

鋼管を用いた多柱式橋脚に関する一検討

松村政秀¹・北田俊行²・陵城成樹³・杉原尚志⁴

¹正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科助手（〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138）

²正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科教授（〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138）

³正会員 工修（株）ニュージェック技術開発部構造室長（〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19）

⁴学生員 大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程 2 回生（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）

1. はじめに

鋼製橋脚は、一般に RC 橋脚と比較して、建設コストが高いものの、軽量であり工期の短縮を図れること等から、RC 橋脚では建設が困難な場所に建設されている。兵庫県南部地震によって多くの鋼製橋脚が損傷を受けたが、その後も鋼製橋脚は、RC 橋脚での建設が困難な条件の地点に引き続き建設され、これまで以上に地震等に対する安全性の向上と低コスト化が要望されている。すなわち、橋脚柱部材の塑性変形性能の確保だけでなく、被災後の復旧が可能であり、かつ設計、施工、材料などに係る建設コストの低減を図ることが、これからの鋼製橋脚の建設における主な検討項目に挙げられる。これらの実現には、i)規格化された鋼部材の使用、ii) 複合構造の積極的採用、iii) 被災部材の取り替えの容易性、iv) アンカー部の簡略化、などの検討が必要である。

本研究は、上記 i)～iv)に着目した新しい形式の鋼製橋脚として、鋼管を用いた多柱式の橋脚構造の設計コンセプト、および試算結果を示したものである。したがって、活荷重の考慮、適切な弾性応答加速度の設定、および上部構造あるいは杭やフィーチングからなる下部構造との接合条件等の検討項目は本検討の対象外とした。したがって、以下では、提案した多柱式の鋼製橋脚が、弾性応答加速度 1,000 gal の条件で設計可能であるかどうか、および今後の検討に向けての基礎データを得ることを主な目的として 3 次元弾塑性有限変位解析を実施している。

2. 多柱式橋脚構造の提案

提案する多柱式の鋼製橋脚は、図-1 に示すように、中央の柱（以下、中心柱という）とそれを取り囲んで配置される柱（以下、周囲柱という）から構成され複数の鋼管柱からなり、中心柱と周囲柱、あるいは周囲柱と周囲柱とは横繋ぎ材により連結する。

中心柱により常時の死荷重を、周囲柱および横繋ぎ材によって、地震時の水平力・せん断力を分担することを期待した構造である。このメカニズムを効率よく機能させることを目的として、多柱式鋼製橋脚の建設は、はじめに中心柱に上部構造を設置した後に、周囲柱および横繋ぎ材を配置する手順を踏む。ここで、全ての部材には JIS 規格の構造用鋼管を使用し、現場へは鋼管を積み重ねて搬入することによって、製作工数の低減、および運搬性の向上を図っている。また、橋脚と上部および下部構造とは剛結構造とし、全ての柱部材にはコンクリートを充填することによって、建設コストの大幅な縮減を期待するものである。このような多柱式鋼製橋脚は、現在、特に問題となっている大都市内の交通渋滞の緩和を目的としたバイパス高架橋に適する構造物であると考えている。

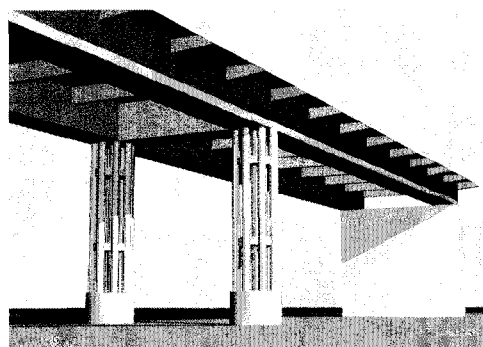


図-1 提案する多柱式橋脚

この多柱式橋脚の特徴を以下に列挙する。

- 1) 構造用鋼管を使用するとともにコンクリートを充填した合成構造を採用する：低コスト化（製作工数の低減と運搬性の向上）
- 2) 中心に軸力支持部材、周辺に曲げ・せん断部材を配置した機能分離構造を採用する：復旧の容易性
- 3) 鋼管柱をスタッド等でフーチングに定着させる：アンカー部の簡略化、低コスト化
- 4) 上部構造との接合もコンクリートとの複合構造として、隅角部に作用する応力集中を緩和する：維持管理性の向上

3. 多柱式橋脚の試算例

図-2 に示すような設計モデルを用いて、以下の条件にしたがって多柱式の鋼製橋脚を設計する。

- 1) 各柱部材には、降伏点（公称値） σ_y が 235 N/mm^2 の STK400 に相当する構造用鋼管を使用し、設計基準強度 σ_{ck} が 30 N/mm^2 のコンクリートを充填する。
- 2) 中心柱は、上部構造死荷重を受け持つのに十分な断面となるように設計する。ここで、地震時の水平力の作用高さ（＝橋脚高さ）は 19.2 m 、および、上部構造死荷重による軸方向圧縮力 P を $7,155 \text{ kN}$ と仮定した。この値は、多柱式鋼製橋脚の適用対象として、既存の 3 径間連続鋼桁橋における値を参考にして決定した。
- 3) 周囲柱の断面設計は、弾性応答加速度 $1,000 \text{ gal}$ に相当する水平荷重（＝上部構造死荷重）が橋脚頂部に作用する場合に、すべての部材が弾性内に収まるように、各柱部材の断面寸法および周囲柱の配置を決定する。ただし、適切な弾性応答加速度の設定については、今後動的な応答性状を勘案した上で決定する必要がある。

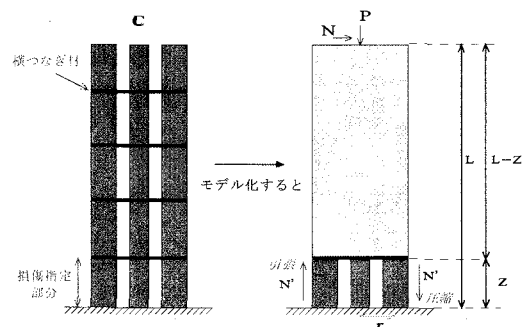


図-2 設計モデル

(1) 中心柱の設計

常時に上部構造死荷重を受け持つ中心柱は、軸

方向圧縮力のみを受ける軸力部材として、式(1)により断面寸法を決定する。

$$\sigma_y / \nu \times A_S + \sigma_{ck} \times A_C > P \quad (1)$$

ここに、 ν ：安全率（＝1.7）、 A_S ：鋼管の断面積、 A_C ：コンクリートの断面積、 P ：上部構造死荷重による軸方向圧縮力

(2) 周囲柱の設計

中心柱から距離 R だけ離れた円周上に地震時の水平力による曲げモーメントおよびせん断力を受け持つ周囲柱を設置し、周囲柱は圧縮力あるいは引張力とせん断を受ける軸力部材として設計する。ここで、周囲柱を円周上に配置するのは、どの方向に地震力が作用する場合にも橋脚柱が同等な耐震性を発揮できることを期待できるためである。

a) 横繫ぎ材の設置間隔

柱下端から 1 個目の横繫ぎ材より下方の周囲柱が、多柱式鋼製橋脚の耐震性を決定する断面区間になるため、橋脚下端に最も近い横繫ぎ材の設置高さ Z は、横繫ぎ材間の柱部材の細長比パラメータが 0.2 以下となるように決定する。

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} * \frac{l_e}{r} \quad (2)$$

ここに、 l_e ：柱部材の有効座屈長（＝ $1.0 \times Z$ 、 Z ：最下端の柱部材長）、 r ：柱部材の断面 2 次半径

b) 周囲柱の断面決定

周囲柱の断面寸法は、圧縮側の柱部材は式(3)により、引張側の柱部材は式(4)により断面設計する。周囲柱の配置位置 R （中心柱から距離）は式(5)により決定する。なお、 n' は軸方向力 N' （引張力あるいは圧縮力）を分担すると仮定する設計上の柱部材の本数であり、図-3 に示すように、 N' を 2 本の周囲柱で分担するケース a、および 3 本の周囲柱で分担するケース b との 2 ケースを考慮する。また、9 本の周囲柱すべての断面積を用いて、柱部材に作用するせん断力が降伏せん断応力度以下であることを照査する。

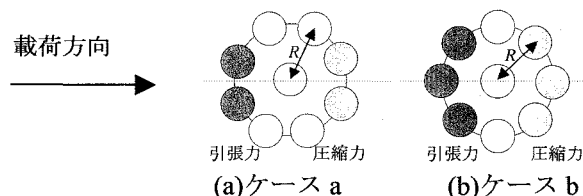


図-3 設計で考慮する周り柱の本数

$$n' \times (\sigma_y / \nu \times A_S + \sigma_{ck} \times A_C) > N' \text{ (圧縮側)} \quad (3)$$

$$n' \times (\sigma_y \times A_S) > N' \text{ (引張側)} \quad (4)$$

$$H \times (L - Z) = 2 \times N' \times R \quad (5)$$

ここに、 L ：橋脚全長、 R ：中心柱と周囲柱の中心

間距離, H : 頂部に作用する水平力, N : 周囲柱設計用の軸方向圧縮力, n : N を分担する周囲柱の本数, Z : 橋脚下端に最も近い横繋ぎ材の設置高さ

(3) 試算結果

上述の式(1)～式(5)を満足する R および A_S を決定し, A_S を満足する寸法の構造用鋼管を選択する. 表-1 には試算結果を示す. 中心柱には, 外径 $\phi=500$ mm, 板厚 $t=9$ mm, 周囲柱には $\phi=812.8$ mm, $t=16$ mm の構造用鋼管を使用する. ケース a とケース b とで, 周囲柱を配置する円周の半径 R が異なるが, 中心柱の寸法および下端に最も近い横繋ぎ材の設置位置 Z (下端から 4,500 mm で, このとき $\lambda=0.175$) は共通である. 横繋ぎ材は下端から 4,500 mm 間隔で, 高さ方向に等間隔で 4 断面に設置している. また, t_{seq} はコンクリートを鋼に換算した換算した換算板厚であり, 後述の式(7), (8)により算出する.

表-1 柱部材の入力データ

(a)周囲柱					
設計 ケース	軸力 分担	周囲柱 外径 ϕ (mm)	周囲柱 板厚 t_s (mm)	周囲柱の 配置円直径 (mm)	換算 板厚 t_{seq} (mm)
a	2 本	812.8	16	5,600	36.03
b	3 本	812.8	16	4,800	36.03

(b)中心柱					
共通	1 本	500	9	—	21.37

表-2 解析モデルの内訳

モデル名	概要
a-0	すべての横繋ぎ材 (剛体) を考慮
a-1	すべての横繋ぎ材を考慮
a-2	a-1 から横繋ぎ材 1 を除去
a-3	a-1 から横繋ぎ材 1 および 2 を除去
a-b	a-1 に解析モデル b の方向へ载荷
b-0	すべての横繋ぎ材 (剛体) を考慮
b-1	すべての横繋ぎ材を考慮
b-2	b-1 から横繋ぎ材 1 を除去
b-3	b-1 から横繋ぎ材 1 および 2 を除去
b-a	b-1 に解析モデル a の方向へ载荷

4. 弾塑性有限変位解析による

耐荷力特性の検討

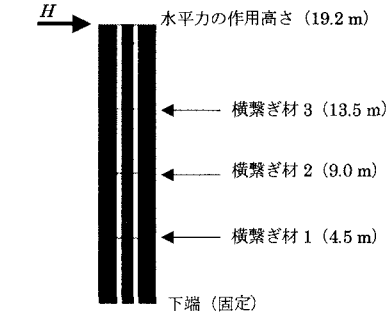
試算した多柱式橋脚の耐荷力特性を弾塑性有限変位解析により検討する. 各柱部材は, 弾塑性有限変位要素を使用し, 横繋ぎ材には弾性有限変位梁要素を使用した. また, 解析には弾塑性有限変位解析プログラム EPASS¹⁾を使用する.

(1) 解析モデルおよび解析条件

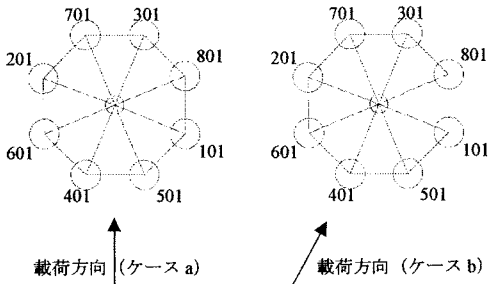
表-2 および図-4 には, 表-1 の寸法に基づきモデル化し, 横繋ぎ材の設置本数あるいは剛性を変化させた多柱式鋼製橋脚の解析モデルを示す.

ここで, 解析モデル a-2 および b-2 は, 式(2)の有

効座屈長が $0.5 \times Z$ の時に相当し, 橋脚下端と下端に最も近い横繋ぎ材間の柱部材の細長比パラメータは 0.350 である. また, 解析モデル a-b は, ケース a で断面を決定した多柱式橋脚に, ケース b の载荷方向に水平荷重が作用する場合であり, 解析ケース b-a はケース b で断面を決定した多柱式橋脚に, ケース a の载荷方向に水平荷重が作用する場合である. 中心柱頂部と周囲柱頂部とは横繋ぎ材により剛結し, 頂部以外の中心柱と周囲柱とを連結する横繋ぎ材には, 外径 $\phi=600$ mm, 板厚 $t=12$ mm の構造用鋼管に相当する断面積, 断面二次モーメント, およびねじり定数を入力した. 比較のためにすべての横繋ぎ材を剛とした解析モデルも設定している. なお, 鋼管は STK400 とし, 鋼材の応力-ひずみ関係は, 鋼材の降伏点 $\sigma_Y=235$ N/mm², ヤング係数 $E=2.0 \times 10^5$ N/mm² のバイリニア型とした.



(a)側面図および横繋ぎ材の設置位置



(b)ケース a (c)ケース b

図-4 解析モデルの断面図および载荷方向

荷重の载荷は, はじめに, 中心柱のみに上部構造死荷重 (一定値) に相当するプレストレスを導入し, つぎに, 水平荷重を一方向に漸増させた. すなわち, 上部構造死荷重は中心柱のみで分担し, 水平荷重の载荷に伴う曲げモーメントおよびせん断力は周囲柱あるいは横繋ぎ材で分担できる解析方法とした. さらに, 簡単のため, 圧縮側のコンクリート充填柱部材 (ケース a の場合には, 周囲柱 301, 701, 801 および 201, ケース b の場合には周囲柱 301, 701 および 801) の板厚には, 合成断面を鋼断面に換算した換算板厚 t_{seq} (A_{Seq} を満足す

る板厚)を用い、引張側のコンクリート充填柱の板厚は鋼管の板厚を入力した。

$$A'=A_S+A_C/10 \tag{7}$$

$$A'=A_{Seq} \tag{8}$$

ここに、 A' ：合成断面の鋼換算断面積、 A_{Seq} ：外径は変化させずに換算板厚 t_{seq} を有する鋼管の断面積

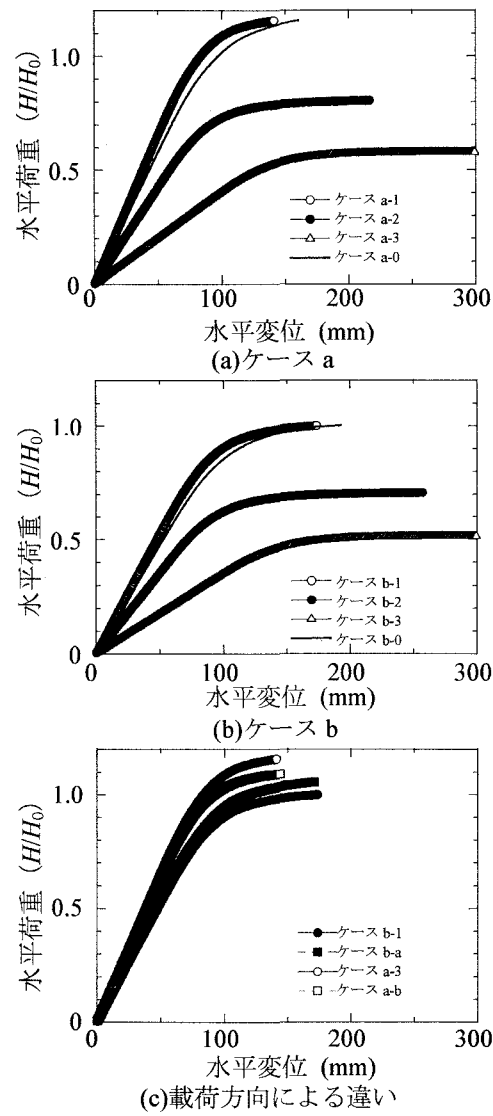


図-5 水平荷重-水平変位関係

表-3 解析出力軸力データ（引張側の周囲柱降伏時、ケース a-1, 単位：kN）

柱番号 Case	1 (中心柱)	301 701	201 801	101 601	401 501
1	5158	-11945	-2419	5098	8271

表-4 解析出力軸力データ（引張側の周囲柱降伏時、ケース b-1, 単位：kN）

柱番号 Case	1 (中心柱)	301 701	701 801	101 201	501 601	401
0	2228	-16254	-9651	-2181	8575	9152

(2)解析結果

図-5 には、柱部材頂部の水平荷重-水平変位曲線を示す。縦軸は作用水平荷重 H を設計水平荷重 H_0 で除した無次元化荷重である。表-3 および表-4 には、ケース a-1 およびケース b-1 の解析結果から、引張側鋼管が降伏に至った時の各柱部材の軸方向力（マイナスは圧縮力であることを示す）をまとめた。図-5 によると、考慮する横繫ぎ材の本数を減らす場合には、多柱式橋脚の剛性は低下する。また、解析ケース a-1 および b-1 とは、横繫ぎ材を剛とした解析ケース a-0 および b-0 とほぼ同様な傾向を示すことから、すべての横繫ぎ材を考慮すると H/H_0 は 1 以上となり、設計コンセプトどおりの設計が可能であることが確認できる。図-5(c)によると、今回試算した多柱式の橋脚構造を採用する場合には、得られる耐荷力特性は設計で考慮する方向にあまり影響を受けないことが確認できる。

また、表-3 および表-4 によると、コンクリートを充填した鋼管構造の耐荷力特性を正確に評価できるようなモデル化についても検討を進める必要があるが、今回の簡易な合成柱のモデル化の場合でも周囲柱に軸方向圧縮力が卓越して作用すること、および多柱式橋脚の中立軸は中心柱よりも圧縮側に位置することを確認した。

5. まとめ

本検討では、地震に対する安全性と低コスト化を目的として、コンクリート充填鋼管を使用する多柱式の鋼製橋脚の有効性を検討し、多柱式橋脚を設計コンセプトどおりに設計可能であることを確認した。多柱式橋脚の特性は、活荷重の考慮、適切な弾性応答加速度の設定、および上部構造あるいは杭やフィーディングからなる下部構造との接合条件等、解決すべき課題も多いが、基本的には建築分野で既に実用されている構造の応用であり、実現の可能性は高いと考えている。

謝辞： JIP テクノサイエンス（株）田中克弘氏には解析モデルの作成にあたりご助言を戴きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 北田俊行，大南亮一，丹生光則，田中克弘：ケーブルを用いた鋼橋の耐荷力解析用の汎用プログラムの開発，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，第 13 巻，日本鋼構造協会，pp.89-94，1989.7