

各国の耐震設計基準によって耐震設計された RC橋脚のP- δ 効果の比較

高橋雅裕・矢部正明

正会員（株）長大 構造事業部 構造防災室（〒305-0821 茨城県つくば市春日3-22-6）

1. はじめに

近年、技術基準の国際的な整合性が議論されるようになってきており¹⁾、このような状況に対応して、各国の耐震設計基準の比較が行われている^{2)・3)}。鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚とする）の耐震設計基準を、日本、米国、欧州、ニュージーランドで比較したとき、日本の耐震設計基準では考慮されていないが、他の国の耐震設計基準で考慮されているものにP- δ 効果がある。ニュージーランドのように、橋脚の断面をしばり、変形しやすい橋脚を建設する方向に設計が向かっている国では、P- δ 効果によってRC橋脚の断面が決定されることがある。一方、我が国の道路橋示方書V耐震設計編で採用されている地震時保有水平耐力法のように、単にRC橋脚のじん性能を向上させるだけでなく、ある程度の保有水平耐力も確保するような耐震設計法では、P- δ 効果の影響は少ないと考えられる。しかし、耐震設計の過程でのP- δ 効果への配慮の有無が、実際に建設されるRC橋脚に現れるP- δ 効果にどの程度の影響を与えるかを検討した研究はない。

本報告では、日本、米国、欧州、ニュージーランドの耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚を対象に、材料非線形と大変形を考慮したプッシュオーバーアナリシスを行い、各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚に現れるP- δ 効果を解析的に検討したものである。対象とした耐震設計基準は、日本は道路橋示方書V耐震設計編、土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編、米国はCaltrans Code、欧州はEuro Code 8、ニュージーランドはNZ Codeである。

2. 解析対象とした鉄筋コンクリート橋脚

解析対象とした橋梁を図-1に、解析対象とした鉄筋コンクリート橋脚の断面図を図-2と図-3に示す。

対象とした橋脚は、図-1に示した橋長200mの5径間連続橋の中間橋脚として、日本、米国、欧州、ニュージーランドの5つの耐震設計基準に従って試設計されたものである²⁾。試設計において想定している地震動のレベルは、弾性応答加速度で2G、地盤の設計加速度で800galである。いずれの橋脚も、単柱形式であり、断面形状は正方形である。材料および鉄筋径などは、日本で使用されるものを用いている。

橋脚高さは、7mの場合とP- δ 効果の影響がより大きいと考えられる30mの場合の2とおりとした。当該橋脚が地震時に支持するべき上部構造重量（＝死荷重反力）は、橋脚高さによらず、7000kNと仮定した。これは、日本におけるスパン40m程度、桁幅10m程度の橋梁を想定したものである²⁾。

図-2および図-3は、各国の耐震設計基準によって試設計されたRC橋脚の断面を示したものである。図-2は橋脚高さ7mの場合であり、図-3は橋脚高さ30mの場合である。図には、軸方向鉄筋、帯鉄筋、中間帯鉄筋の配筋を示してある。また、設計条件と材料強度を併せて示してある。図からわかるように、設計に用いた耐震設計基準によって、断面寸法や配筋量がかなり異なったものとなっている。橋脚重量をみると、橋脚高さが7mの場合には、各橋脚とも上部構造重量と同程度であるが、橋脚高さが30mの場合には、上部構造重量の約1.7～3.6倍の範囲にばらついている。

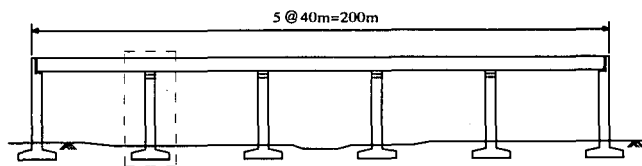
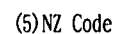
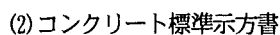
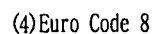


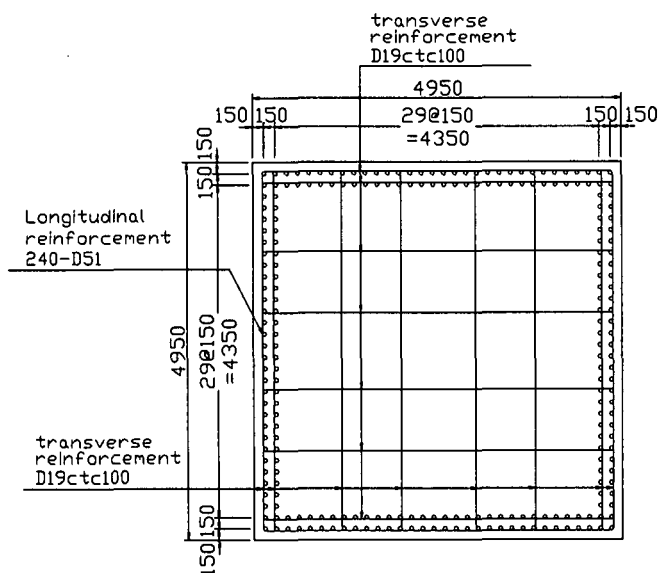
図-1 対象とした橋梁²⁾



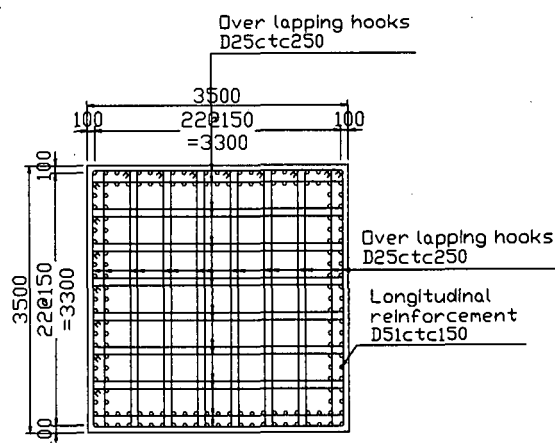
設計条件および材料強度

設計基準 諸元	道路橋 示方書	コンクリート標準 示方書	Caltrans	Euro Code8	NZ Code
上部構造重量 W_o (kN)	7000	7000	7000	7000	7000
橋脚躯体重量 W_p (kN)	756	686	1544	1544	988
コンクリート設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	24	24	24	24	24
軸鉄筋の降伏強度 σ_{sy} (N/mm ²)	345	345	345	345	345
荷鉄筋の降伏強度 σ_{sv} (N/mm ²)	345	345	345	345	345

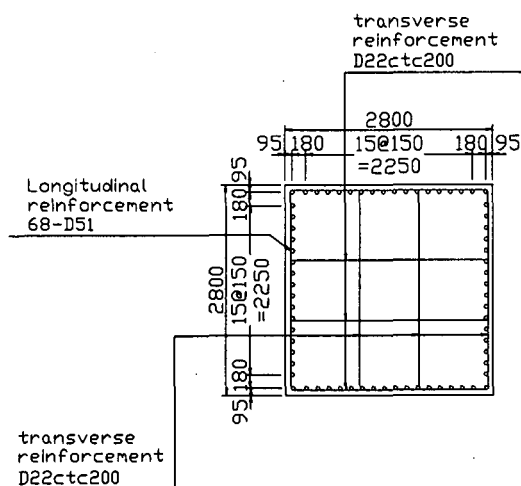
図-2 検討対象としたRC橋脚の断面(橋脚高さ7m, 2G対応)²⁾



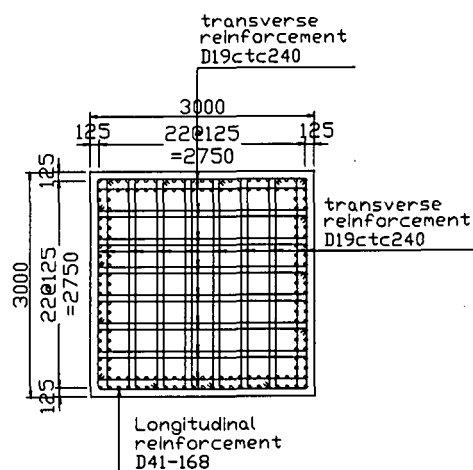
(1) 道路橋示方書



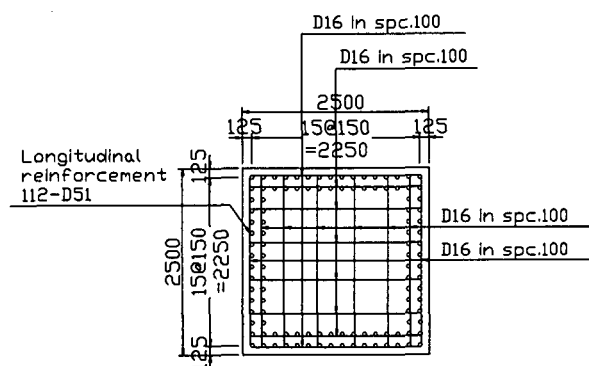
(4) Euro Code 8



(2) コンクリート標準示方書



(5) NZ Code



(3) Caltrans

設計条件および材料強度

設計基準 諸元	道路橋 示方書	コンクリート標準 示方書	Caltrans	Euro Code8	NZ Code
上部構造重量 W_u (kN)	7000	7000	7000	7000	7000
橋脚略体重量 W_p (kN)	18009	5762	4594	9004	6615
コンクリート設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	24	24	24	24	24
軸鉄筋の降伏強度 σ_{sy} (N/mm ²)	345	345	345	345	345
帯鉄筋の降伏強度 σ_{sy} (N/mm ²)	345	345	345	345	345

図-3 検討対象としたRC橋脚の断面（橋脚高さ30m, 2G対応）²⁾

3. 解析方法及び解析モデル

軸力と水平変位の積からなる付加曲げモーメントによるP- δ 効果が、水平力-水平変位関係に及ぼす影響について検討するため、材料非線形と幾何学的非線形を考慮した弾塑性有限変位解析を行い、幾何学的非線形を無視した弾塑性微小変位解析の結果と比較した。

橋脚は、2次元のはり要素でモデル化して基部を完全固定とした。軸方向の要素分割長については、有限要素法やファイバーモデルによる解析において、応力-ひずみ関係が下降勾配を持つ場合、最大荷重以降に変形が基部の1要素に集中するために、解が要素寸法に依存するという問題が指摘されている。ここではこのような局所化の影響を避けるために、橋脚基部の要素長が道路橋示方書に規定されている塑性ヒンジ長 L_p になるように分割した。道路橋示方書の塑性ヒンジ長 L_p は、次式で算出される。

$$L_p = 0.2h - 0.1D \quad (1)$$

ただし、

$$0.1D \leq L_p \leq 0.5D$$

ここで、 h は橋脚基部から上部構造慣性力の作用位置までの距離、 D は断面高さである。

材料の非線形性は、断面を分割した微小要素にコンクリートおよび軸方向鉄筋の部材軸方向に関する1軸の応力-ひずみ関係を与えるファイバー要素でモデル化した。初降伏は引張側最外縁鉄筋が降伏に達したとき、終局は圧縮側最外縁鉄筋位置でコンクリートが終局ひずみに達したときと定義した。

断面内のひずみと応力は、図-4の様に平面保持を仮定して求めた。その際、コンクリートは断面を50分割した微小要素の中心、軸方向鉄筋は鉄筋の中心でひずみと応力を評価した。部材軸方向に関しては、要素の中央でひずみと応力を評価した。コンクリートの応力-ひずみ関係は、日本の材料を用い、日本で施工することを想定しているので、図-5に示すように道路橋示方書で規定されたタイプII地震動に対する式を用いた。鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-6に示すように完全弾塑性型とした。ただし、コンクリートの曲げ引張強度 σ_{bt} は0とし、コンクリートは引張応力を負担しないものと仮定した。また、かぶりコンクリートは、ひずみが終局ひずみを越えるひずみにおいて応力を負担しないものと仮定した。

荷重の載荷方法については、図-7に示すように、橋脚に躯体重量を等分布載荷し、慣性力作用位置に上部構造重量を鉛直下向きに載荷した後(①)、慣性力

作用位置の水平変位を漸増させる変位制御によった(②)。

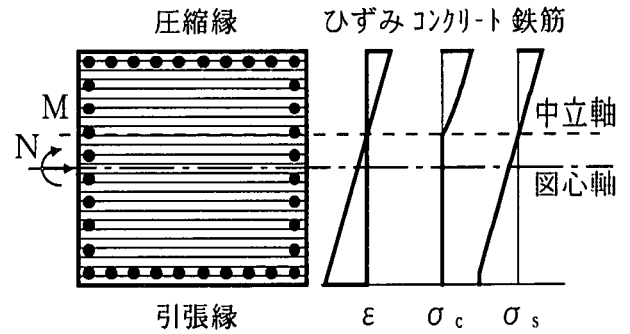


図-4 断面内のひずみと応力

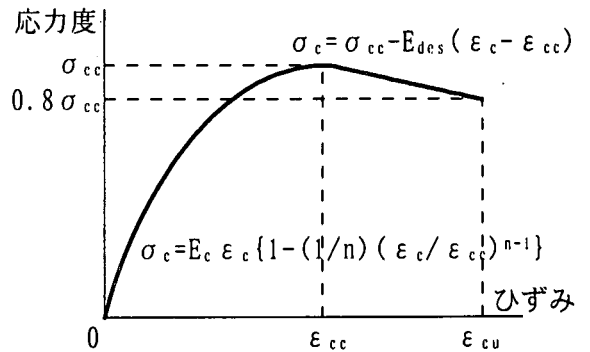


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

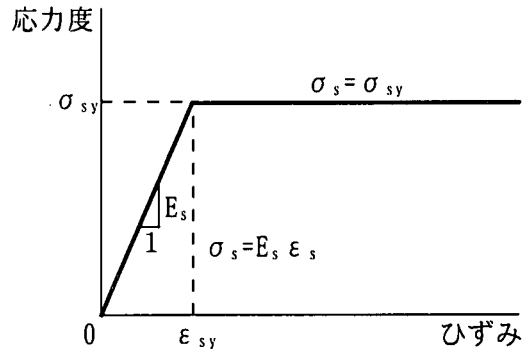


図-6 鉄筋の応力-ひずみ関係

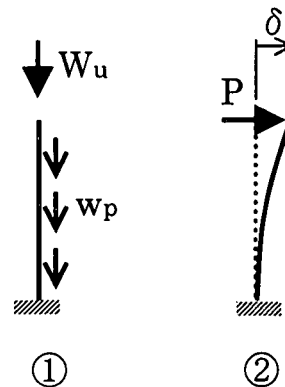


図-7 荷重の載荷方法

4. 各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚のP-δ効果の比較

(1) 橋脚高さ7mの場合

図-8は、橋脚高さが7mの場合に対して、各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚について、慣性力作用位置における水平力と水平変位の関係を示したものである。対象とした耐震設計基準は、日本は道路橋示方書V耐震設計編、土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編、米国はCaltrans Code、欧州はEuro Code 8、ニュージーランドはNZ Codeである。図中、実線は材料非線形と大変形を同時に考慮した場合、破線は材料非線形は考慮したが幾何学的非線形は無視した微小変位解析の場合を示している。橋脚基部が初降伏、終局に達する時点は、それぞれ●で示している。P-δ効果による付加曲げモーメントが考慮されるのは大変形を考慮した場合のみであり、大変形を考慮した場合と微小変位解析を用いた場合を比較することでP-δ効果がどの程度あるかがわかる。また、耐力低下率と水平変位との関係を併せて示した。図中の耐力低下率は、大変形を考慮した場合の水平力 P_N を微小変位で解析した場合の水平力 P_{NL} で除したものである。右下の表には、各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚に対して、P-δ効果が慣性力作用位置の水平力-水平変位関係に及ぼす影響を、初降伏時と終局時に着目して示した。

図より、橋脚高さが7mの場合には、P-δ効果の影響があまり顕著でないことがわかる。慣性力作用位置の水平変位は初降伏時で2cm程度、終局時で20cm程度であり、各橋脚とも同程度である。一方、水平力は、初降伏時で4~14MN、終局時で5~18MNと橋脚によってかなりばらついており、耐震設計基準による設計法の違いがうかがえる。

水平変位に着目すると、各橋脚とも、大変形を考慮した場合と微小変位で解析した場合で、初降伏時、終局時の変位の差は、大きくても3%程度であり、P-δ効果が初降伏時、終局時の変位に及ぼす影響が小さいことがわかる。

水平力に着目すると、大変形を考慮した場合と微小変位で解析した場合の差は、初降伏時で1%以内、終局時で5%以内であり、橋脚高さが7mの場合には、P-δ効果が初降伏時、終局時の水平力に及ぼす影響はそれほど顕著なものではない。また、P-δ効果の影響が現れるのは、初降伏を過ぎてからである。

橋脚による違いをみると、水平耐力が他の橋脚と比べて比較的大きい、CaltransとEuro Code 8を用いて耐震設計された橋脚において、P-δ効果による水平力の低下が終局時に終局水平耐力の2%以内と、他の橋脚

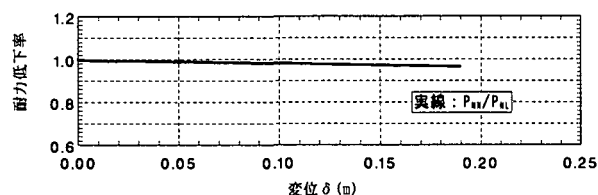
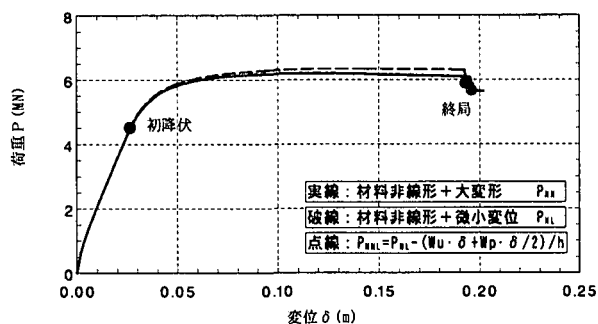
よりも小さくなっている。一方、コンクリート標準示方書を用いて耐震設計された橋脚が水平耐力が最も小さく、P-δ効果による水平力の低下が、終局時に終局水平耐力の5%と最も大きくなっている。このように水平耐力が小さい橋脚でP-δ効果の影響が大きくなっているのは、P-δ効果による水平力の低下量が各橋脚で同程度であるため、水平力の低下量の水平耐力に対する比が、水平耐力が小さい橋脚ほど大きくなっているためである。P-δ効果による水平力の低下量が各橋脚で同程度であるのは、上部構造重量が各橋脚とも同じであり、橋脚高さが7mの場合には橋脚躯体の重量が各橋脚ともほぼ同じであるからである。

図中の点線は、縦軸に、微小変位解析から求めた水平力からP-δ効果による付加曲げによる水平力の低下量を差し引いたもの、横軸に、微小変位解析から求めた水平変位をとってプロットしたものである。付加曲げによる水平力の低下量を差し引いた水平力 P_{NL} は、次式で算出した。

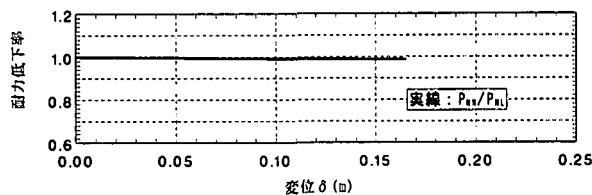
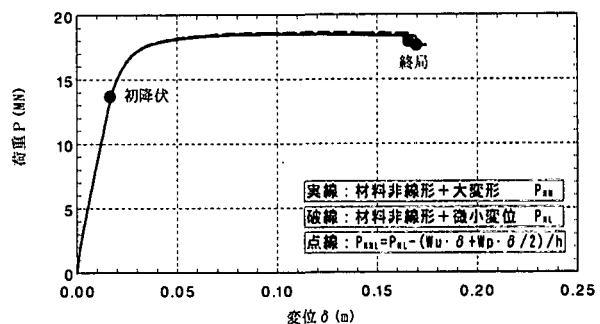
$$P_{NL} = P_N - \frac{W_u \delta + W_p \frac{\delta}{2}}{h} \quad (2)$$

上式において、 P_N はP-δ効果による低下を考慮した水平力、 P_{NL} はP-δ効果は無視した微小変位解析による水平力、 W_u は上部構造重量(=上部構造死荷重反力)、 W_p は橋脚躯体の重量、 δ は慣性力作用位置における変位、 h は橋脚基部から慣性力作用位置までの距離である。上式は、P-δ効果による付加曲げモーメントとして、上部構造死荷重反力によるものと橋脚躯体の重量によるものの両方を考慮したものである。上部構造死荷重反力に対して橋脚躯体の重量が大きい場合には、橋脚躯体の重量による付加曲げモーメントが全体の付加曲げモーメントに占める割合が大きくなる。橋脚躯体の重量による付加曲げモーメントを $W_p \delta / 2$ としているのは、終局時の変形が橋脚基部に集中しており、そのときに橋脚の重心における水平変位は慣性力作用位置の水平変位 δ の1/2にほぼ等しくなると考えられるからである。

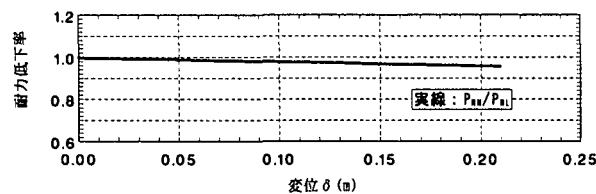
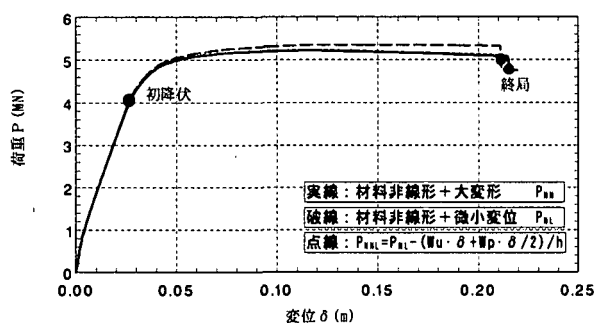
図より、式(2)を用いて、微小変位解析から求めた水平力から、P-δ効果による付加曲げによる水平力の低下量を差し引いた水平力を縦軸にとって水平力-水平変位曲線をプロットした点線は、実線で示した大変形を考慮して求めた慣性力作用位置における水平力-水平変位曲線にほぼ重なっていることがわかる。式(2)を用いれば、大変形を考慮した解析を行わずに、P-δ効果による水平力の低下を比較的容易に精度良く推定出来るものと考えられる。



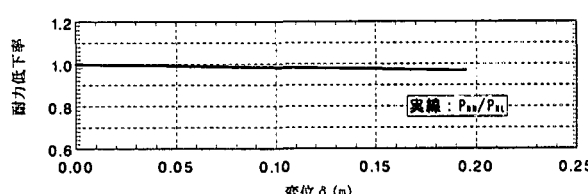
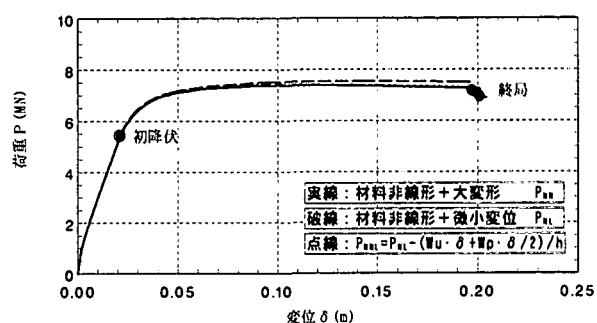
(1) 道路橋示方書



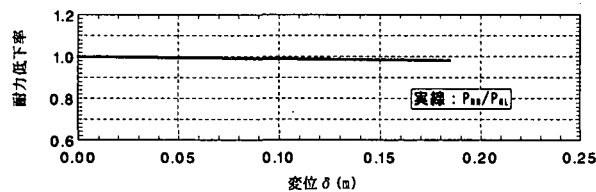
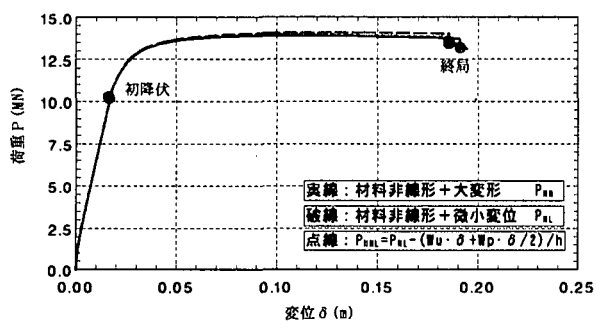
(4) Euro Code 8



(2) コンクリート標準示方書



(5) NZ Code



(3) Caltrans

P-δ効果が水平力-水平変位関係に与える影響

設計基準	事象	①大変形		②微小変位	
		水平力 P(MN)	水平変位 δ(m)	水平力 P(MN)	水平変位 δ(m)
道路橋示方書	初降伏	4.49	0.027	4.52	0.09
	終局	5.64	0.196	5.87	0.96
コンクリート 標準示方書	初降伏	4.03	0.027	4.06	0.09
	終局	4.76	0.216	5.00	0.95
Caltrans	初降伏	10.16	0.017	10.19	1.00
	終局	13.14	0.191	13.41	0.98
Euro Code 8	初降伏	13.61	0.017	13.64	1.00
	終局	17.62	0.170	17.87	0.99
NZ Code	初降伏	5.40	0.021	5.43	0.09
	終局	6.91	0.202	7.15	0.97

図-8 各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚のP-δ効果の比較 (橋脚高さ7m)

(2) 橋脚高さ30mの場合

図-9は、図-8と同様に、橋脚高さが30mの場合に対して、各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚について、慣性力作用位置における水平力と水平変位の関係を示したものである。

図より、橋脚高さが30mの場合には、 $P-\delta$ 効果の影響が、橋脚高さ7mの場合に比較して大きくなっており、特に初降伏を過ぎてから影響が大きいことがわかる。終局時における慣性力作用位置の水平変位は、各橋脚とも1m程度である。終局時の水平力は、断面寸法が大きい道路橋示方書の場合が約13MNと一番大きく、次に大きいのがEuro Code 8で約6MN、その他の橋脚は約2~3MNである。

水平変位に着目すると、各橋脚とも、大変形を考慮した場合と微小変位で解析した場合とで、初降伏時、終局時の変位の差は大きくても2%程度であり、 $P-\delta$ 効果が初降伏時、終局時の変位に及ぼす影響は小さいことがわかる。

一方、水平力に着目すると、大変形を考慮した場合と微小変位で解析した場合の差は、初降伏時で最大5%程度、終局時で最大14%程度となった。

橋脚による違いをみると、水平耐力が他の橋脚と比べて一番大きい道路橋示方書の場合に、 $P-\delta$ 効果による水平力の低下が終局時において終局水平耐力の4%程度であり、耐力低下率が一番小さくなっている。次に水平耐力が大きいEuro Code 8の場合には、終局水平耐力の7%程度である。その他の橋脚では、終局水平耐力の13~14%程度と、耐力低下率が大きくなっている。このように、水平耐力が小さい橋脚ほど、 $P-\delta$ 効果による水平力の低下率が大きい傾向がある。このことは、断面をしばった変形しやすい橋脚の場合には $P-\delta$ 効果による耐力低下が比較的大きくなるが、ある程度の保有水平耐力を持たせた橋脚では $P-\delta$ 効果による耐力低下がそれほど大きくならないということを示唆している。

また、耐力低下率と水平変位との関係を見ると、水平耐力の低下が水平変位にほぼ比例していることがわかる。図中の点線は、微小変位解析によって求めた水平力-水平変位関係から、前述の式(2)を用いて $P-\delta$ 効果による耐力低下を考慮した水平力-水平変位関係を求めた結果である。図より、両者はほぼ一致していることがわかる。なお、橋脚高さが30mの場合には、高さ7mの場合に比較して、橋脚躯体の重量が上部構造重量の約1.7~3.6倍と比較的大きく、慣性力作用位置の水平変位も大きいと、付加曲げモーメントの算出時に橋脚躯体の重量によるものを無視すると、水平力の低下を小さく評価することになる。

6. まとめ

橋脚高さが7mの場合と30mの場合の2ケースについて、日本、米国、欧州、ニュージーランドの5つの耐震設計基準に基づいて設計された鉄筋コンクリート橋脚を対象に、橋脚の水平力-水平変位関係に現れる $P-\delta$ 効果の違いを解析的に検討した結果、次のようなことが明らかになった。

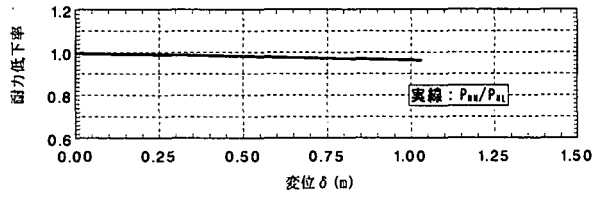
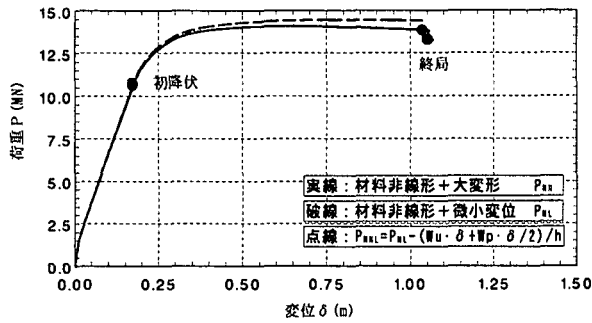
- 1) $P-\delta$ 効果が慣性力作用位置における初降伏時、終局時の水平変位に及ぼす影響は小さい。
- 2) $P-\delta$ 効果による水平力の低下は、断面寸法が他の橋脚に比べて小さく水平耐力が小さい橋脚で大きくなる傾向が認められた。 $P-\delta$ 効果による水平力の低下量は、終局時に着目すると、高さ7mの橋脚の場合には最大で終局水平耐力の5%程度、高さ20mの橋脚の場合には最大で終局水平耐力の14%程度であった。ある程度の保有水平耐力を確保する耐震設計法である道路橋示方書の場合は、橋脚高さが7mの場合も30mの場合も終局時の耐力低下率は約4%であり、比較的小さかった。
- 3) 橋脚躯体高さが高い場合に橋脚重量を無視すると、 $P-\delta$ 効果を過小評価することになる。

以上より、耐震設計において $P-\delta$ 効果の影響が考慮されていなくても、単にじん性能の向上だけでなく同時にある程度の保有水平耐力を確保することを目指して耐震設計されたRC橋脚であるならば、その水平力-水平変位関係に $P-\delta$ 効果が与える影響は小さいと言える。

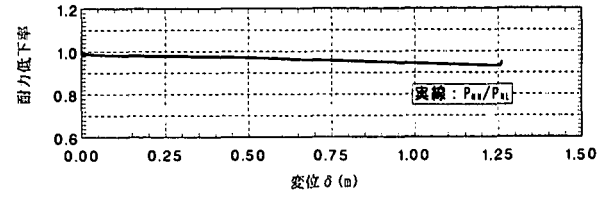
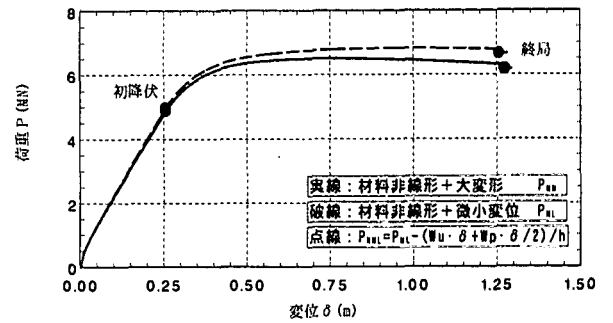
謝辞：道路橋示方書V耐震設計編によるRC橋脚の試設計は、(株)長大 構造事業部 漆原悟氏、板橋美保嬢にやって頂きました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

参考文献

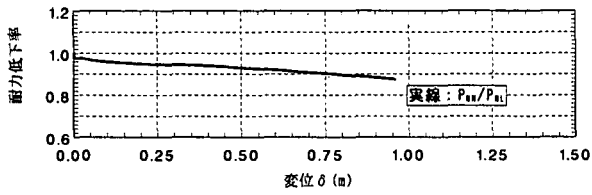
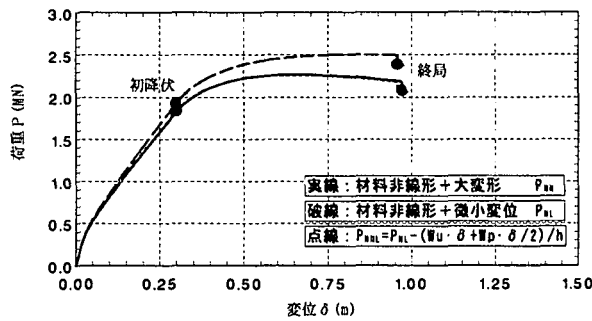
- 1) 土木学会地震工学委員会：耐震設計法の国際化と我が国の対応、第25回地震工学研究発表会特別講演・パネルディスカッション資料、1999。
- 2) Edited by Tanabe : International Seminar on Comparative Performances of Seismic Design Codes for Concrete Structures, Tokyo Japan, April, 1999, Organized by the Concrete Committee of JSCE.
- 3) 森敦：海外との比較から見た日本の耐震設計、橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会 -耐震設計の現状と今後の展望- テキスト；土木学会地震工学委員会 地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会、pp. 29-119, 1999。



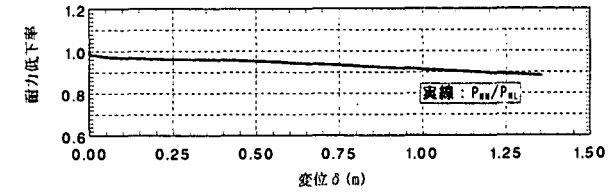
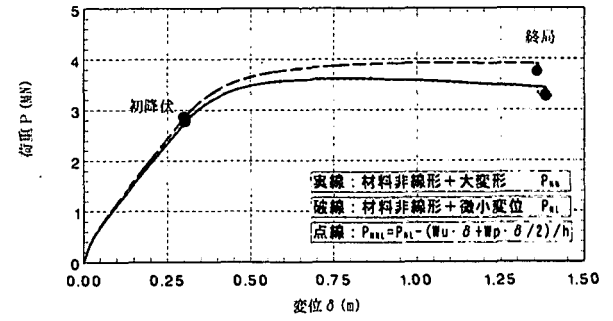
(1)道路橋示方書



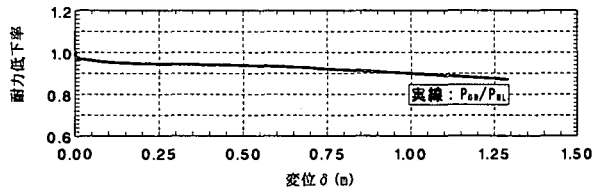
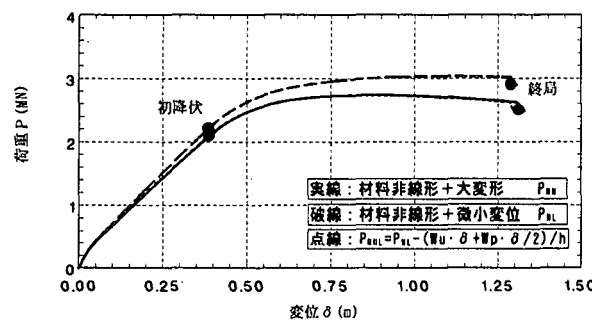
(4)Euro Code 8



(2)コンクリート標準示方書



(5)NZ Code



(3)Caltrans

P-δ効果が水平力-水平変位関係に与える影響

設計基準	事象	①大変形		②微小変位	
		水平力 P(MN)	水平変位 δ(m)	水平力 P(MN)	水平変位 δ(m)
道路橋示方書	初降伏	10.59	0.174	10.69	0.174
	終局	13.28	1.054	13.62	1.037
コンクリート 標準示方書	初降伏	1.83	0.300	1.92	0.298
	終局	2.08	0.973	2.38	0.959
Caltrans	初降伏	2.09	0.389	2.21	0.386
	終局	2.50	1.312	2.90	1.290
Euro Code 8	初降伏	4.87	0.257	4.96	0.258
	終局	6.17	1.276	6.65	1.258
NZ Code	初降伏	2.77	0.304	2.86	0.302
	終局	3.27	1.385	3.74	1.362

図-9 各国の耐震設計基準によって耐震設計されたRC橋脚のP-δ効果の比較 (橋脚高さ30m)