 CFT 柱の M - N 相関曲線の比較 (続き)



(c) $F_y = f_{yd} = 400 \text{ N/mm}^2, F_c = f'_c = f_{ck} = 21 \text{ N/mm}^2$



(d) $F_y = f_{yd} = 400 \text{ N/mm}^2, F_c = f'_c = f_{ck} = 36 \text{ N/mm}^2$



(e) $F_y = f_{yd} = 400 \text{ N/mm}^2, F_c = f'_c = f_{ck} = 60 \text{ N/mm}^2$

図-7 円形 CFT 柱の $M-N$ 相関曲線の比較 (続き)

5. まとめ

本論では、我が国の合成柱の設計耐力が、諸外国の基・規準とどのような関係にあるか検討するため、軸力と曲げを受ける CFT 柱に関して、欧州の Eurocode 4 と米国の AISC の鋼構造の Specification との比較を行った。

短柱では各設計式の耐力差は小さいが、長柱では AIJ の耐力が最も小さくなる傾向にあり、AIJ と Eurocode の耐力は $P-\delta$ 効果を考慮する際の曲げ剛性の評価が異なるため両耐力に差が表れている。AISC の長柱の耐力は、軸力の小さい領域で大きめの評価をしていた。

本論では、欧州と米国の合成構造の基準類との比較を行ったが、更に検討の対象を増やし、2015年に刊行予定のオーストラリアとニュージーランド合同の合成構造規準 AS/NZS 2327、中国の型鋼混凝土組合結構技術規程 (JGJ138-2012)¹¹⁾、あるいは国内においても、土木学会の複合構造標準示方書¹²⁾との比較をすることにより、日本の合成構造の建築規準の国際標準化と、より合理的な合成構造の設計法の検討の一助となると考える。

謝辞：本検討は、日本建築学会の合成構造規準国際標準化検討小委員会（主査：藤本利昭）の活動の一環として行われたものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 李麗, 堺純一, 南宏一, 阿部毅: 日・中 SRC 規準・規程の比較, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp.817-824, 2006.11
- 2) 城戸將江, 劉懋: 圧縮力を受ける CFT 柱における SRC 規準とユーロコード 4 の設計式の比較, 第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, No.49, 2013.11
- 3) 日本建築学会鋼コンクリート合成構造運営委員会: 合成構造の国際化に向けて, 2015 年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料, 2015.9
- 4) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008.10
- 5) European Committee for Standardization: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1994-1-1:2004), 2004
- 6) American Institute of Steel Construction: Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10), 2010
- 7) American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary, 2011
- 8) 日本建築学会: 鋼構造設計規準—許容応力度設計法—, 2005.9
- 9) European Committee for Standardization: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004), 2004
- 10) American Institute of Steel Construction: Steel Construction Manual Design Examples, V14.1, 2013
- 11) 中華人民共和國建設部: 型鋼混凝土組合結構技術規程 (JGJ138-2012), 2012.6
- 12) 土木学会: 複合構造標準示方書, 2009.12

COMPARISON OF DESIGN FORMULAE OF CFT BEAM-COLUMNS SUBJECTED TO AXIAL FORCES AND FLEXURE BETWEEN JAPAN AND EUROPE AND U.S.

Takashi FUJINAGA, Kazuhiro HAYASHI and Masae KIDO

With the globalization of the building design code, the international standardization of Japanese steel concrete composite structure's design standard is strongly expected.

In this paper, the relation between Japanese composite structure's standard and that of other countries were compared and design formulae of CFT beam-columns subjected to axial forces and flexure were discussed. "Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures" of AIJ, "Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures" and "Specification for Structural Steel Buildings" of AISC were used for comparison.