

論文 充填被覆型鋼管コンクリート長柱の耐力評価法—角形鋼管を内蔵する場合—

金田 航平*1・藤永 隆*2・孫 玉平*3

要旨：日本建築学会の鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準では、充填被覆型鋼管コンクリート長柱の終局耐力算定時に、充填コンクリート部を無視して被覆鋼管コンクリート長柱として算定することが推奨されている。しかし、終局耐力は安全側に評価できるが、短柱と長柱の設計式で不連続が生じることに加え、軸力が卓越する領域で安全側すぎる評価となる。本論では、充填コンクリートも考慮し、かつ簡便な耐力評価法を提案している。数値解析で終局耐力の精解値を求め、現行の SRC 規準による耐力、提案耐力との比較検討を行った。

キーワード：コンクリート強度低減係数、充填コンクリート、座屈長さ断面せい比、終局曲げ耐力

1. はじめに

日本建築学会の鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(以下SRC規準とする)りでは、充填被覆型鋼管コンクリート(表-1参照、以下CEFTとする)柱の曲げ耐力算定の際に、座屈長さ断面せい比が12を超える長柱の場合は、鋼管内部に充填されたコンクリートは無視して被覆鋼管コンクリート長柱として算定することが推奨されている。これによりCEFT長柱の終局曲げ耐力は安全側に評価できるが、短柱と長柱の設計式で大きな不連続が生じることに加え、軸力が卓越する領域では充填コンクリート分の考慮ができないため安全側過ぎる評価となる。現行のSRC規準では、CEFT短柱の曲げ耐力算定に用いるコンクリート強度低減係数として、被覆鉄筋コンクリート部分と充填コンクリート部分とにそれぞれ係数が与えられており、CEFT長柱の曲げ耐力を算定する際にそれらを準用すれば充填コンクリートの耐力も考慮可能であるが、非常に煩雑な算定式となる。一方、H形鋼や十字型鉄骨が内蔵される一般的な鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力算定時のコンクリート強度低減係数を用いて

CEFT長柱の終局曲げ耐力を求めれば、耐力算定は非常に簡単になる。

本論では、簡便で精度のよい CEFT 長柱の終局曲げ耐力算定法を提案することを目的とする。内蔵される鋼管形状は角形と円形があるが、本論では等厚正方形断面の角形鋼管内蔵のものを対象とする。数値解析により終局曲げ耐力の精解値を求め、現行の SRC 規準式による耐力、および提案耐力との比較検討を行う。

2. 充填被覆型鋼管コンクリート長柱の耐力

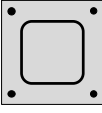
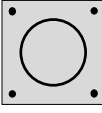
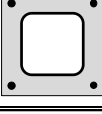
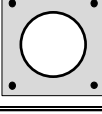
2.1 耐力計算時の仮定

通常の鋼管コンクリート構造では、被覆コンクリート内に鉄筋が配されているが、本論では計算の簡便化のため被覆鉄筋コンクリート内の鉄筋を無視して、純粋な鋼管コンクリート柱として耐力を検討している。また、鋼管のかぶり厚さとコンクリート断面せいの比 d/D は 0.2 で統一している。さらに、通常充填されるコンクリートは流動性の高いものが用いられるため、充填コンクリートの強度は被覆コンクリートと比較して大きくなるのが一般的であるが、本論では、充填コンクリートと被覆コンクリートの強度が同じか、強度が近い場合を想定して、充填コンクリートと被覆コンクリートの圧縮強度は同じとして検討をしている。

2.2 SRC 規準による CEFT 長柱の耐力

SRC 規準では、CEFT 長柱の終局曲げ耐力は、鋼管の内部に充填されたコンクリート部は無視して被覆鋼管コンクリート長柱として算定することが推奨されている。また、被覆コンクリートのコンクリート強度低減係数は式(1)で算定される。

表-1 鋼管コンクリートの分類

	角形鋼管	円形鋼管
充填被覆型		
被覆型		

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 神戸大学 都市安全研究センター准教授 博士(工学) (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

$$c r_U = 0.85 - 0.6 s p = 0.85 - 0.6 s \frac{A}{b \cdot D} \quad (1)$$

ここで、 $s p$ ：鋼管比、 $s A$ ：鋼管断面積、 b ：柱はば、 D ：柱せい

また、CEFT 短柱の曲げ耐力算定の際、コンクリート強度低減係数として被覆鉄筋コンクリート部分は式(1)を用いるが、充填コンクリート部分には低減係数 $c r_U = 0.85$ が与えられており、これを準用して曲げ耐力を算定すれば、充填コンクリートを考慮した CEFT 長柱の耐力算定が可能である。しかし、2 種類のコンクリート強度低減係数を考慮した算定式は、コンクリート長柱部分のみでも非常に煩雑な算定式となる（付表(a)参照）。

2.3 提案する CEFT 長柱の耐力

SRC 規準では、H 形鋼や十字型鉄骨が内蔵される一般的な SRC 柱の耐力算定において、コンクリート断面を一体として扱い、圧縮側鉄骨フランジの影響が考慮された式(2)のコンクリート強度低減係数が用いられている。角形鋼管内蔵の CEFT 柱は通常の SRC 柱と、コンクリートに対する圧縮フランジの影響が近いと考えられるので、この方法を準用し、CEFT 長柱の耐力として提案する。CEFT 短柱の耐力算定に用いる、被覆鉄筋コンクリートと充填コンクリートの双方のコンクリート強度低減係数を準用して算定した充填コンクリート部の耐力も考慮した CEFT 長柱の耐力と、本提案耐力を比較しても誤差は小さく（図-1 参照）、耐力算定は非常に簡便である（付表(b)参照）。

$$c r_U = 0.85 - 2.5 s p_c = 0.85 - 2.5 s \frac{a_c}{b \cdot D} \quad (2)$$

ここで、 $s p_c$ ：圧縮側鉄骨比、 $s a_c$ ：圧縮側鉄骨フランジの断面積

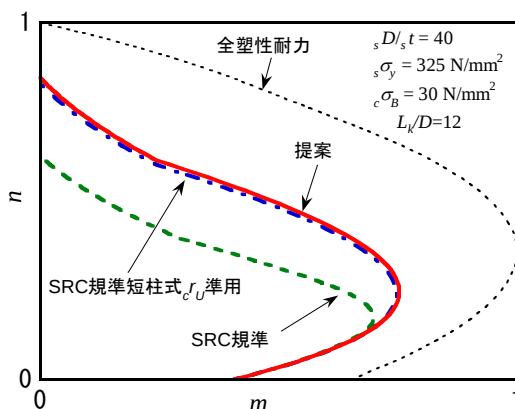


図-1 CEFT 長柱の耐力算定法

3. 数値解析による CEFT 長柱の耐力

3.1 解析概要

数値解析により CEFT 長柱の終局曲げ耐力を求めた。

図-2 に示す材端に等偏心 e の圧縮力を受ける長柱の解析を行った。材のたわみ形状を式(3)に示す通り正弦半波

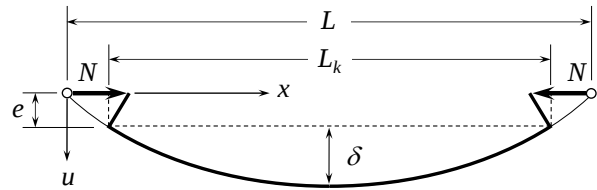


図-2 解析モデル

で仮定し、材中央でのみ釣合いを満足するとして、荷重-材中央部変位関係を求め、最大軸耐力を算定した。

$$u = (e + \delta) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (3)$$

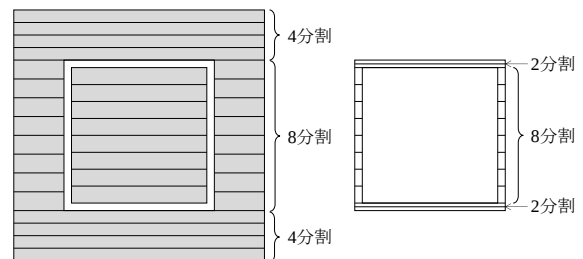


図-3 断面の分割

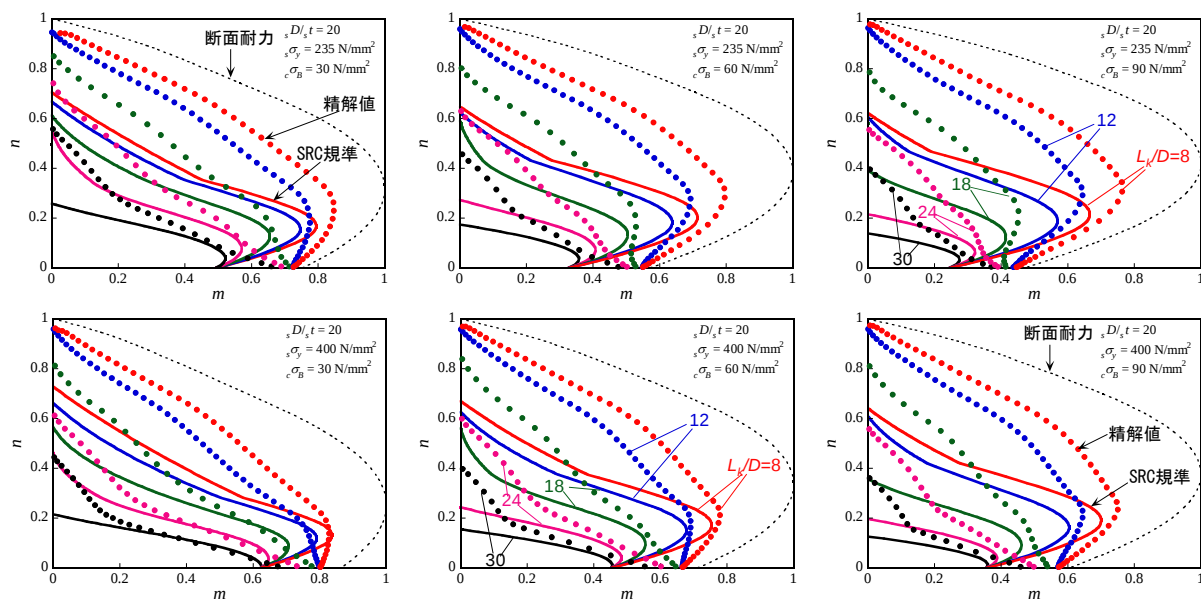
解析断面は、被覆コンクリートを 16 分割、充填コンクリートを 8 分割、鋼管フランジ部を 2 分割、鋼管ウェブ部を 8 分割した（図-3 参照）。

コンクリートの応力-ひずみ関係は充填コンクリート部も被覆コンクリート部も Popovics モデル²⁾を用い、引張応力は負担しないものとした。この応力-ひずみ関係は鋼管による拘束を考慮していないため、最大耐力時にコンクリートのひずみが大きくなる短柱では耐力を小さめに算定する可能性がある。しかし本論で主眼を置いている長柱では、耐力は柱の曲げ剛性の影響が大きいため、拘束効果を考慮していないことによる誤差は小さいと考えられる。また、鋼材の応力-ひずみ関係は Menegotto-Pinto モデル³⁾を用いた。曲線の形状に関する係数 $R=20$ 、ひずみ硬化係数は 0 とした。算定において鋼材、コンクリートともに非線形弾性としている。

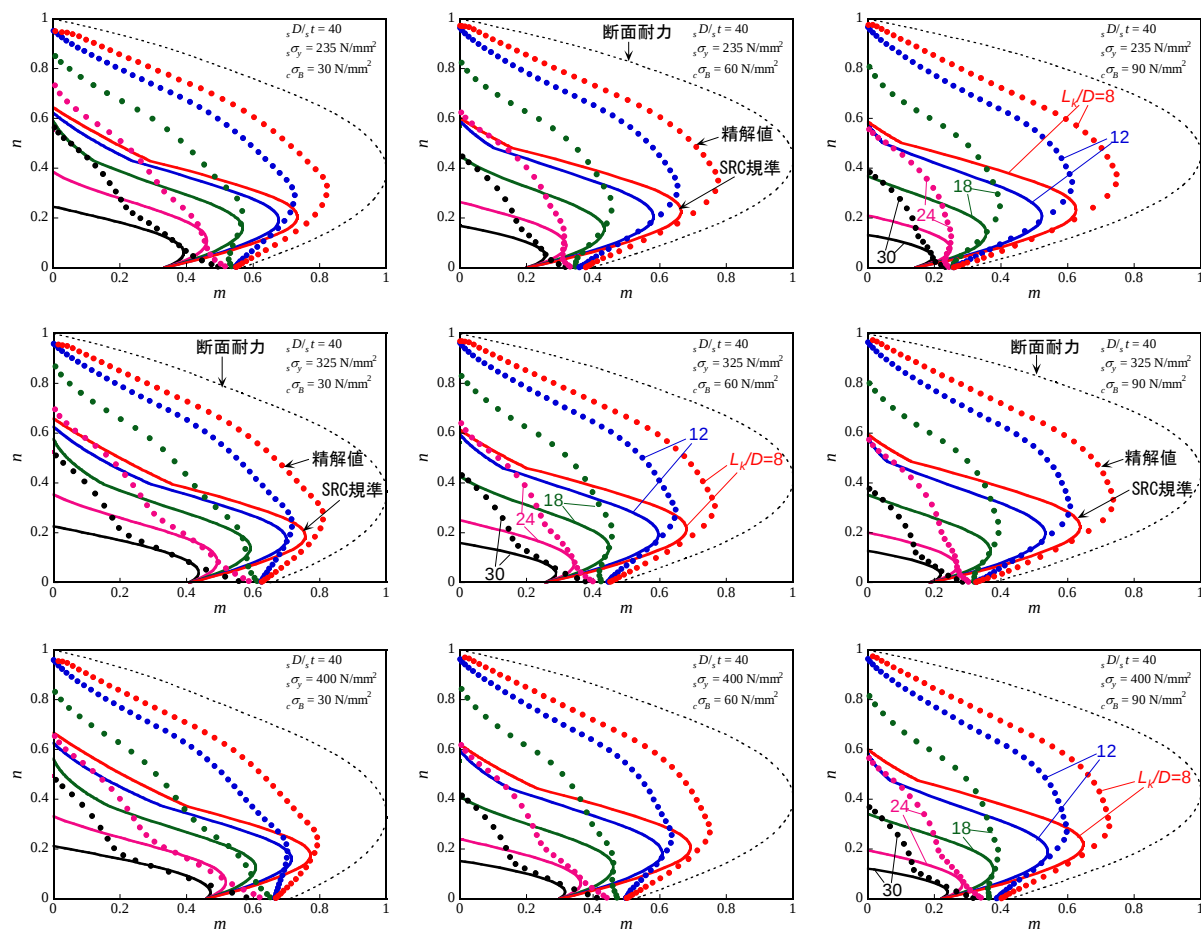
3.2 解析変数

解析変数として、鋼管の幅厚比 sD/st 、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ 、鋼管の降伏応力 $s\sigma_Y$ 、座屈長さ断面積比 L_k/D を選んだ。

鋼管の幅厚比 sD/st は、20, 40, 60 の 3 種類、コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ は 30, 60, 90 N/mm² の 3 種類、鋼管の降伏応力 $s\sigma_Y$ は 235, 325, 400 N/mm² の 3 種類、座屈長さ断面積比 L_k/D は 8, 12, 18, 24, 30 の 5 種類を選んだ。



(a) $sD/st = 20$



(b) $sD/st = 40$

図-4 SRC 標準式の耐力 (つづく)

4. 耐力の比較

図-4, 5 に CEFT 長柱の M_U-N_U 関係の比較を示す。
図-4 は SRC 標準による CEFT 長柱の耐力と解析値との

比較で, 図-5 が提案式による耐力と解析値の比較である。図中の実線および破線はそれぞれの算定法による座屈長さ断面せい比ごとの耐力線であり, ●印は 3 章の数

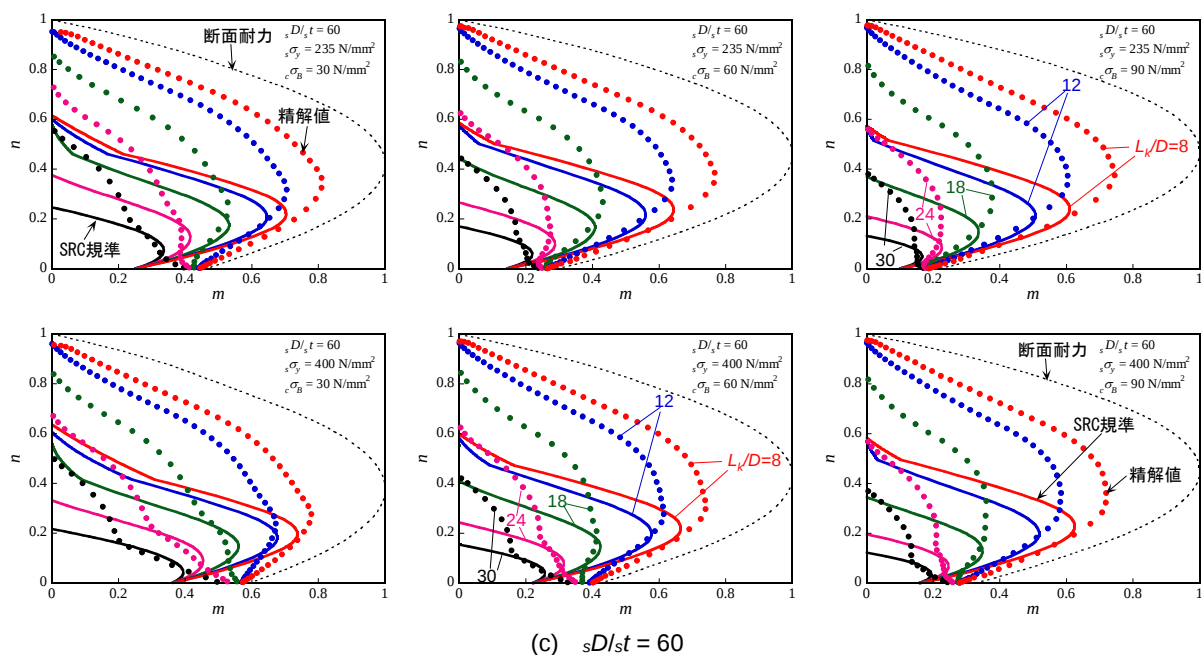


図-4 SRC 規準式の耐力 (つづき)

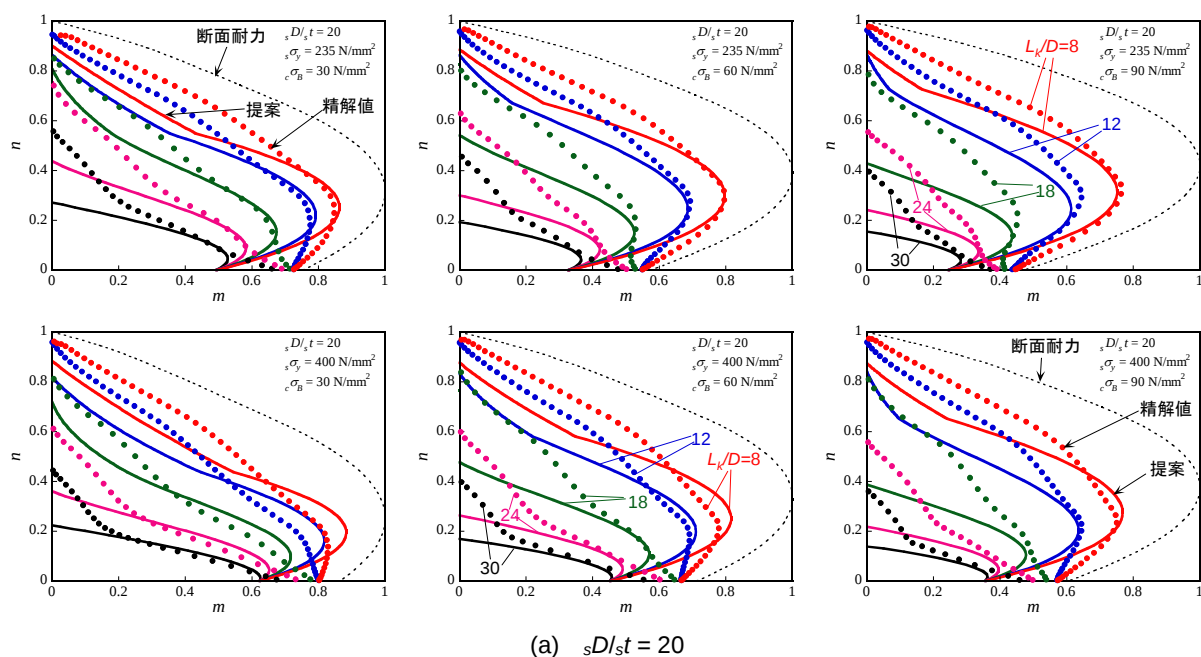


図-5 提案耐力（つづく）

値解析による最大耐力の計算値(図中には精解値と示す)である。点線は断面の全塑性耐力である。 M_U および N_U はコンクリート、鋼管の単純累加による CEFT 断面の全塑性モーメント($\epsilon_{ru}=1.0$ で算定)の最大値、および軸圧縮耐力で無次元化して、 $m=M_U/(Z_p s \sigma_Y + b D^2 F_c/8)$ 、 $n=N_U/(s A_s \sigma_Y + c A F_c)$ を示している。

SRC 規準による耐力と解析による精解値の比較より、いずれの場合も、SRC 規準の耐力の最大モーメント点の軸力より小さい低軸力域では解析値とよい対応を示しているが、高軸力域では SRC 規準の耐力では過小評価とな

っている。コンクリートの圧縮強度が小さく、鉄骨の降伏応力が大きい範囲で、すなわち鉄骨の耐力比が大きい断面では比較的精解値との対応が良いが、コンクリートの圧縮強度が大きく、鋼材の降伏応力が小さい範囲、コンクリートの負担する耐力の割合が大きい断面では精解値との差が大きくなっている。これは、SRC 規準の耐力式が鋼管内部の充填コンクリートを無視していることによる影響が大きくなるためである。

次に提案式による耐力と精解値の比較より、 $L_k/D = 8$,
12で精度よく評価できていることがわかる。 $L_k/D = 18$ 以

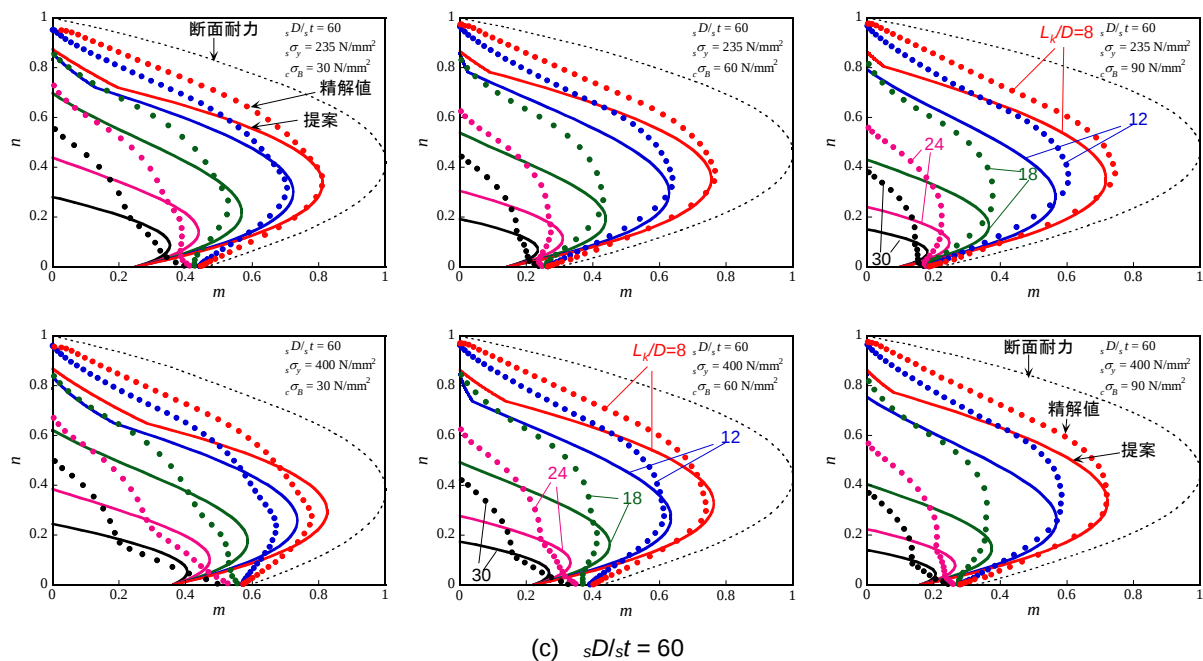
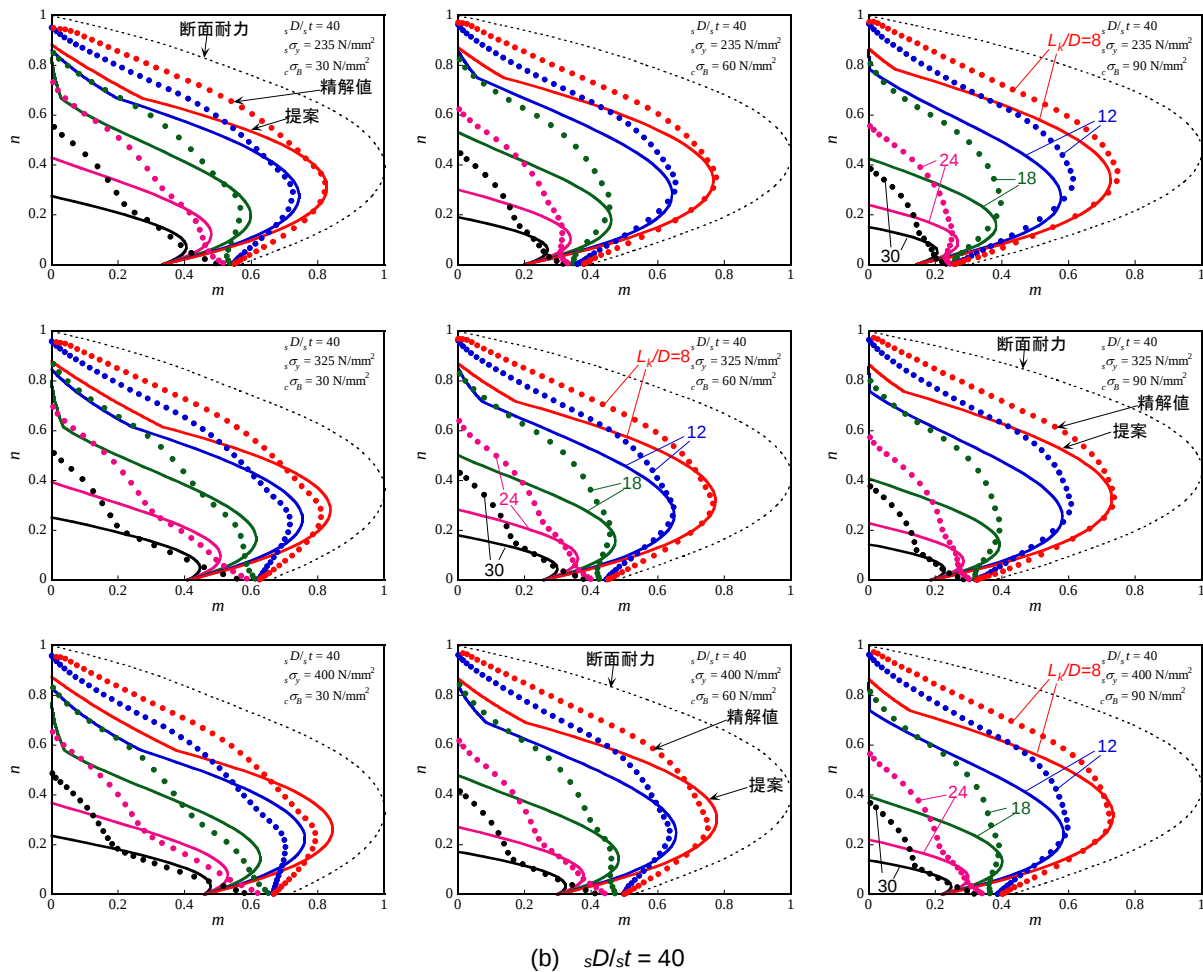


図-5 提案耐力 (つづき)

上では提案耐力の最大モーメント点の軸力より大きい高軸力域で過小評価をするが、SRC 規準の耐力よりは誤差は小さい。SRC 規準の耐力線と比べ提案式による耐力

は、最大モーメント付近まで精解値の耐力線を追跡できている。また、最大モーメント以降の高軸力域においても比較的良好な対応が見られる。しかし提案式による耐力

では、最大モーメント付近で危険側の評価となる場合がある。この傾向はコンクリートの圧縮強度が小さく鉄骨の降伏応力が大きいときにより顕著に現れる。 L_k/D が大きくなるにしたがって提案式とSRC規準式による差は小さくなっており、 $L_k/D=24, 30$ の時にはほぼ同等の傾向を示している。これは、 L_k/D が大きいときの終局耐力は、長柱累加の際の二次曲げの影響に関する低減係数の影響が大きく受けるためである。

付表 コンクリート長柱の終局曲げ耐力算定式

(a) SRC 規準短柱式を準用した耐力

式			
${}_cN_U = {}_cN_{U0} + {}_cN_{Ui}$ ${}_cM_U = ({}_cM_{U0} + {}_cM_{Ui}) \left(1 - \frac{{}_cN_U}{{}_cN_k} \right)$			
被覆コンクリート部	$0 \leq x_{n1} \leq {}_s d_1$	${}_cN_{U0} = {}_c r_U \cdot x_{n1} \cdot bD \cdot F_c$ ${}_cM_{U0} = \frac{1}{2} \frac{{}_cN_{U0}}{bD \cdot F_c} \left(1 - \frac{{}_cN_{U0}}{{}_c r_U \cdot bD \cdot F_c} \right) bD^2 \cdot F_c$	${}_c r_U = 0.85 - 0.6 {}_s p$
	${}_s d_1 \leq x_{n1} \leq 1 - {}_s d_1$	${}_cN_{U0} = {}_c r_U \left\{ x_{n1} - \frac{D}{b} (1 - 2 {}_s d_1) (x_{n1} - {}_s d_1) \right\} bD \cdot F_c$ ${}_cM_{U0} = {}_c r_U \left\{ \frac{x_{n1}(1 - x_{n1})}{2} - \frac{D}{b} (1 - 2 {}_s d_1) \frac{(x_{n1} - {}_s d_1)(1 - x_{n1} - {}_s d_1)}{2} \right\} bD^2 \cdot F_c$	
	$1 - {}_s d_1 \leq x_{n1} \leq 1$	${}_cN_{U0} = {}_c r_U \left\{ x_{n1} - \frac{D}{b} (1 - 2 {}_s d_1)^2 \right\} bD \cdot F_c$ ${}_cM_{U0} = {}_c r_U \frac{x_{n1}(1 - x_{n1})}{2} bD^2 \cdot F_c$	
充填コンクリート部		${}_cN_{Ui} = x_{n1} ({}_s D - 2 {}_s t)^2 {}_c r_U \cdot F_c$ ${}_cM_{Ui} = \frac{1}{2} (1 - x_{n1}) ({}_s D - 2 {}_s t) {}_cN_{Ui}$	${}_c r_U = 0.85$

(b) 提案耐力

式	
${}_cM_U = {}_cN_U \frac{D}{2} \left(1 - \frac{1}{{}_c r_U} \frac{{}_cN_U}{bD \cdot F_c} \right) \left(1 - \frac{{}_cN_U}{{}_cN_k} \right)$	${}_c r_U = 0.85 - 2.5 {}_s p_c$

5. まとめ

本論では、充填被覆型鋼管コンクリート長柱の終局耐力として、SRC規準では無視することが推奨されている充填コンクリートも考慮し、かつ簡便な終局耐力評価法を提案した。数値解析で終局耐力の精解値を求め、現行のSRC規準による耐力、提案耐力との比較検討を行った。得られた知見を以下に示して本論のまとめとする。

- (1) SRC 規準の耐力を精解値と比較すると、低軸力域では比較的良好に対応しているが、高軸力域で精解値に対し過小評価となる。
- (2) 提案式の耐力は $L_k/D=8 \sim 18$ のときに、SRC 規準の耐力と比べ精解値とよい対応をする。 $L_k/D=24, 30$ では、提案式の耐力は SRC 規準の耐力とほぼ同等の評価をする。
- (3) コンクリートの圧縮強度が小さく鉄骨の降伏応力が大きいとき、提案式の耐力は最大モーメント付近で精解値に対して危険側の評価をする場合がある。

注) ${}_cN_U$: コンクリート長柱の終局圧縮耐力, ${}_cM_U$: コンクリート長柱の終局曲げ耐力, ${}_cN_{U0}$: 被覆コンクリートの終局圧縮耐力, ${}_cM_{U0}$: 被覆コンクリートの終局曲げ耐力, ${}_cN_{Ui}$: 充填コンクリートの終局圧縮耐力, ${}_cM_{Ui}$: 充填コンクリートの終局曲げ耐力, ${}_cN_k$: コンクリート柱のオイラー座屈荷重 ($2 \pi^2 {}_cE I / 5 L_k^2$), x_{n1} : 柱の中立軸比 (x_n/D), x_n : コンクリート圧縮縁から中立軸までの長さ, ${}_s d_1$: 鋼管のかぶり厚さの柱せいに対する比 (${}_s d/D$)

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計と保有水平耐力—, 2014年1月
- 2) Popovics, S.: A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.3(5), pp.583-599, 1973
- 3) Menegotto, M. and Pinto, P. E.: Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending, *Proceedings of IABSE Symposium*, pp. 15-20, 1973