

# 論文 CFT 柱を用いた多柱式合成構造橋脚の終局耐力・変形性能の解析

黒田 一郎<sup>\*1</sup>・唐 嘉琳<sup>\*2</sup>・日野 伸一<sup>\*3</sup>・太田 俊昭<sup>\*4</sup>

**要旨**：現場施工の省力化及び耐震性の向上を目的とした新しい橋脚形式として、コンクリート充填鋼管柱(CFT柱)を用いた多柱式合成構造橋脚が提案されている。本論文は、本構造を対象として水平荷重を受けた場合の弾塑性有限要素解析を行ない、終局耐力や変形性能について検討したものである。その結果、これらの特性に及ぼす補剛支材形式やコンクリート充填高さの影響について考察した。

**キーワード**：コンクリート充填鋼管柱，多柱式合成構造橋脚，終局耐力，変形性能

## 1. はじめに

第二東名高速道路をはじめとする道路橋に対して、近年、施工の省力化、工費縮減および耐震性等の構造特性の向上を目的とした各種の橋梁上・下部工の開発が行なわれている。著者らは橋梁下部工の新しい構造形式の一つとして、コンクリート充填鋼管柱<sup>1)</sup>(以下、CFT柱)を用いた多柱式合成構造橋脚(図-1)を提案<sup>2)</sup>しており、これまで試設計等による基礎的研究を行なってきた<sup>3)</sup>。

本構造は、支柱材であるCFT柱とそれら相互を連結する補剛支材からなる立体骨組構造であり、地震時に大きな水平荷重を受けた場合に一本のCFT支柱材が最大耐力に達しても、他の支柱材に曲げモーメントが再分配され、崩壊に至るまでの優れた変形性能が期待される。しかし、本構造の崩壊に至るまでの耐力・変形挙動に関しては未だ解明されていない状況にある。

一方、鋼管による拘束効果が発揮されるCFT柱は、鋼管とコンクリートを個別に評価する累加強度式とは異なる曲げ圧縮性状を示すが、このことが本橋脚自体の耐荷性能に及ぼす影響

についても明らかにされていない。

以上の背景より、本論文では、CFT柱を用いた多柱式合成構造橋脚の終局挙動に及ぼす構造諸元の影響について解析的に検討する。具体的には、試設計で得られた本構造を対象として、終局時

に至る弾塑性有限要素解析を行ない、保有水平耐力、塑性率等の変形性能、さらにはそれらに及ぼす補剛支材等の構造諸元の影響について検討したものである。

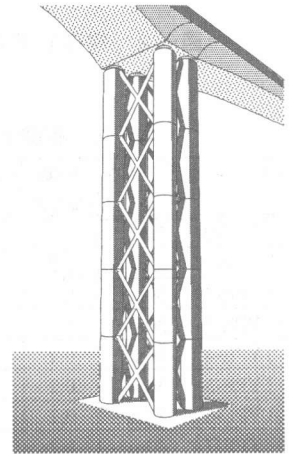


図-1 多柱式合成構造橋脚概念図

## 2. 橋脚モデルと解析の概要

解析対象とした橋脚高さ50mの多柱式合成構造橋脚モデルを図-2に示す。この橋脚モデル

\*1 防衛大学校講師 土木工学教室 博士(工学) (正会員)

\*2 株式会社マエダ 九州支社技術管理室構造設計課主任 工修

\*3 九州大学大学院助教授 工学研究科 都市システム工学専攻 工博 (正会員)

\*4 九州大学大学院教授 工学研究科 都市システム工学専攻 工博 (正会員)

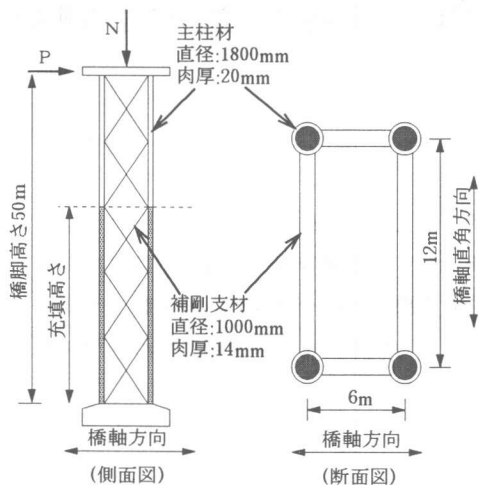


図-2 橋脚モデルの構造諸元

表-1 橋脚モデル

モデル	充填高さ	初期軸力比	補剛支材組数	補剛支材径厚比
TYPE-0	30m	0.2	5	71.4
TYPE-1	0m	0.2	5	71.4
TYPE-2	50m	0.2	5	71.4
TYPE-3	30m	0.0	5	71.4
TYPE-4	30m	0.4	5	71.4
TYPE-5	30m	0.2	3	71.4
TYPE-6	30m	0.2	4	71.4
TYPE-7	30m	0.2	5	100.0
TYPE-8	30m	0.2	5	50.0

は、3径間連続鋼トラス橋(スパン95m+120m+95m)を想定して試設計したものであり<sup>3)</sup>、主柱材はφ1800×20mmの鋼管(SKK490)を用いたCFT柱(径厚比90)であり、4本の柱を矩形配置した多柱形式となっている。主柱材中に充填するコンクリートの強度は300kgf/cm<sup>2</sup>(29.4MPa)とし、また、補剛支材としてはφ1000×14mmの中空鋼管(SKK400)を用いた。

解析パラメータとしては、

- ①コンクリート充填高さ：0,30,50m
- ②上部工死荷重による導入軸力の比 $N/N_0$ (以下、初期軸力比と称する)：0.0, 0.2, 0.4
- ③補剛支材組数：3, 4, 5組
- ④補剛支材の径厚比：100.0, 71.4, 50.0(それぞれ、肉厚10mm, 14mm, 20mm)

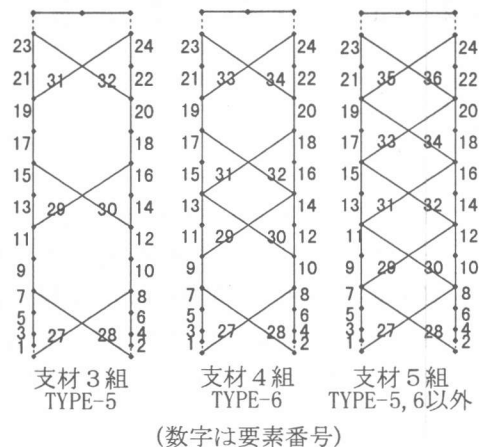
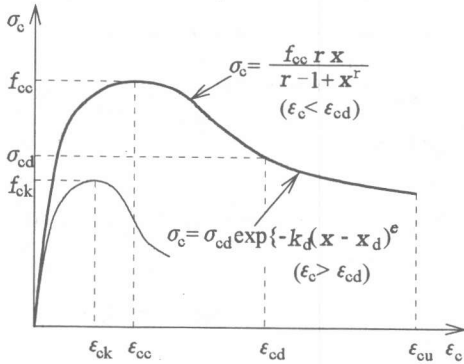


図-3 橋脚モデルとその要素番号

の4項目を採り上げた。ここで、 $N$ 、 $N_0$ はそれぞれ主柱材に作用する軸力、主柱材の最大軸力である。これらのパラメータを基に計9タイプ(表-1に示すTYPE-0~TYPE-8)の橋脚モデルを設定している。これらのモデルの補剛支材の配置を図-3に示す。なお、設計の際に用いた橋脚に作用する上部工反力は鉛直方向26,200kN(2,670tf)、水平方向7,200kN(735tf)とした。

橋脚モデル全体の解析に先立ち、CFT柱の曲げモーメント-曲率関係(以下、 $M-\phi$ 関係)を、平面保持則及びVon Misesの降伏条件の仮定の下に、断面分割、変位増分法により求めた。その際には、先に著者らが提案した拘束効果を考慮したコンクリートと鋼管の応力-ひずみ関係モデル<sup>4)</sup>を用いている。図-4(a),(b)にこれらの応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの応力-ひずみ関係モデルは二つの領域からなり、 $\epsilon_c \leq \epsilon_{cd}$ の範囲では既往の円形RC柱の実験結果に基づくManderらの提案モデルを用いるが、下降域( $\epsilon_c > \epsilon_{cd}$ )では拘束効果による緩やかな強度低下を仮定した指数関数を用いることとする。また、鋼管については、降伏以前に局部座屈が生じないように十分補強されたものと仮定し、道路橋示方書<sup>5)</sup>の規定に準拠している。

次に、全体構造の終局挙動に関する解析はは



$$\sigma_c = \frac{f_{cc} r x}{r - 1 + x^r} \quad (\epsilon_c < \epsilon_{cd})$$

$$\sigma_c = \sigma_{cd} \exp\{-k_d(x - x_d)^e\} \quad (\epsilon_c > \epsilon_{cd})$$

$x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}, \quad x_d = \epsilon_{cd} / \epsilon_{cc}, \quad r = E_{cc} / (E_{cc} - E_{cc}),$   
 $E_{cc}$ : 初期ヤング率,  $E_{cc} = f_{cc} / \epsilon_{cc},$   
 $k_d, e$ : 材料定数

図-4 (a) コンクリートの応力-ひずみ関係

り要素を用いた2次元有限要素法を用いて行なった。その際、CFT主柱材要素の曲げ剛性は上述のM-φ関係を基に算出した。非線形解析において、主柱材の断面が最大曲げ耐力に達した後には塑性ヒンジ長さ $L_p (=0.2h-0.1D)$ <sup>9)</sup>を考慮して塑性ヒンジを橋脚基部に設けた。なお、この解析においては、まず最初に死荷重による変形を求めた後に水平荷重を作用させ、死荷重によるP-δ効果を考慮した。

### 3. CFT主柱材の曲げ特性

鋼管による拘束効果を考慮した橋脚主柱材の各軸力比におけるM-φ関係を図-5に示す。曲げモーメントMが最大値M<sub>max</sub>を超えた後、曲率φの増加に従って徐々に減少していくが、その勾配は軸力が大きい程急になっている。

次に、CFT主柱材の軸力とそれに対応する曲げ耐力(終局曲げモーメント)の相関曲線(以下、N-M相関曲線)を図-6に示す。比較のために中空鋼管柱、コンクリート柱のN-M相関曲線及びそれらを累加したN-M相関曲線も併せて示す。拘束効果を考慮したN-M相関曲線では、中空鋼管柱とコンクリート柱を累加したN-M相関曲線に比べて、何れの軸力レベルにおいても曲げ耐力が大きくなっている。また、

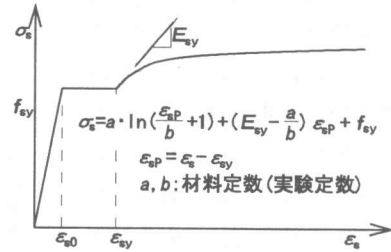


図-4 (b) 鋼材の応力-ひずみ関係

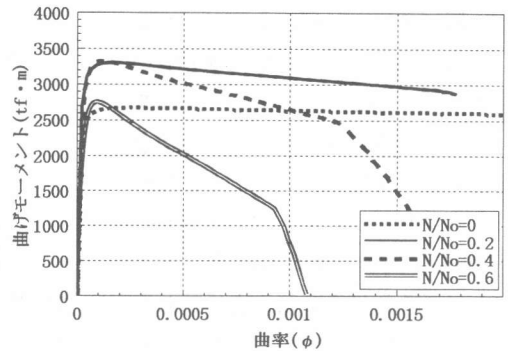


図-5 CFT柱のM-φ関係

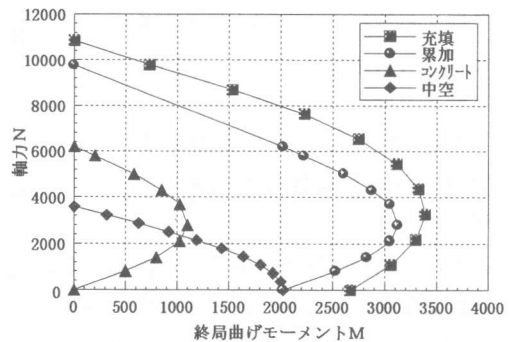


図-6 CFT柱のN-M相関関係

曲げ耐力の最大値は軸力比0.3近傍で生じる。

### 4. 多柱式合成構造橋脚の荷重-変位関係

図-7および図-8に多柱式合成構造橋脚の荷重-変位関係に及ぼすコンクリート充填高さ、補剛支材組数の影響をそれぞれ示す。図中の○印は橋脚主柱材に塑性ヒンジが発生した点を、△印は最大荷重を、□印は補剛支材の一つ

が最初に降伏する点を、×印は補剛支材の破断点を示す。各印の横の要素番号は図-3に対応している。ここで、補剛支材が降伏する点(□印)については図面が煩雑になるのを避けるため一番最初に降伏に至った補剛支材のみを図中に記している。なお、補剛支材の破断点はひずみが0.05に達した点とした。

図-7によれば、主柱材にコンクリートを充填していないTYPE-1(充填高さ0m)では最大耐力後に水平変位の伸びとともに急速に耐力を失っている。これに対し、コンクリートを部分充填したTYPE-0では最大耐力に達した後もほぼそれに近い耐力を維持したまま水平変位が増大しており、水平変位が4mに達した後に補剛支材(要素番号29及び27)が相次いで破断する度に大幅な耐力減少を来し終局状態に至っている。即ち、本論文で検討した橋脚モデルではコンクリートを部分充填したTYPE-0が最も良好な変形性状を示している。

次に、補剛支材組数が荷重-変位関係に及ぼす影響を比較した図-8を見れば、橋脚の全高にわたって補剛支材を配したTYPE-0が最も大きな耐力を示しており、補剛支材組数が少なくなるほど耐力は著しく減少し、また主柱材の塑性ヒンジ発生よりも補剛支材の降伏が先行する傾向を示している。

### 5. 最大耐力、塑性率の検討

表-2に各橋脚モデルの最大耐力  $P_{max}$ 、塑性率  $\mu_{95}$  を示す。最大耐力は設計震度に換算した値と、初期降伏耐力  $P_y$  で除した値も併せて示している。また、塑性率  $\mu_{95}$  は次の式で求め

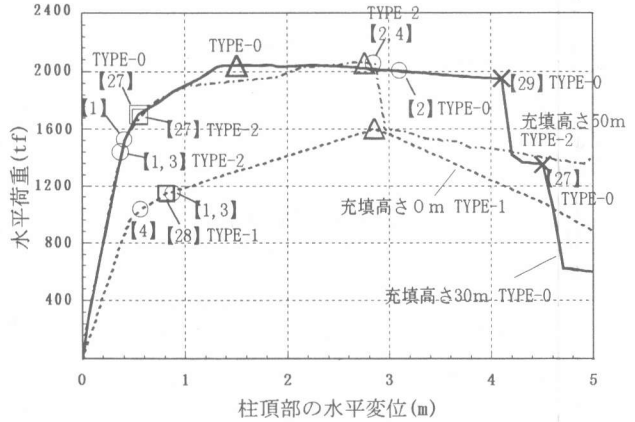


図-7 水平荷重-変位関係 (コンクリート充填高さの影響)

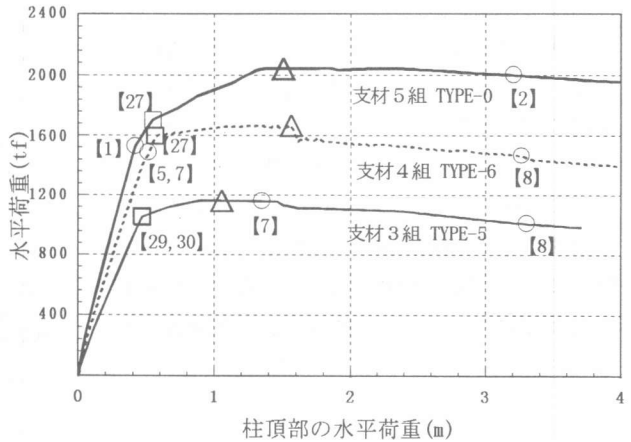


図-8 水平荷重-変位関係(補剛支材組数の影響)

た。

$$\mu_{95} = \delta_{95} / \delta_y \quad (1)$$

ここで、 $P_y$ は何れかの主柱材または補剛支材が、最大曲げモーメントに達したとき若しくは軸力で降伏したときの水平荷重とし、 $\delta_y$ はその時の変位である。また、 $\delta_{95}$ は最大耐力  $P_{max}$  の95%まで荷重が減少したときの変位である。

表-2によれば、多くの橋脚モデルにおいて、設計震度換算で約0.27以上の最大耐力を有している。各パラメータの影響について検討すれば、コンクリート充填高さが高い程、補剛支材組数が多い程、補剛支材の径厚比が小さい程(補剛

表-2 最大耐力と塑性率

諸元		橋脚モデル	最大耐力 $P_{max}$ (tf)*	最大耐力 (設計震度換算)	$P_{max}/P_y$	塑性率 $\mu_{95}$
N/No=0.2 支材 5 組 径厚比 71.4	充填高さ 0m	TYPE-1	801	0.218	1.55	5.65
	充填高さ 30m	TYPE-0	1020	0.278	1.34	10.02
	充填高さ 50m	TYPE-2	1031	0.281	1.44	7.79
充填高さ 30m 支材 5 組 径厚比 71.4	N/No=0.0	TYPE-3	1063	0.289	1.65	7.38
	N/No=0.2	TYPE-0	1020	0.278	1.34	10.02
	N/No=0.4	TYPE-4	1010	0.275	1.27	6.31
充填高さ 30m N/No=0.2 径厚比 71.4	支材 3 組	TYPE-5	580	0.158	1.00	5.13
	支材 4 組	TYPE-6	826	0.225	1.11	6.29
	支材 5 組	TYPE-0	1020	0.278	1.34	10.02
充填高さ 30m N/No=0.2 支材 5 組	径厚比 100.0 (肉厚 10mm)	TYPE-7	777	0.211	1.08	6.40
	径厚比 71.4 (肉厚 14mm)	TYPE-0	1020	0.278	1.34	10.02
	径厚比 50.0 (肉厚 20mm)	TYPE-8	1053	0.287	1.46	7.32

\*1.0tf=9.8kN

支材の肉厚が大きいく程), 最大耐力は大きな値となっているが, コンクリート充填高さと補剛支材径厚比に関してはこれらのパラメータをこれ以上変化させても最大耐力は頭打ちの傾向となる。また, 初期軸力比が最大耐力(設計震度換算)に与える影響は小さい。

一方, 各パラメータと塑性率  $\mu_{95}$  との関係に注目すれば, N/No=0.2の場合,

- (i) コンクリートは30m部分充填した方が,
- (ii) また, 補剛支材は全高にわたって連続的に配置する方が,
- (iii) さらに, 補剛支材の径厚比は70程度にする方が,

それぞれ大きな塑性率を確保できることがわかる。今回対象とした橋脚モデルの中では, TYPE-0(コンクリート充填高さ30m・初期軸力比N/No=0.2・補剛支材組数5組・補剛支材径厚比71.4(肉厚14mm))の橋脚モデルが最も大きな塑性率を有している。

次に, 各パラメータと最大耐力及び塑性率との関係について更に詳しく検討する。

表-2中の初期軸力比N/Noと最大耐力  $P_{max}$

及び塑性率  $\mu_{95}$  との関係に注目すれば, 初期軸力比N/No=0.2の橋脚モデルが最も良好な結果を得ている。一方, 図-6に示すCFT柱のN-M相関関係では, 軸力比0.3前後でCFT主柱材の曲げ性能は最高となり, 軸力比が0.4を上回ると最大曲げモーメントは急速に減退している。これらより, 主柱材の曲げ性能が最も発揮できる軸力比が, 上部工死荷重による初期軸力比に近くなるように設計することによって優れた耐荷特性と靱性を保有できると言える。

次に, 補剛支材の径厚比に注目すれば径厚比71.4(肉厚14mm・TYPE-0)の場合に塑性率  $\mu_{95}$  が最も大きくなっており, 肉厚を20mmまで増厚し径厚比を50.0(TYPE-8)とすると塑性率  $\mu_{95}$  は約25%減少する。この現象を次のように説明する。すなわち, 橋脚モデルTYPE-8(径厚比50.0)では補剛支材の径厚比が小さくなることによって主柱材と比較した補剛支材の剛性が大きくなり, トラス構造のように軸力が卓越した状態に近づく。そのため水平荷重が作用した際に橋脚基部の圧縮主柱材の軸力増加量が大きくなる。軸力が増加することによって, その圧縮主柱材

の曲げ性能が低下し、橋脚全体の變形性能の低下に繋がる。その証拠に図-9に示されている補剛支材径厚比(肉厚)に着目した荷重-変位関係(凡例等は図-7および図-8と同じ)を見れば、補剛支材の径厚比50.0(肉厚20mm)のTYPE-8モデルでは他のモデルに比べて、変位がかなり小さな段階で圧縮側基部の主柱材(要素番号【2】)に塑性ヒンジが発生している。このことより、補剛支材肉厚をいたずらに大きくすると(径厚比を小さくすると)、圧縮主柱材の曲げ性能を低下させることになり、かえって橋脚としての性能を損なう恐れがあることが明らかである。

## 6. まとめ

本研究では、鋼管による拘束効果を考慮したCFT柱の $M-\phi$ 関係を求め、それを用いて橋脚高さ50mの多柱式合成構造橋脚の終局時に至る弾塑性有限要素解析を行ない、最大耐力、塑性率等の變形性能に及ぼす構造諸元の影響について検討したものである。本研究の結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 主柱材にコンクリートを30m程度充填し補剛支材を橋脚の全高にわたって配する構造が變形性能の上で優れている。
- (2) 試設計されたCFT主柱材断面に対して、コンクリートの拘束効果を考慮した $N-M$ 相関曲線より、曲げ耐力の最大値は $N/No=0.3$ 近傍で生じることがわかった。
- (3) 最大耐力 $P_{max}$ に及ぼす各パラメータの影響について検討したところ、コンクリート充填高さが高い程、補剛支材組数が多い程、補剛支材径厚比が小さい程、最大耐力 $P_{max}$ は大きな値となる。
- (4) 塑性率 $\mu_{ps}$ については、 $N/No=0.2$ の場合、コンクリートを部分充填する場合、全高にわたっ

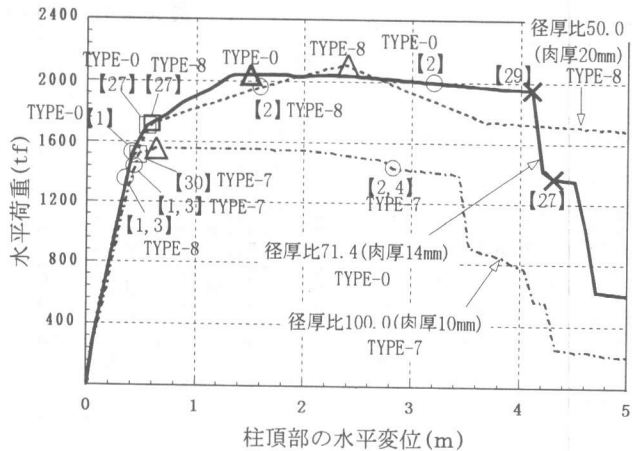


図-9 水平荷重-変位関係  
(補剛支材径厚比(肉厚)の影響)

て径厚比70程度の補剛支材を配した場合、大きな塑性率を確保できる。

(5) 主柱材の曲げ性能が最もよく発揮される最適な軸力比を主柱材に与えるように設計することにより優れた靱性を保有することが可能である。

## 参考文献

- 1) 例え、加藤勉：曲げと圧縮を受けるコンクリート充填鋼管柱の耐力、變形性能、建築学会構造系論文集、No.477, pp.157-166, 1995.11
- 2) 太田俊昭, 日野伸一, 黒田一郎, 唐嘉琳, 奥田秀樹, 志々田武幸：コンクリート充填鋼管を用いた多柱式合成高橋脚の力学特性, 九州大学工学集報, Vol.69, No.1, pp.35-42, 1996.1
- 3) 例え、志々田武幸, 唐嘉琳, 太田俊昭, 日野伸一, 三原徹治：コンクリート充填鋼管を用いた多柱式合成高橋脚の最適設計法の開発, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.1, 1996.9
- 4) 唐嘉琳, 日野伸一, 黒田一郎, 太田俊昭：コンクリート充填円形鋼管柱を対象とした鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化, 鋼構造論文集, Vol.3, No.11, pp.35-46, 1996.9
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書(V耐震設計編), 丸善, 1996.