

コンクリート部分充填円形断面橋脚における高軸力比が耐震性能に与える影響

名古屋工業大学 正会員 ○海老澤健正

名古屋工業大学 フェロー会員 後藤 芳顕

株式会社横河ブリッジ 正会員 金井 宏英

1. まえがき：繰り返し水平荷重を受ける無充填の鋼製橋脚では、ポストピーク領域において局部座屈変形が進むため、水平復元力も大きく低下する。この傾向は鋼管の軸力比 P/P_y (P_y ：鋼断面の降伏軸力) が大きいほど顕著であり、耐震性能が著しく低下することが知られている。一方、充填コンクリート上面位置にダイヤフラムを設けたコンクリート部分充填鋼製橋脚(CFT 橋脚)については、精密な FEM 解析^{1,2)}により軸力比が耐震性能に及ぼす影響について検討した結果、軸力比が増加しても大部分の圧縮力はダイヤフラムを介して充填コンクリートに伝達されるため、局部座屈を進展させる鋼管圧縮軸力の大きな上昇に直接つながらないことが明らかになった。さらに、充填コンクリート断面に作用する圧縮力が上昇することで、水平ひび割れ面の接触する圧縮領域が増加し、CFT 橋脚の強度・剛性が向上しうること示された³⁾。以上のように CFT 橋脚は高圧縮軸力の場合も優れた耐震性能を持つことが数値計算により示されたが、ここでは、さらに実験と数値解析により詳細に検証した結果を報告する。

2. 繰り返し載荷実験と供試体：円形断面 CFT 橋脚の変形性能に与える軸力比の影響を検討するために、過去の実験²⁾で用いた平均的な軸力比 $P/P_y = 0.15$ の場合に加えて高軸力比の場合として $P/P_y = 0.30$ を検討対象とした。CFT 橋脚の供試体はコンクリート充填部の鋼管の径厚比パラメータが $R_t = 0.09$ となるように板厚を 4mm に切削することを目標とした。また、コンクリート無充填部で局部座屈が発生しないように充填部の高さは $2D_s$ を目標値とした。供試体の概要を図 1 に、諸元を表 1 に示す。繰り返し載荷プログラムについては図 2 に示す螺旋載荷を用いた。

3. FEM モデル：実験を検証しかつ補間するために著者らが提示した高精度有限要素モデル^{1,2)}を用いた ABAQUS による CFT 橋脚の解析も併用する。鋼管は厚肉シェル要素 S4R で表し、構成則には三曲面モデルを用いる。一軸引張試験に基づく真応力-対数ひずみ関係を図 3 に、繰り返しの材料パラメータ値を表 2 に示す。充填コンクリートはソリッド要素 C3D8R で表し、構成則には損傷塑性モデルを用いる。損傷塑性モデルによる構成則では①ヤング率、ポアソン比、②圧縮側の相当応力-相当塑性ひずみ関係、③引張側の相当応力-相当塑性ひずみ関係、④ダメージパラメータと相当塑性ひずみの関係、⑤材料パラメータ $\psi, e, \sigma_{b0}/\sigma_{c0}, K_c$ を規定する必要がある。①と②については一軸圧縮試験により、図 4 のように応力-ひずみ関係とパラメータの値を設定した。③については引張り強度を割裂引張試験により定め、軟化時の負勾配については数値解が得られる範囲で最大の勾配を設定した。④、⑤については文献 1) の値を使用するが、膨張角 ψ については螺旋載荷実験とのキャリブレーションにより決定した。上

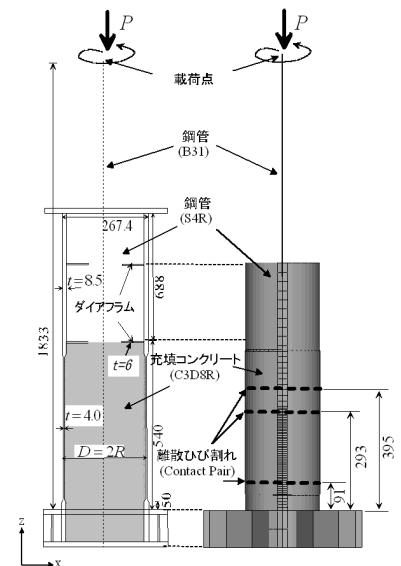


図 1 実験供試体

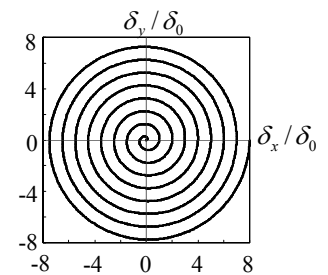


図 2 載荷パターン

表 1 供試体諸元

供試体	h (mm)	D_s (mm)	t (mm)	R_t	P/P_y	H_0 (kN)	δ_0 (mm)
高軸力 CFT	1833	262.90	4.22	0.088	0.30	33.93	8.85
平均的軸力 CFT	1833	261.90	3.96	0.094	0.15	38.87	9.88

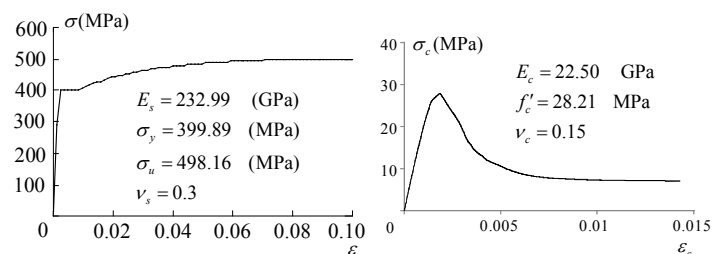


図 3 鋼材の真応力-対数ひずみ関係 一軸圧縮応力-ひずみ関係

表 2 三曲面モデルパラメータ

f_b/σ_y	β	κ	ρ
0.38	150	2	2

表 3 損傷塑性モデルパラメータ

ψ	e	σ_{b0}/σ_{c0}	K_c
10°	0.2	1.10	0.70

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL052-735-5021 FAX052-735-5563

キーワード コンクリート充填, 鋼製橋脚, 軸力, 水平 2 方向荷重, 繰り返し載荷実験, FEM 解析

記による損傷塑性モデルの材料パラメータを表 3 にまとめる。充填コンクリートにおける水平ひび割れの開閉挙動を表すための離散ひび割れについては、文献 2) と同様に手法で図 1 のように必要本数 3 本と挿入箇所を決定した。鋼管と充填コンクリート界面では接触・離間・滑りの挙動を考慮した。接触・離間はコンタクトペアで、接触時の界面摩擦挙動は摩擦係数を 0.2 としたクーロン摩擦モデルで表す。

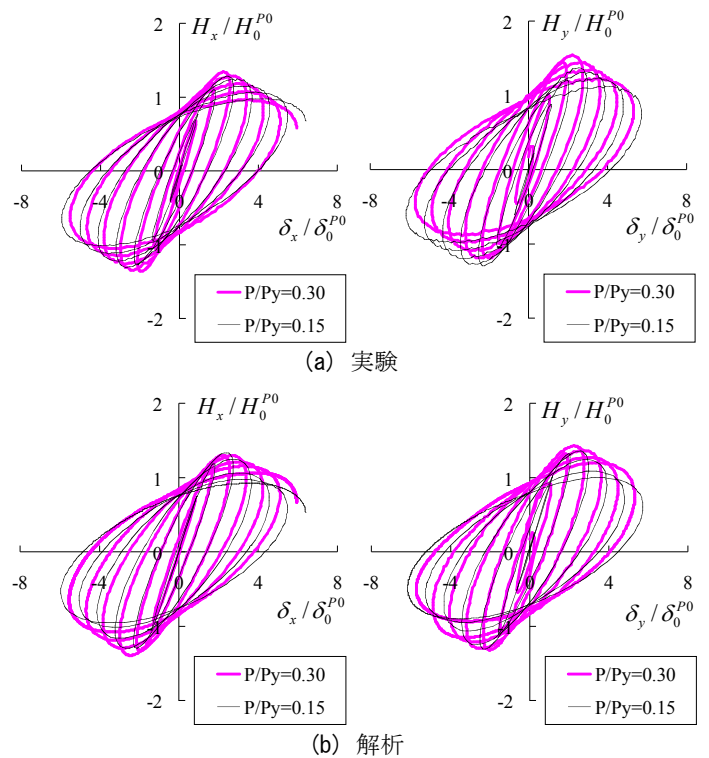
4. 軸力比が CFT 橋脚の耐震性能に及ぼす影響：軸力比の異なる CFT 橋脚供試体に対する繰り返し載荷実験結果として、水平方向成分に関する履歴挙動を図 5 に示す。これらの図には FEM モデルによる結果も示している。また、比較のために、対応する無充填鋼製橋脚の履歴挙動も FEM モデルにより計算し結果を図 6 に示す。図 5 からわかるように軸力が $P/P_y = 0.30$ の場合の実験による履歴ループの包絡線は $P/P_y = 0.15$ の場合に較べて、より高い復元力を示すとともにほぼ等しい軟化勾配を示す。解析でも軟化勾配が軸力比の大きい場合の方がやや緩やかになっている以外は実験と同様の傾向を示している。このように CFT 橋脚では軸力比の増加により耐震性能が向上することが確認できる。一方、無充填の場合は図 6 より、軸力比の上昇で顕著な耐力低下と軟化勾配の増大が生じ、耐震性能が大幅に低下する。以上から、少なくともここで検討した程度の高軸力が作用する場合には CFT 橋脚の適用は非常に有利であることがわかる。

5. 充填コンクリートに作用する圧縮応力：高軸力が作用する場合、軸力の多くの部分は充填コンクリートにより支持される。そこで、軸力比が $P/P_y = 0.15$ から 0.30 へ上昇した場合の充填コンクリートに作用する圧縮応力の変化を検討する。水平荷重がほぼ最大となる振幅 $5\delta_0$ において、橋脚基部の水平ひび割れ位置におけるの充填コンクリートに作用する鉛直方向の圧縮応力分布を FEM 解析で算定し、単軸圧縮強度で無次元化して図 7 に示す。この図より軸力比が大きい場合の方がコンクリートに作用する圧縮応力はやや低減されている。これは、高軸力の場合には図 7 の圧縮応力分布からわかるように水平ひび割れの接触面積が増大するので、軸力は増加しても応力レベルでは低下するものと考えられる。このようなひび割れ面の接触挙動より、軸力比が増加しても充填コンクリートは必ずしも圧壊しやすくなるとは言えない。

6. まとめ：対象とした円形断面部分充填 CFT 橋脚モデルの範囲であるが $P/P_y = 0.3$ 程度の高軸力が作用する場合においては、これより低い $P/P_y = 0.15$ の場合よりも優れた耐震性能を持つことが実験により明らかになった。このような無充填橋脚と全く逆の現象が CFT 橋脚で生じる原因についても解析により考察した。本検討結果は、極端に細長比が大きい場合を除いて、高軸力が作用する橋脚へ CFT 構造を用いることで安全性を確保しつつ大幅にコストの縮減が可能になることを示唆している。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 24656279(研究代表者：後藤芳顯)による助成を受けたものである。

参考文献：1)後藤芳顯ら，土木学会論文集 A，Vol.65，No.2，pp.487-504，2009．2) 後藤芳顯ら，土木学会論文集 A1，Vol.69，No.1，pp.101-120，2013．3) P. K. Ghosh, et. al. : *Proc. of ASEMII+*, pp.5460-5471, 2011.



(H_0^{P0} , δ_0^{P0} は $P/P_y = 0$ のときの降伏水平力，降伏水平変位)

図 5 水平方向履歴挙動(CFT 橋脚)

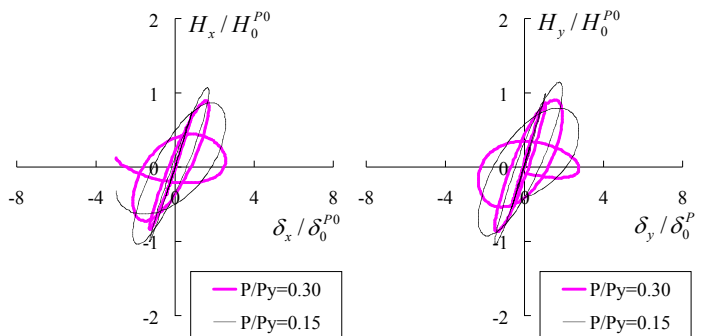


図 6 水平方向履歴挙動(無充填橋脚)

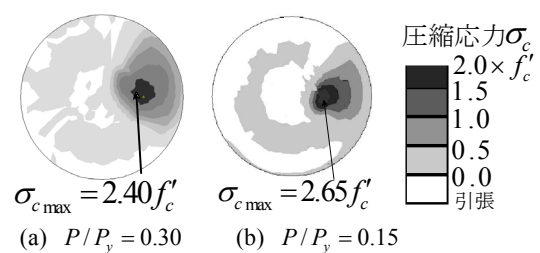


図 7 充填コンクリートの軸圧縮応力分布