

論文 コンクリート充填鋼管を用いた多柱式合成構造橋脚の動的応答解析

松田 泰治*1・日野 伸一*2・太田 俊昭*3・山根 立行*4

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を提案し、これまで各種の構造パラメータが本構造の終局耐力や変形性能に及ぼす影響を解析的に検討してきた。本研究は、それらの成果を踏まえて、静的弾塑性解析および動的応答解析より得られた知見に基づき本構造の耐震性に関わる基本性能を比較検討したものである。

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. まえがき

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¹⁾(以下、CFT柱)を用いた多柱式合成構造橋脚(図-1)を提案し²⁾、これまでに試設計および静的弾塑性解析等による基礎的検討を行なってきた³⁾。その結果、多柱式合成構造橋脚では、主柱材であるCFT柱とそれら相互を連結する補剛支材が立体骨組構造を形成し、地震時に大きな水平荷重を受けた場合に一本のCFT主柱材が最大耐力に達しても、他の主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を示す可能性が指摘された。しかし、大地震に対する耐震性能を精度良く評価するにあたって、本構造の崩壊に至るまでの耐力や変形性能の評価に関する検討が十分になされているとは言いがたい。まして、実際の動的な地震力を受けた場合の本構造の挙動については未解明であり、実用化のため早急な検討が望まれている。

以上の背景より、本論文では、CFT柱を用いた多柱式合成橋脚の終局挙動に及ぼす主柱材のコンクリート充填高さの影響について、弾塑性有限要素解析および動的応答解析を行い、本構造の耐震性に関わる耐力、変形性能、振動特

性等の基本性能を比較検討し総合評価を行った。

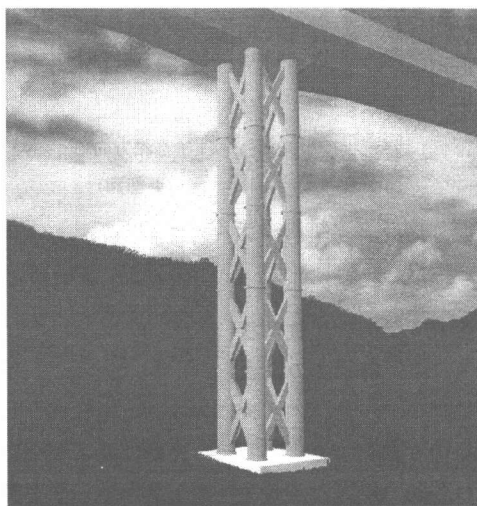


図-1 多柱式合成橋脚の概念図

2. 対象とする橋脚モデル

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る³⁾。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

*1 九州大学大学院助教授	工学研究科建設システム工学専攻	工博 (正会員)
*2 九州大学大学院助教授	工学研究科都市環境システム工学専攻	工博 (正会員)
*3 九州大学大学院教授	工学研究科都市環境システム工学専攻	工博 (正会員)
*4 (株)建設技術研究所	東京支社(当時, 九州大学大学院)	工修

るコンクリートの強度は29.4MPaとし、また、補剛支材としては $\phi 1000 \times 14\text{mm}$ の中空鋼管(SKK400)を用いた。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26.2MN、水平方向7.2MNとした。

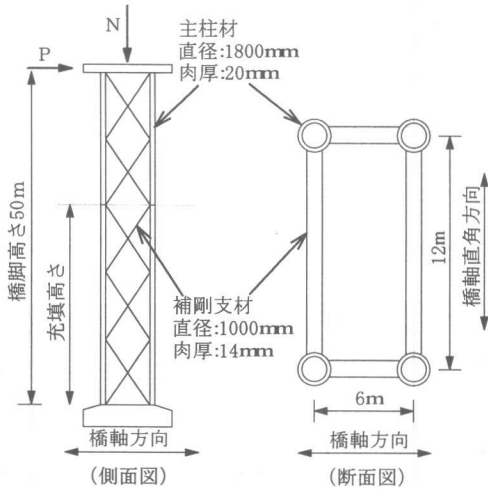


図-2 橋脚モデルの構造諸元

3. 静的弾塑性解析

3.1 解析法の概要

橋脚モデル全体の解析に先立ち、主柱材として用いる鋼管のコンクリート充填部および中空部の各軸力比に対する曲げモーメント-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(図-3、図-4)。

次に、全体構造の終局挙動に関する解析は、はり要素を用いた2次元有限要素法を用いて行なった。その際、各主柱材要素の軸力変動による曲げ剛性の変化は、図-5に示すように、上述の $M-\phi$ 関係を基に変化後の軸力に相当する $M-\phi$ 関係にシフトすることによって、近似的に算出した。ま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塑性ヒンジが発生するものとし、さらに塑性ヒンジ長さ $L_p(=0.2h-0.1D)^5$ を考慮して橋脚基部に塑性ヒンジ要素を設けた。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 $P-\delta$ 効果を考慮した。

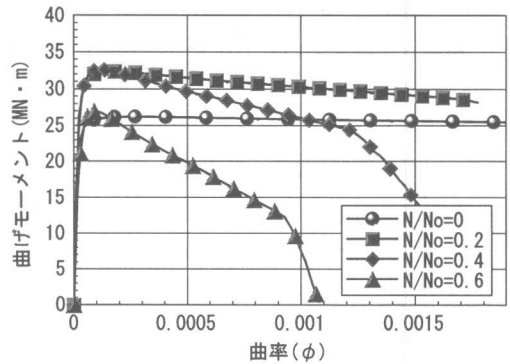


図-3 主柱(充填部)の $M-\phi$ 関係

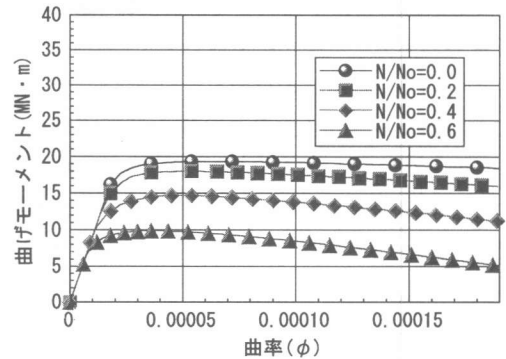


図-4 主柱(中空部)の $M-\phi$ 関係

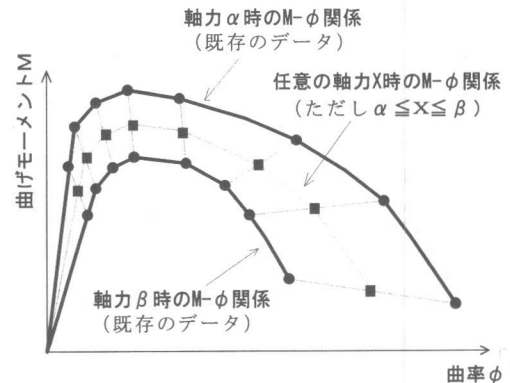


図-5 任意の軸力における $M-\phi$ 関係

3. 2 静的弾塑性解析の結果および考察

図-5に本構造の荷重-変位関係に及ぼすコンクリート充填高さの影響を示す。図中の●印は橋脚支柱材に塑性ヒンジが形成された点を、▲印は最大耐力を、■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。各印の横の番号は図-7の破壊箇所に対応している。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点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-6によれば、支柱材にコンクリートを充填していない充填高さ0mのケース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30m充填したケース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、その後、補剛支材の破断にともない終局状態に至っている。また充填高さ50mのケースでは、最大耐力に至るまでの挙動は充填高さ30mのケースと類似しているが、最大耐力到達後すぐに塑性ヒンジが形成され急激に耐力を失っている。静的弾塑性解析による破壊プロセスを詳細に比較すると、充填高さ50mでは最終的に支柱材の基部に荷重が集中するのに対し、充填高さ30mでは支柱材の充填部と中空部の剛性の不連続により支柱材と補剛支材にバランス良く荷重

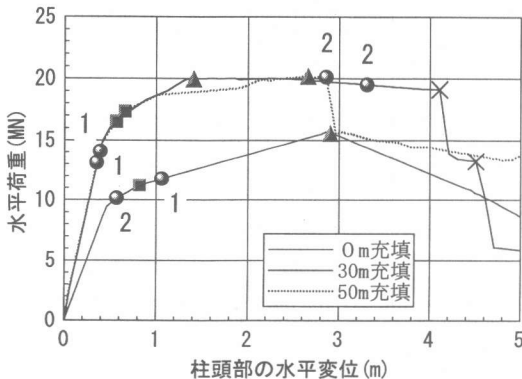


図-6 水平荷重-変位関係
(コンクリート充填高さの影響)

が再分配され、その結果として優れた変形性能を有することが判明した。

以上の解析結果の、各供試体の耐荷力および変形性能を定量的に評価すると、表-1のとおりである。ここでは変形性能すなわち塑性率を $\mu_{95} = \delta_{95} / \delta_y$ で評価するものとする。なお P_y , δ_y は何れかの支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柱頭部の水平変位および水平荷重である。また δ_{95} とは、最大水平耐力 P_{max} の95%の荷重に対応する変位である。

表-1によれば、最大耐力はわずかに充填高さ50mのケースが充填高さ30mのケースより優れているが、変形性能すなわち塑性率 μ_{95} においては充填高さ30mのケースが極めて優れていることがわかる。

よって、ここで検討した橋脚モデルではコンクリートを30m程度充填したケースが最も良好な変形性状を示していると言える。

表-1 最大耐力と塑性率

諸元	最大耐力		塑性率
	P_{max} (MN)	δ_{max}	μ_{95}
充填高さ0m	15.70	2.85	5.65
充填高さ30m	19.99	1.36	10.02
充填高さ50m	20.21	2.66	7.79

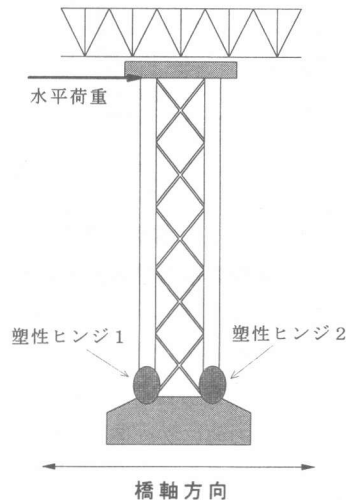


図-7 破壊箇所

4. 動的応答解析

4. 1 解析法の概要

図-2に示した橋脚モデルに対して動的応答解析を行った。解析ケースは静的弾塑性解析と同様にコンクリートの充填高さをパラメータとし、充填高さ0m(CASE1)、充填高さ30m(CASE2)、充填高さ50m(CASE3)の3ケースである。モデル化では主柱材を3次元のはり要素、補剛支材を3次元のトラス要素とし、主柱下端は完全固定とし基礎及び地盤は考慮していない。主柱頂部4接点は剛結合とし、上部構造質量を集中質量で与えた。減衰はコンクリート充填部を5%、中空鋼管部を3%、補剛支材を3%としてひずみエネルギー比例型減衰で考慮した。解析に用いた入力地震動は本構造がI種地盤を対象に試設計されたことを考慮して道路橋示方書の標準波よりI種地盤のType IとType IIをそれぞれ一波選択した。解析にあたってはまず死荷重を与えた後、時刻歴応答解析を行った。死荷重によるP- δ 効果は考慮していない。積分手法はニューマークの β 法($\beta=1/4$)を用い、時間刻みは0.001秒とした。図-8に解析モデルを示す。

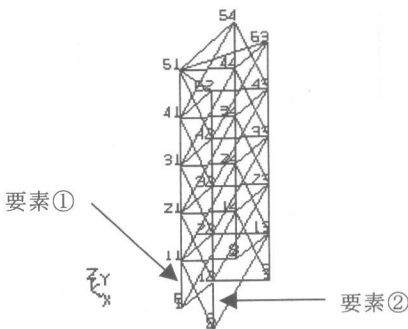


図-8 解析モデル

4. 2 動的応答解析結果および考察

固有値解析より得られた充填高さ50mのケースの橋軸方向(X方向)の1次および2次モードを図-9に示す。有効質量比は1次が85%で2次が10%である。その他のケースについても2次モードまでの有効質量比は90%以上となっている。橋軸直角方向(Y方向)およびその他のケースの固有値解析結果をまとめて表-2に示す。充填高

さ0m(CASE1)ではコンクリートの質量低減効果が比べ剛性低減効果が顕著に現れており充填有りのCASE2およびCASE3に比べ1次固有周期が長い。充填有りのCASE2とCASE3では充填高さの差異の影響は固有周期には顕著に現れていない。

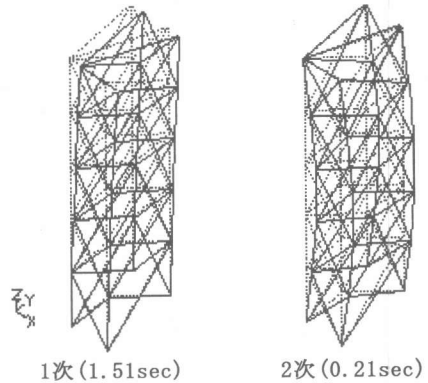


図-9 橋軸方向(X方向)の固有モード
(充填高さ50m)

表-2 固有周期一覧

	橋軸方向		橋軸直角方向	
	1次	2次	1次	2次
CASE1 充填0m	2.34 (0.95)	0.16 (0.03)	1.60 (0.96)	0.20 (0.01)
CASE2 充填30m	1.51 (0.84)	0.21 (0.10)	1.33 (0.87)	0.25 (0.08)
CASE3 充填50m	1.51 (0.85)	0.21 (0.10)	1.39 (0.88)	0.26 (0.07)

() 内は有効質量比, 単位: sec

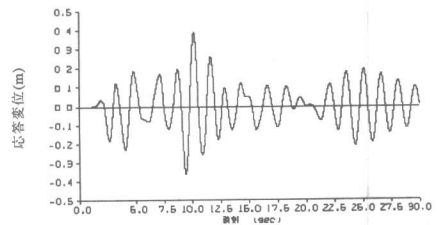


図-10 主柱頂部の応答変位

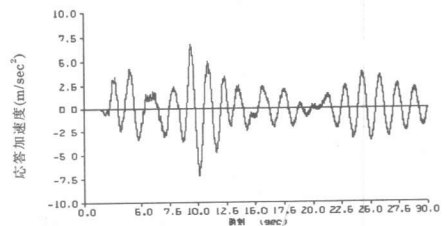


図-11 主柱頂部の応答加速度

動的応答解析を実施するにあたり最初に静的弾塑性解析より得られた各軸力 N に対する $M-\phi$ 関係より、主柱基部の非線形3次元はり要素に対して $N-M$ 相関を考慮したモデルを組み込んだ。CASE3に対して試算を行った結果、Type1およびType2の地震動入力に対して主柱基部のはり要素が引張耐力に達することが判明した。このため、非線形はり要素を線形はり要素に置換して今回の検討を行った。例としてCASE3のType I 地震動入力時の主柱頂部の質点の応答変

位を図-10に、応答加速度を図-11に示す、図-12~図-15には主柱基部のはり要素の軸力、曲げモーメントの時刻歴を示す。また、全ての解析ケースに対して応答最大値を整理したものを表-3に示す。

充填高さ0m(CASE1)では1次固有周期が2.34秒と長い場合長周期成分を多く含んだType1の入力に対して応答が増大している。主柱頂部においては最大で0.83mの変位と 5.7m/sec^2 の加速度が生じており、変位は他のケースの最大変位

表-3 最大応答値一覧

応答種別		CASE1 充填0m		CASE2 充填30m		CASE3 充填50m		
		Type1	Type2	Type1	Type2	Type1	Type2	
主柱 頂部	変位 (m)	0.83	0.39	0.39	0.35	0.39	0.36	
	加速度 (m/sec^2)	5.71	2.69	6.73	6.38	7.15	6.84	
主柱 基部	軸力 (MN)	圧縮	61.5	31.9	78.5	71.0	87.6	80.5
		引張	48.5	18.9	61.0	53.5	68.1	60.9
	曲げモーメント ($\text{MN}\cdot\text{m}$)	13.6	7.02	3.39	3.24	3.77	3.49	

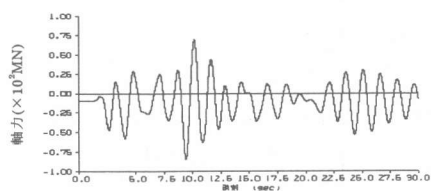


図-12 主柱基部の軸力 (要素①)

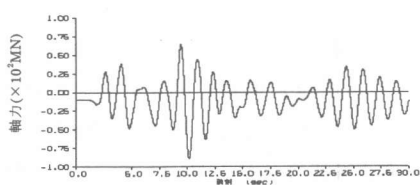


図-13 主柱基部の軸力 (要素②)

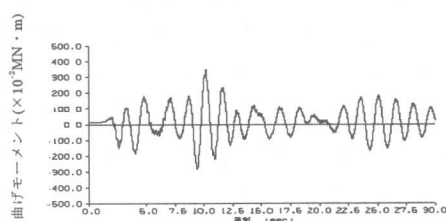


図-14 主柱基部の曲げモーメント
(要素①)

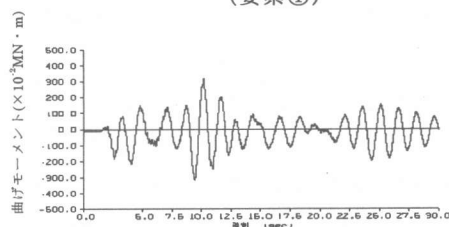


図-15 主柱基部の曲げモーメント
(要素②)

の2倍程度となっている。Type2の入力に対しては逆に長周期であるために一種の免震効果が現れ応答加速度 2.7m/sec^2 程度と他のケースに比べ低減している。主柱基部に着目するとType1の入力に対して圧縮及び引張軸力がそれぞれ圧縮耐力(34.9MN)と引張耐力(35.1MN)に達している。充填高さ30m(CASE2)ではType1およびType2の入力に対して応答はほぼ同程度であり、主柱頂部の応答変位は最大で0.4m程度となっている。また応答加速度は $6\sim 7\text{m/sec}^2$ 程度である。主柱基部ではType1およびType2の入力に対して引張軸力が引張耐力(35.1MN)に達している。圧縮軸力は78.5MNで圧縮耐力(106.2MN)に対してまだ余裕がある。充填高さ50m(CASE3)は充填高さ30m(CASE2)とほぼ同様の応答性状を示している。これは固有値解析結果からも分かるように20mの充填高さの差異が低次の振動特性にあまり影響しなかったためと考えられる。ただし、詳細に比較すると、コンクリートの充填により頂部の質量が増加しトップヘビーとなったCASE3では、地震時の慣性力の増加により応答が増大し、CASE2に比べ耐震性が劣っている。主柱頂部の応答変位は最大で0.4m程度、応答加速度は 7m/sec^2 程度である。主柱基部ではCASE2同様Type1およびType2の入力に対して引張軸力が引張耐力(35.1MN)に達している。圧縮軸力は87.6MNとなっている。三者を比較すると、充填高さ0m(CASE1)では補剛支材による剛性付加のみでは系の長周期化は避けられず応答変位の増大を招いている。また、線形応答解析の結果、主柱基部で部材が圧縮及び引張耐力に達するため何らかの設計上の配慮が必要と考えられる。充填高さ50m(CASE3)と充填高さ30m(CASE2)では過大な変位は生じていない。ただし同様に主柱基部で部材が引張耐力に達するため何らかの対策が必要となる。耐震性を考慮した構造的な検討として解析結果よりCASE2はCASE1やCASE3に比べ終局に対する余裕度が相対的に大きいと判断される。

5. まとめ

高さ50mのコンクリート充填鋼管柱を用いた多柱式合成橋脚の耐震性に関して静的弾塑性解析及び動的応答解析を実施して構造に関する基礎的な比較検討を行った。今回解析を行った範囲で得られた主要な知見をまとめると以下のとおりである。

- ・静的弾塑性解析の結果より、主柱材に30mコンクリートを充填した構造は充填しないものや50mまで充填したものに比べ変形性能において優れている。
- ・静的弾塑性解析の結果、変形性能に優れると判断された充填高さ30m(CASE2)の構造は線形動的応答解析においても他の構造に比べ耐震性が優れている。

今後は曲げや引張に対する主柱基部の部材の非線形性を考慮するとともに主柱の配置、補剛支材の配置、コンクリート充填高さ等を更に詳細に検討して、合理的な構造選択に寄与する予定である。

参考文献

- 1) 例えば、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、変形性能、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) 例えば、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柱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.