

繰り返し荷重下のコンクリート充填矩形断面鋼製橋脚の耐荷機構に関する考察

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○水野 貢介
名古屋工業大学大学院 フェロー会員 後藤 芳顕

1.はじめに：中空鋼管の内部にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼製橋脚はダイヤフラムと鋼管に拘束された充填コンクリートの圧縮強度向上による合成効果と充填コンクリートによる鋼管の局部座屈防止効果などにより，高い強度と変形能を有することが繰り返し実験などにより確認されている．しかしながら，繰り返し実験における詳細な計測データがないことと精密な解析法が開発されていないこともあり，その耐荷メカニズムについては十分に明らかにされていない．すでに著者らは繰り返し荷重下の解析には精密な解析法として ABAQUS¹⁾を用いることを前提に鋼管の構成則として 3 曲面モデルを導入したシェル要素 (S4R)，充填コンクリートの構成則として損傷塑性理論を用い，仮想ひび割れを導入したソリッド要素 (C3D8R)，さらに鋼管とコンクリート界面の接触・離間挙動や接触時の摩擦挙動を表すためにコンタクトペアを用いた FEM 解析手法を提案している^{2,3)}．この解析法によると繰り返し荷重下の挙動を安定して解析できるとともに，実験で得られている充填コンクリート柱に特有のくびれのある履歴曲線を精度良く再現することにも成功している．ここでは，上記の解析手法を用いることにより，コンクリート充填矩形断面鋼製橋脚の耐荷機構について検討する．

2.解析モデル：解析対象とする供試体 N-1 は土木研究所⁴⁾で用いられた図 1 に示す縮尺約 1/3 の正方形断面鋼製橋脚で内部に基部から三枚目のダイヤフラムまでコンクリートが充填してある．繰り返し荷重は鉛直荷重を一定に保った上で，初期降伏変位 δ_0 に基づく通常の変位制御による漸増型 1 回繰り返しである．解析モデルは基本的には上に示した従来と同様の有限要素モデル^{2,3)}を用いる．ただ，コンクリートと鋼材の界面については接触離間の挙動を正確に反映したコンタクトペアを全面に用いるべきであるが，数値計算を安定させるためにコンタクトペアはパネル面，上ベースプレート面と充填コンクリート

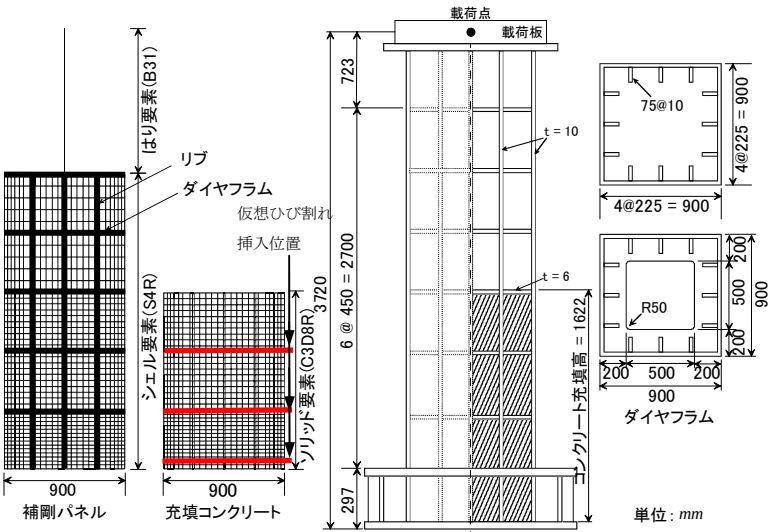


図 1 供試体 N-1 の形状と解析モデル

表 1 供試体諸元とパラメータ

供試体	$t(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$h_r(\text{mm})$	R_s	$\bar{\lambda}$	γ/γ^*	a/b	N/N_m	縦リブ本数
N-1	10.0	6.0	80.0	0.497	0.259	3.477	0.5	0.15	3

表 2 3 曲面モデルのパラメータ

供試体	$E(\text{GPa})$	ν	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\sigma_u(\text{MPa})$	ϵ_{yp}^0	f_b/σ_y	β	ρ	κ	ξ
N-1	206	0.28	364.2	642.5	0.0105	0.65	100	2	3	0.5

表 3 コンクリート損傷塑性のパラメータ

供試体	$E(\text{GPa})$	ν	$\sigma_c(\text{MPa})$	$\sigma_t(\text{MPa})$	ψ	K_c	σ_{b0}/σ_{c0}	ϵ	μ
N-1	26.5	0.22	22.6	2.26	20.0	2/3	1.16	0.10	0

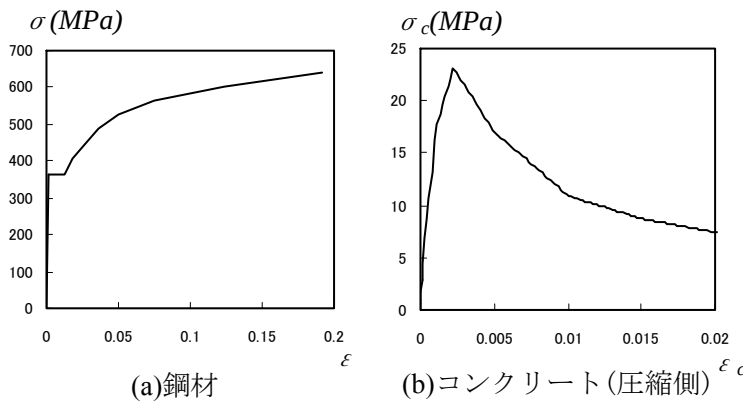


図 2 応力-ひずみ関係

ートとの界面に対して使用し、ダイヤフラム面、リブ面と充填コンクリート界面に対しては近似的ではあるが接触ばね要素を用いる。接触ばね要素は変形前に接触している互いの接点を基準に離間と接触を評価するもので、一般に相対変形が大きくなった場合に精度が低下する問題点はあるが、本モデルでは相対変形が大きくなるので問題は少ない。コンクリートと鋼材の界面には乾燥収縮を考慮して 0.1mm のギャップを設けている。なお、界面の摩擦は無視する。鋼材は SM490 で単調引張りの 1 軸真応力-対数ひずみ関係を図 2(a)に、3 曲面モデルの材料パラメータ値を表 2 に示す。また、コンクリートの一軸の圧縮応力-圧縮ひずみ関係を図 2(b)に損傷塑性モデルの材料パラメータ値を表 3 に示す。なお、最大引張応力は最大圧縮応力の 1/10 と仮定している。充填コンクリートのひび割れ発生が予測される位置に仮想ひび割れを導入するが、ここでは引張り相当塑性ひずみの分布状況からこの値が大きくなる図 1 に示す 3 箇所挿入する。

3. 履歴挙動：図 3 に供試体頂部の水平荷重-水平変位関係を示す。これより、最大荷重ならびにくびれのある履歴曲線形状に関して解析結果は実験結果とよく一致している。ただ、 $8\delta_0$ 以降において実験値は解析値と異なり耐力を急速に失い差が生じている。これは $6\delta_0$ で基部付近の補剛パネル角部に亀裂が発生し、 $8\delta_0$ で大きく進行したことによるものである。すなわち、解析の精度は少なくともき裂発生までは良いことが確認される。

4. 充填鋼管柱耐荷機構：コンクリート充填矩形断面鋼製橋脚の耐荷機構を検討するために、図 4 に解析で得られた鋼管が受け持つ軸力 N_s とコンクリートが受け持つ軸力 N_c と軸力の総和 $N=N_s+N_c$ を鋼製橋脚に外力として与えられた一定軸力 P の絶対値で無次元化して示す。これらの値は正であるときに引張軸力、負のときに圧縮軸力であることを示す。なお、軸力の総和 N は一定の圧縮荷重 P が与えられているためほぼ一定値である。この図からわかるように、当初は圧縮荷重の 35%が充填コンクリートに 65%が鋼管に分担されているが、繰り返しの振幅の増大とともに鋼管が受け持つ軸力は引張りとなり、平均値は徐々に引張り側に移動し引張軸力の最大値は圧縮荷重 P の絶対値の 180%まで到達していることがわかる。逆に、コンクリートは常に圧縮を受け、圧縮軸力は最大で 280%に到達している。この挙動はすでに示した円形の充填鋼製橋脚³⁾とほぼ同様である。すなわち、最大振幅時では充填鋼管基部には軸圧縮力と曲げモーメントが作用するが、鋼管の局部座屈発生により鋼管の圧縮剛性が低下するため、軸方向圧縮力は主に充填コンクリートに支持される。逆に曲げモーメントにより生じる引張力は水平ひび割れが発生した充填コンクリートでは抵抗できないので、主として鋼管で支持される。以上のように、局部座屈が発生すると鋼管には主に引張軸力が作用するので座屈変形はコンクリートが圧壊するまでは進展しにくいものと考えられる。このとき、ダイヤフラムは軸方向圧縮力を充填コンクリートに伝達する重要な役割を果たしている。なお、充填コンクリートは鋼管からの拘束により圧縮強度が向上する³⁾。

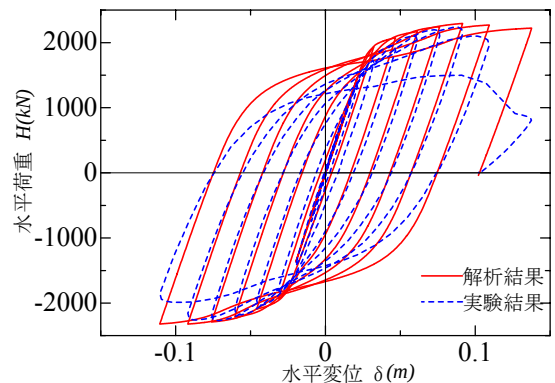


図 3 水平荷重-水平変位関係

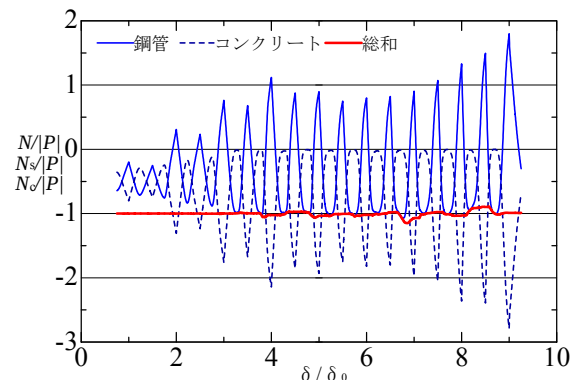


図 4 鋼管とコンクリートの軸力配分の推移

参考文献：1) ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.7, 2) 後藤芳顕・藤井雄介・水野貢介：相互作用を考慮した繰り返し荷重下のコンクリート充填矩形断面鋼製橋脚の終局挙動解析, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集 1-079, 2008, 3) 後藤芳顕・Ghosh Prosenjit Kumar・川西直樹：充填コンクリートとの相互作用を考慮した円形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動の FEM 解析, 土木学会論文集 A 掲載予定, 4) 建設省土木研究所：道路橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(V), 共同研究報告書 182 号, 1997.