

CS-71 円形充填鋼管柱の解析に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係

九州大学大学院 学生会員 唐 嘉琳

九州大学工学部 正会員 日野伸一 太田俊昭

九州大学工学部 正会員 黒田一郎

1. まえがき

コンクリート充填鋼管柱(以下CFT柱と略す)は、耐力や靱性などの力学特性及び施工性において有利な構造形式であることが一般的に知られており、最近では土木・建築の分野で広く用いられている。しかし、CFT柱の耐力と変形性能を評価するとき、既存の設計基準^{1), 2)}では、かなり安全側の仮定が多く、鋼管の拘束効果を十分に評価したものとはいえない。また、最近の復旧仕様³⁾では、鋼管の局部座屈の影響、拘束効果を考慮した鋼材とコンクリートの応力-ひずみ関係式が提案されているものの、通常は矩形断面の橋脚が多いこともあり、円形CFT柱橋脚の保有耐力や変形性能照査への適用性については、未だ疑問の残るところである⁴⁾。

そこで本報では、円形CFT柱における鋼管の拘束効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化を提案し、これを用いて算定した耐力および $M-\phi$ 、 $P-\delta$ などの関係について、既往の実験結果と比較し、その適用性を検討したものである。

2. コンクリートの応力-ひずみ関係式の定式化

一般に中心軸圧縮を受ける円形CFT柱ではコンクリートが非弾性域に入れば、相互作用下での鋼管とコンクリートはそれぞれ図-1のような二軸および三軸応力状態になっている。このとき、コンクリートの圧縮強度 f_{cc} は多くの実験結果により、式(1)で表現できる。

$$f_{cc} = \lambda f_{cb} + k \sigma_r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f_{cb} : コンクリート供試体の一軸圧縮強度、
 λ : 寸法効果等の影響係数、 k : 拘束係数($k=4.0$)、
 σ_r : 拘束応力。

一方、拘束応力 σ_r と鋼管の周方向応力 $\sigma_{s\theta}$ の関係は力のつり合い条件より式(2)で与えられる。

$$\sigma_r = \sigma_{s\theta} \cdot 2t / (D - 2t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、二軸応力下の鋼管に対し、 $\sigma_{s\theta}$ はVon Misesの降伏条件を考慮して、次式(3)で求められる。

$$\sigma_{s\theta} = \beta f_{sy} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 f_{sy} : 鋼管の降伏強度、 β : 鋼管の径厚比(D/t)と強度比(f_{cb}/f_{sy})を考慮した実験定数。

次に、図-2に示すような2つの領域からなる拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を仮定する。ここで、 $\epsilon_c \leq \epsilon_{cd}$ の範囲では、既往の円形RC柱の実験に基づくManderら⁵⁾の提案モデル(式(4))を用いるが、下降域 $\epsilon_c \geq \epsilon_{cd}$ では、拘束効果による緩やかな強度低下を仮定して指数関数(式(5))を用いることとする。また、圧縮強度時のひずみ ϵ_{cc} 及び終局ひずみ ϵ_{cu} については、星隈ら⁶⁾、Scottら⁷⁾の提案式により、低強度から高強度までのコンクリートの特徴を考慮した上で、式(6)~(8)に示す修正式を用いた。

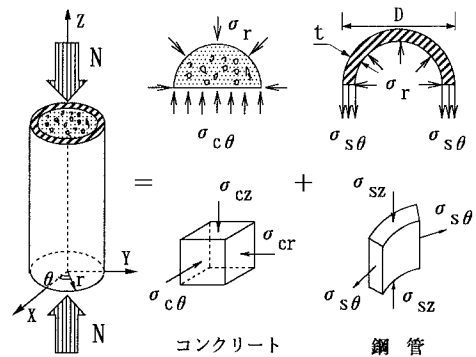


図-1 CFT柱の鋼管とコンクリートの相互作用

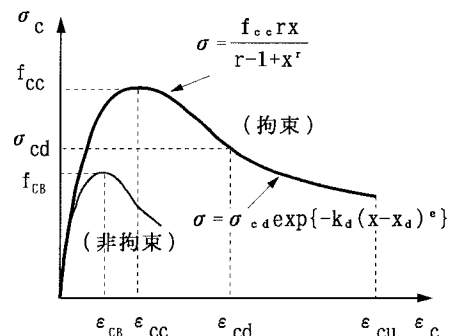


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

$$\sigma = \frac{f_{cc} r x}{r - 1 + x^r}, \quad (0 \leq x \leq x_d) \dots \dots (4)$$

$$\sigma = \sigma_{cd} \exp\{-k_d(x - x_d)^e\}, \quad (x_d \leq x) \dots \dots (5)$$

$$\epsilon_{cB} = \frac{2f_{cB}}{1.27 \times 10^5 + 415f_{cB}} \dots \dots (6)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{cB} + 0.033 \frac{\rho_s \beta f_{sy}}{f_{cB}} \dots \dots (7)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 0.9 \rho_s \frac{\beta f_{sy}}{3000} \dots \dots (8) \quad \text{ここに, } x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}}, \quad r = \frac{E_{co}}{E_{co} - E_{cc}}, \quad E_{cc} = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}}, \quad \rho_s = \frac{A_s}{A_c},$$

E_{co} , E_{cc} :それぞれ初期弾性係数と圧縮強度点の割線弾性係数, ϵ_{cB} :シリンダーの圧縮強度 f_{cB} 時のひずみ, ϵ_{cc} :拘束されたコンクリートの圧縮強度 f_{cc} 時のひずみ, A_s , A_c :それぞれCFT柱の鋼管面積とコンクリート面積, x_d :応力 $\sigma_{cd}=0.7f_{cc}$ 時のひずみ比, 係数 k_d , e :既往の実験よりそれぞれ0.05及び0.8とする。

3. 計算結果と既往の実験結果との比較

解析対象は、偏心圧縮、曲げせん断圧縮を受ける円形CFT柱とする^{8)~10)}。解析では、提案モデルと復旧仕様におけるSCモデル、RCモデルをそれぞれ用いて、変形増分法により数値計算する。表-1に最大耐力に関する計算および実験結果の比較を示す。また、図-3にM- ϕ 、P- δ 曲線の一例を示す。これらより、復旧仕様のSC、RCモデルによる耐力の計算値は、実験値に比べて最大約30%程度危険側の評価を与えるのに対して、本提案モデルによる計算結果は実験値ときわめてよく一致していることがわかる、また、最大耐力以後の変形性能についても、本提案モデルは良く追跡できていると考えられる。

表-1 最大耐力の実験値と計算値の比較

シリーズ	試験体名	寸法		軸力比 N/N ₀	鋼管				コンクリート								最大曲げ耐力			
		外径 D mm	径厚比 D/t		降伏 f _y kg/cm ²	引張 f _t kg/cm ²	圧縮 f _c kg/cm ²	ヤング率 E _c t/cm ²	実験値		提案モデル		復旧仕様(SC)		復旧仕様(RC)					
									計算値 t-m (t)	実験値 計算値	計算値 t-m (t)	実験値 計算値	計算値 t-m (t)	実験値 計算値	計算値 t-m (t)	実験値 計算値				
1	C04F5M	300	70.6	0.50	4466	5915	675	355	33.2	32.1	1.03	41.3	0.80	43.9	0.76					
	C06F5M		51.5	0.51	4285	5576	631	355	36.4	36.9	0.99	44.4	0.82	50.9	0.72					
	C08F5M		35.7	0.48	4086	5604	666		52.2	51.2	1.02	51.7	1.01	62.0	0.84					
2	EC4A4-035	150	50.7	0.35			407	310	3.3	3.3	1.00	3.5	0.93	3.8	0.88					
	EC4C2-035	300	101.4	0.35	2890	4160	250	243	13.1	12.9	1.01	15.8	0.83	16.8	0.78					
	EC4D4-04	450	152.0	0.40			407	310	41.8	41.0	1.02	61.7	0.68	57.5	0.73					
3	A	700	116.7	0.50			271	259	64.0	60.9	1.05	75.8	0.84	79.4	0.81					
	B			0.51	4400	—	341	277	78.0	68.8	1.13	83.2	0.94	84.7	0.92					
	C			0.48			436	301	83.0	77.4	1.07	90.4	0.92	90.2	0.92					
	D		58.3	0.51	4000	—	264	257	115.0	105.8	1.08	113.8	1.01	124.7	0.92					

備考：シリーズ3の最大曲げ耐力は、最大水平荷重（単位：t）である。

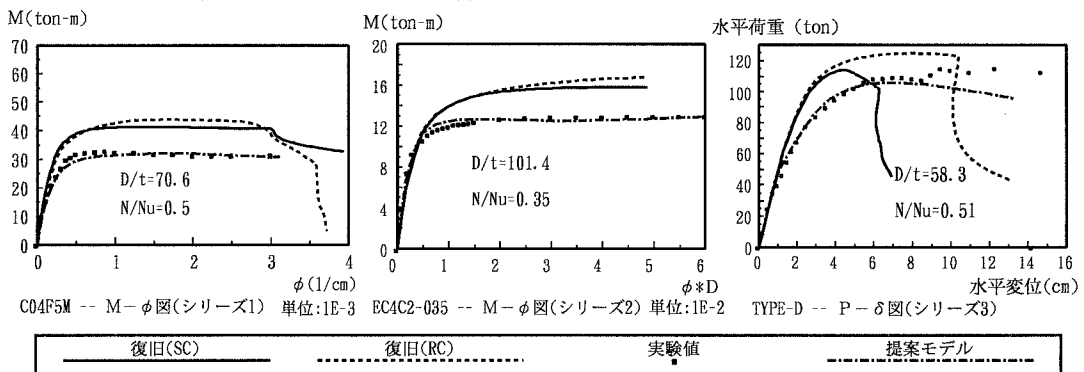


図-3 各モデルの計算結果と実験結果の比較

【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, 1987. 2)合成柱研究会:合成柱とその計算例・解説(現代工学出版, 1993. 7). 3)日本道路協会:「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995. 6. 4)唐ら:円形コンクリート充填鋼管橋脚の地震時保有耐力・変形性能調査に関する一考察, 土木学会西部支部研究発表会講演要集, 1996. 3. 5)J.B.Mander, et al.:Theoretical stress-strain model for confined concrete, ASCE, 114(8), 1988. 6)星野ら:鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, 1995. 8. 7)B.D.Scott, et al.:Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates, ACI, 1982.1. 8)Yasuo ICHINOHE, et al.:Elasto-Plastic Behavior of Concrete Filled Steel Circular Columns, Proc. of the 3th ASCCS Int. Conf. on Steel-Concrete Composite Structures, 1991.9. 9)崎野ら:コンクリート充填円形鋼管柱の純曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演要集, 1995. 8. 10)建設省土木研究所:コンクリート充填鋼管の耐荷力(その2), ISSN 0386-5878, 資料第2724号, 1988. 2