

鋼製ラーメン橋脚の軸力変動に関する研究

Study on Axial Force Variation of Steel Rigid Frame Pier

中央コンサルタンツ(株) ○正員 野田勝哉 (Katsuya Noda)
中央コンサルタンツ(株) 正員 菅勝司 (Katsuji Suga)

1. はじめに

鋼製橋脚は、用地制約の多い都市部で採用されることが多く、近年の調査¹⁾によると約6割がラーメン形式である。その多くは、1層門型構造や2層式ラーメン構造であり、上部工と剛結合された構造も多い。

ラーメン橋脚の特徴として、橋軸直角方向地震時に水平慣性力によって働く軸力変動が挙げられる。この軸力の変動により降伏曲げ耐力が変化し、耐震性評価に影響を与えると考えられる。しかし、鋼製橋脚の耐震性評価に関する研究は、一定の軸力を受ける単柱形式を対象としたものがほとんどであり、ラーメン橋脚に対して検討された研究は少ない。

特に柱間隔に比し上部工の重心位置が高い橋脚など、軸力が大きく変動し柱基部に引抜き力が作用するようなラーメン橋脚に対しては、軸力変動の影響を考慮する必要があるものと考えられるが、この軸力変動が耐震性能に与える影響について検討された事例は少ない。

そこで本研究では、鋼製2層式ラーメン橋脚を対象として、軸力変動による降伏曲げモーメントの変化が解析結果に与える影響について検討した。その結果、軸力変動が解析結果に与える影響は、応答塑性率に着目することにより、ある程度定量化できることが確認されたので、ここに報告するものである。

2. 動的応答解析

2-1. 解析モデル

本研究では、軸力変動による降伏曲げモーメントの変

化が解析結果に与える影響を検討するために、橋脚単体モデルとして、図-1に示す9径間連続鋼立体系ラーメン橋のうち代表的な橋脚を1基抽出して、さらに左右対称としたモデルを用いた。(図-2)

この橋脚単体モデルに対して、応答塑性率の違いによる影響を検討するために、下層柱の板厚を種々変化させた場合を対象として、

■解析1：軸力変動によるM- ϕ 関係の変化を「考慮しない」場合

■解析2：軸力変動によるM- ϕ 関係の変化を「考慮した」場合

について非線形時刻歴応答解析を行うこととした。この際、実構造モデルにおいては下層柱全域にコンクリートを充填したが、無充填モデルも解析モデルに加えることとした。

2-2. 復元力特性

下層柱は全て非線形部材とし、M- ϕ 関係に基づくバイリニアモデルとした。上層柱、上・下層の横梁は線形部材、隅角部および上部工との結合部は剛域としてモデル化した。基礎バネについては、動的変形係数を用いて道路橋示方書²⁾に準じて算出した。なお、横梁中央には、上部工の質量とともに上部工断面の回転慣性を考慮した。

M- ϕ 関係の算出方法は、コンクリート充填モデルについては道路橋示方書に準じて算出した。コンクリート無充填モデルについては、道路橋示方書に規定がないため、以下の仮定のもとに復元力特性を算出した。

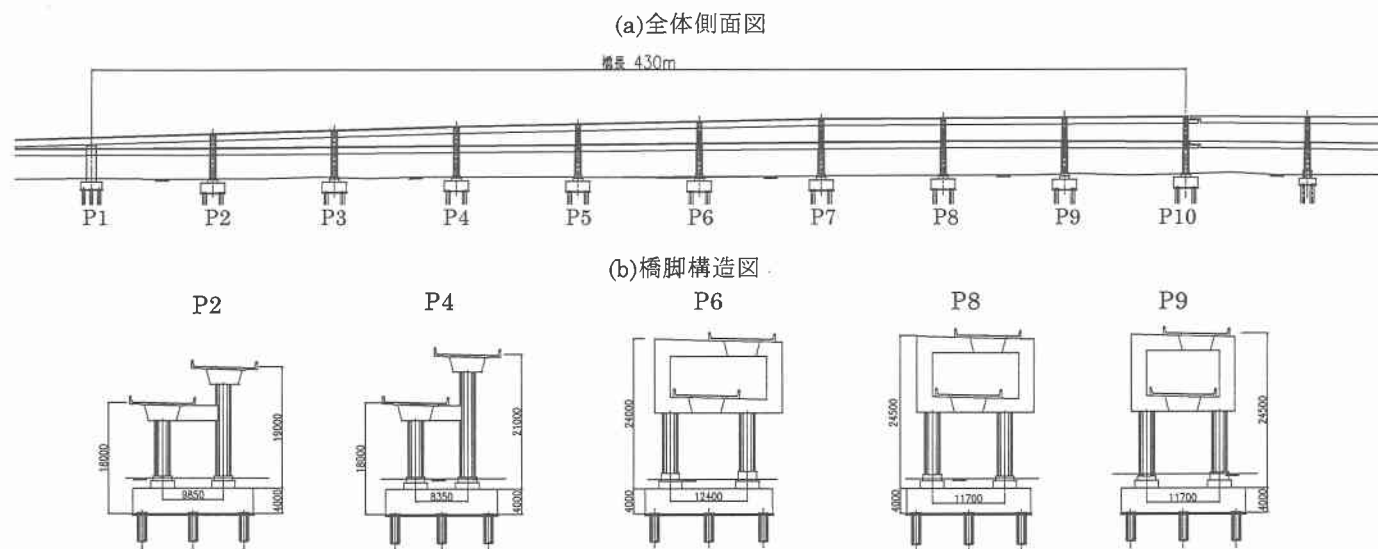


図-1 全体図

まず、鋼材に生じる圧縮または引張ひずみが降伏ひずみに達した点を降伏点とし、降伏点に達した後の2次勾配は、鋼材に発生するひずみが塑性限界ひずみに達した点を結んで得られる勾配とする。なお、この際の降伏ひずみ ε_y は公称降伏点から算出するものとし、終局ひずみ ε_u は文献3),4)より以下で与えるものとする。

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{0.12(1+4P/P_y)}{(R_t - 0.03)^{1.45}(1+P/P_y)^5} + 3.6(1-P/P_y)$$

$$0.03 \leq R_t \leq 0.5$$
$$0.0 \leq P/P_y \leq 0.3$$

ここに R_t ：径厚比パラメータ
 P ：作用軸力（引張の場合はゼロ）
 P_y ：全断面降伏軸力

また、鋼材の応力－ひずみ関係は1/100のひずみ硬化を考慮した。

上記仮定のもと、「解析1」については初期軸力時（死荷重時）のM－ ϕ 関係を一定としたバイリニアモデルとして解析を行う。「解析2」については、軸力を+40MNから-30MNまでを5MNおきに変化させて得られたM－ ϕ 関係を用いて、軸力変動バイリニアモデルとして解析を行った。この際、電算入力上、初期剛性および降伏後の剛性低下率は初期軸力時のものを用いた。

表-1に橋脚単体モデルの解析で用いた下層柱の復元力特性（初期軸力時）を示す。

2－3．解析手法

本研究で用いた解析手法は以下である。

- 解析手法：非線形時刻歴応答解析（橋軸直角方向）
- 地震波：振幅補正標準波形タイプⅡ（Ⅲ-1）
- 積分法：Newmark β 法（ $\beta=0.25$ ）
- 積分間隔：0.002sec
- 減衰：剛性比例減衰

この際、解析に先立ち自重解析を行い死荷重時の応力状態を引継ぐこととする。

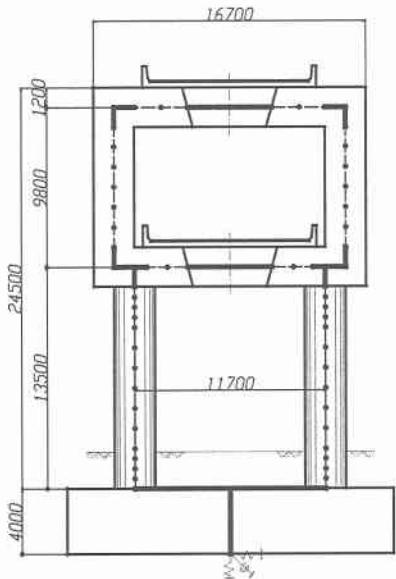


図-2 橋脚単体モデル

なお、本解析で使用したプログラムは、汎用動的解析システムTDA PⅢである。

3．解析結果

3－1．橋脚単体モデルにおける解析結果

図-3にCASE-1における下層柱基部のM－N図およびM－ ϕ 図を示す。なお、M－N図には軸力変動を考慮した場合の降伏曲げモーメントを示してある。

この結果から柱基部に作用する軸力は、「解析1」で+27.3MNから-12.9MN、「解析2」で+26.6MNから-9.5MNと大きく変動しており、柱基部に引抜き力が作用しているのがわかる。また、「解析2」は「解析1」に比べ、より低い軸力状態で降伏に達しており、その結果応答曲率が大きくなっている。ただし、応答曲率の違いは15%程度と比較的小さい結果となった。

表-1 下層柱における復元力特性一覧（初期軸力時）

		半径	板厚	材質	初期 軸力 N_0 (kN)	軸力比	径厚比		降伏時		終局時	
		R (mm)	t (mm)			N_0/N_y	R/t	R_t	M_{y0} (kNm)	ϕ_{y0} (1/m)	M_u (kNm)	ϕ_u (1/m)
CASE-1	コンクリート充填	1250	29	SM490Y	9602	0.120	43.103	0.125	55600	0.00141	80615	0.02917
CASE-2	コンクリート充填	1250	16	SM490Y	9602	0.217	78.125	0.228	32381	0.00136	51657	0.02738
CASE-3	コンクリート充填	1250	20	SM490Y	9602	0.174	62.500	0.182	39894	0.00139	61015	0.02801
CASE-4	コンクリート充填	1250	24	SM490Y	9602	0.145	52.083	0.151	47060	0.00140	70068	0.02860
CASE-5	コンクリート充填	1250	26	SM490Y	9602	0.134	48.077	0.140	50542	0.00141	74496	0.02890
CASE-6	コンクリート充填	1250	32	SM490Y	9602	0.109	39.063	0.113	60705	0.00142	87379	0.02975
CASE-7	コンクリート充填	1250	36	SM490Y	9602	0.097	34.722	0.100	67288	0.00142	95685	0.03026
CASE-11	無充填	1250	24	SM490Y	9602	0.145	52.083	0.151	34743	0.00121	51709	0.00598
CASE-12	無充填	1250	28	SM490Y	9602	0.124	44.643	0.129	41304	0.00124	61087	0.00715
CASE-13	無充填	1250	32	SM490Y	9602	0.109	39.063	0.113	47801	0.00127	70514	0.00848
CASE-14	無充填	1250	36	SM490Y	9602	0.097	34.722	0.100	54233	0.00128	80053	0.01003
CASE-15	無充填	1250	40	SM490Y	9602	0.087	31.250	0.090	60601	0.00130	89761	0.01184
CASE-16	無充填	1250	44	SM490Y	9602	0.080	28.409	0.082	66905	0.00131	99693	0.01395
CASE-17	無充填	1250	48	SM490Y	9602	0.073	26.042	0.075	73146	0.00132	109940	0.01645

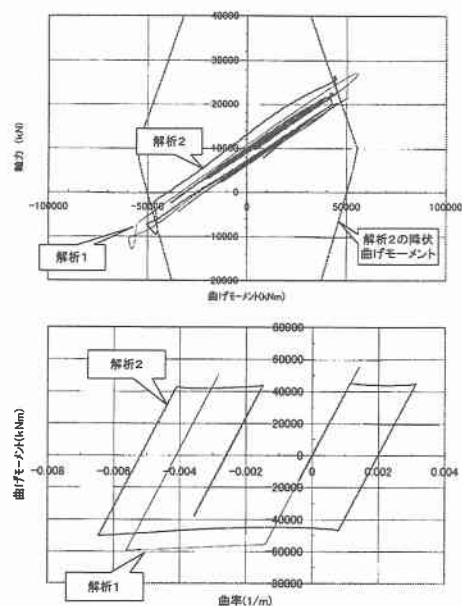


図-3 左柱基部の履歴図 (CASE-1)

次に、下層柱の板厚を種々変化させた場合の柱基部に作用する軸力の変動幅を示したグラフとして、図-4に「解析1」、図-5に「解析2」を示す。この際、横軸には「解析1」「解析2」の応答曲率を初期軸力時の基準降伏曲率 ϕ_{y0} で除した応答塑性率を、縦軸には初期軸力 N_0 に対する軸力の変動値を示す。

なお、グラフ中の応答曲率の記号は、 ϕ_r : 「解析1」

における応答曲率、 ϕ_{rm} : 「解析2」における応答曲率である。

この結果から、いずれのケースも軸力の変動幅が大きく初期軸力 N_0 を超える引張力が作用しており、柱基部に引抜き力が作用している。ただし、応答塑性率が大きくなるに従い、軸力の変動幅が小さくなる傾向にある。これは、応答塑性率が大きくなるに従い、履歴ループによる吸収エネルギーが増加し、応答加速度を低減しているためだと考えられる。

少ない解析結果ではあるが、概ね応答塑性率が4を超えると軸力の変動幅がより小さくなる傾向にあることがわかった。このことは、応答塑性率が大きくなるに従い、軸力変動の影響が少なくなることを意味する。

次に、「解析1」と「解析2」の応答値の比較を行うために、「解析2」の応答塑性率 ϕ_{rm}/ϕ_{y0} を横軸に、応答局率の比率 ϕ_{rm}/ϕ_r を縦軸にとったグラフを図-6に示す。この結果から、軸力変動の影響を考慮した「解析2」の方が応答曲率は大きい傾向となった。しかし、その傾向は一律でなく、応答塑性率が小さなものほど大きく、またコンクリート充填モデルの方が軸力変動の影響を受けやすいことがわかった。

少ない解析結果ではあるが、コンクリート充填モデルでは応答塑性率5以下、無充填モデルでは4以下で軸力変動の影響が顕著に現れる。

これを超える応答塑性率の場合は、軸力変動の影響による応答曲率の違いが10%程度以下と比較的小さいことが確認された。

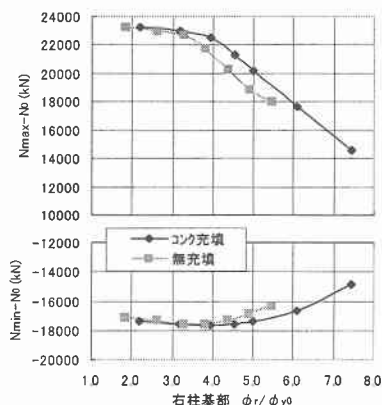
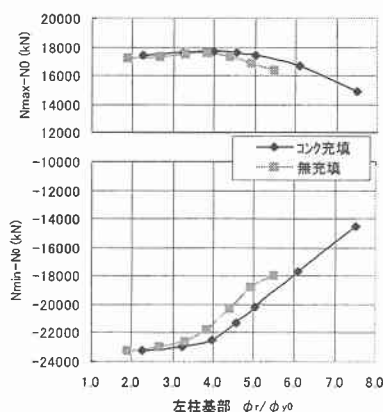


図-4 橋脚単体モデルにおける軸力変動幅 (解析1)

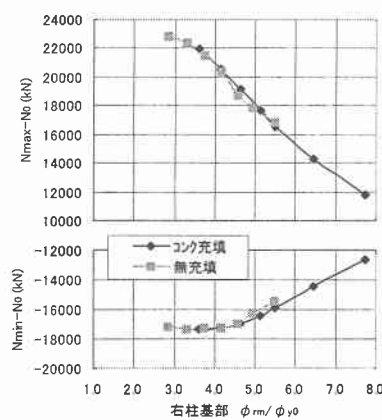
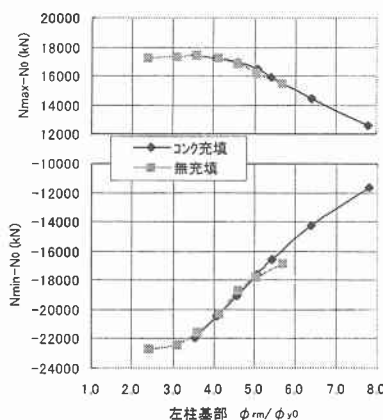


図-5 橋脚単体モデルにおける軸力変動幅 (解析2)

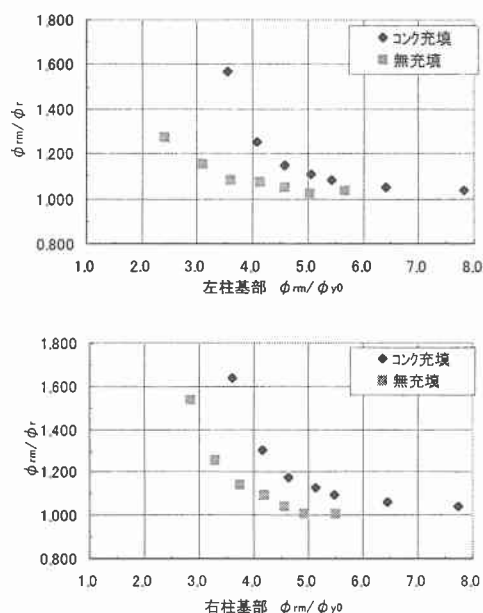


図-6 橋脚単体モデルの応答値比較

表-2 全体モデル解析結果一覧

柱基部	板厚 (材質)	解析2 ②	解析1 ①	比率
		ϕ_{rm}/ϕ_{v0}	ϕ_r/ϕ_{v0}	②/①
P1	左柱 38(SM570)	1.305	0.967	1.349
	右柱 33(SM490Y)	0.883	0.772	1.143
P2	左柱 35(SM570)	1.520	0.965	1.576
	右柱 23(SM490Y)	1.736	0.790	2.198
P3	左柱 24(SM490Y)	7.258	4.951	1.466
	右柱 20(SM490Y)	6.569	3.919	1.676
P4	左柱 21(SM490Y)	8.988	7.429	1.210
	右柱 22(SM490Y)	8.816	7.185	1.227
P5	左柱 18(SM490Y)	9.059	8.124	1.115
	右柱 22(SM490Y)	9.069	8.019	1.131
P6	左柱 19(SM490Y)	9.421	8.128	1.159
	右柱 23(SM490Y)	9.537	8.080	1.180
P7	左柱 19(SM490Y)	9.801	8.477	1.156
	右柱 22(SM490Y)	9.954	8.507	1.170
P8	左柱 29(SM490Y)	5.773	4.810	1.200
	右柱 33(SM490Y)	5.749	4.677	1.229
P9	左柱 37(SM490Y)	0.907	0.860	1.054
	右柱 42(SM490Y)	0.791	0.794	0.995

3-2. 全体モデルにおける解析結果

3-1で示した結果を検証するために、図-1に示した鋼立体ラーメン橋の橋軸直角方向に対して、「解析1」と「解析2」について非線形時刻歴応答解析を行った。なお、下層柱については全域にコンクリートを充填している。また、解析手法については2-3に示した手法と同様とした。

表-2に全体モデルにおける「解析1」と「解析2」の応答値一覧を示す。この結果から、応答塑性率の比較的小さい起点側橋脚について、「解析2」の応答値が「解析1」を大きく上まわる結果となった。これは起点側橋脚は温度により断面決定しており、応答塑性率が2以下と小さく軸力変動の影響を大きく受けたと考えられる。

また、「解析1」ではP1,P2橋脚は塑性しない結果となるが、「解析2」では塑性化し、その影響がP2およびP3橋脚の応答値に大きく影響を与えたと考えられる。これらの結果から、3-1で示した通り、応答塑性率の小さな橋脚は、軸力変動の影響を大きく受けることが確認された。その他の橋脚については応答塑性率が大きく、軸力変動の影響が少ない結果となった。

ただし、下層柱にコンクリートを充填した橋脚単体モデルでは、応答塑性率が5を超えると、軸力変動の影響が10%程度であったが、全体モデルでは10%から20%程度とバラツキがある。これは、上部工の偏心や主要振動モードの違い、橋脚形状の違いなどに原因があると思われるが、これらについては今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究では鋼製2層式ラーメン橋脚の橋軸直角方向について、軸力変動による降伏曲げモーメントの変化が解析結果に与える影響について検討した。この研究から得られた結論を要約すると以下の通りである。

- 1) 橋脚単体モデルの解析結果から、橋軸直角方向地震時には柱に作用する軸力が大きく変動し、柱基部に引抜き力が作用する。ただし、その変動幅は応答塑性率が4を超えると小さくなる。
- 2) コンクリート充填モデルでは応答塑性率で5以下、無充填モデルでは4以下で軸力変動の影響が顕著に現れる。
- 3) ただし、これを超える応答塑性率の場合は、軸力変動の影響による応答塑性率の違いが10%程度以下と比較的小さく、軸力変動の影響を無視できる可能性がある。

以上の結果は、ある理想化された解析モデルでの結果であり、軸力変動の影響を定量化するには、減衰や塑性化に伴う剛性変化、 $P-\delta$ 効果、復元力特性、上部工重心位置、地盤条件など多くのパラメータについて検討が必要である。また、全体モデルについては、軸力変動に対して橋脚単体モデルと同様の傾向となったが、解析結果にバラツキがあるなど、今後検討すべき課題は多い。

今後、これらパラメータについて検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 森下泰光・福本誘士・青木徹彦・高久達将・熊野拓志・佐藤武司：鋼製ラーメン橋脚の耐震性能実験と工事実績調査、橋梁と基礎、Vol.35,pp32-37,2001.7.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1996.
- 3) (社)土木学会・(社)日本鋼構造協会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化、2000.
- 4) 鄭沂、葛漢彬、宇佐美勉：鋼構造物の強度と変形能の統一的評価法、第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集、pp25-32,2000.