

RC One Point Advice #6

RC 橋脚の耐荷力に関する 2 軸相関特性
 -パラメトリックプッシュオーバー解析による解析的検討-

1. はじめに

本報は、H24 道路橋示方書・同解説V耐震設計編の耐震基準に準拠し、鉄筋コンクリート橋脚の耐荷力に関する 2 軸相関特性について述べるものである。通例、地震力は水平 2 方向から作用するが、現行の設計慣例では、橋軸方向/橋軸直角方向に対して、それぞれ独立に照査することが多い。しかし、レベル 2 地震動作用下では、鉄筋コンクリート橋脚はひび割れ/鉄筋降伏など強非線形域に及ぶことが多く、2 軸方向を別個に検討することは、不十分であると言わざるを得ない。

本論では、ファイバーモデルを用いたプッシュオーバー解析（非線形単調載荷）により、変形挙動（P- δ 関係）を算出した。ここでは、特に斜め方向による変位制御載荷により、2 軸方向に強制変位を与え、特に、耐荷力の 2 軸相関性について数値解析的に考察するものである。

なお、本報は、文献[1]に示した本学修士論文を元に編集したことを付記する。

2. 解析対象の構造物

T 型単柱形式の型鉄筋コンクリート橋脚（RC 橋脚）を対象構造物とし、その諸元を図-1、表-1 を示す。

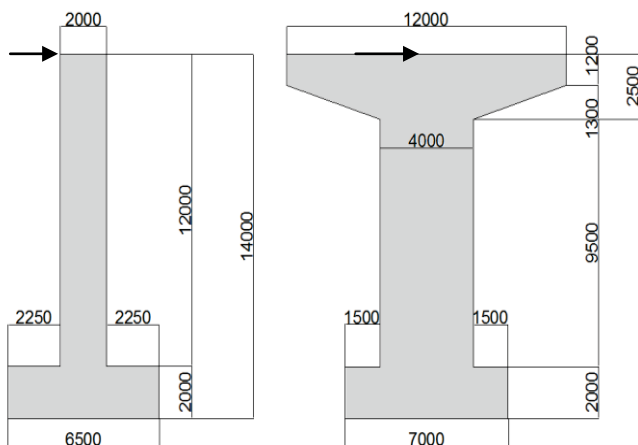


表-1 断面形状と全断面鉄筋比パラメータ

	H(m)	B(m)	主鉄筋比 ρ_t (%)		
			0.59(D25)	0.75(D29)	1.12(D35)
Case1(1 ; 1)	2.0	2.0	0.59(D25)	0.75(D29)	1.12(D35)
			0.54(D25)	0.68(D29)	1.01(D35)
			0.45(D25)	0.57(D29)	0.85(D35)

(a) 構造寸法

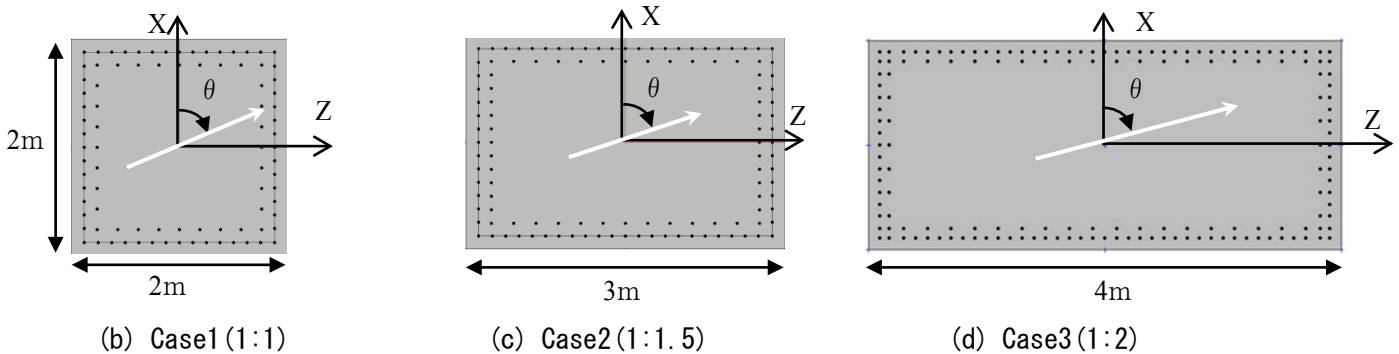
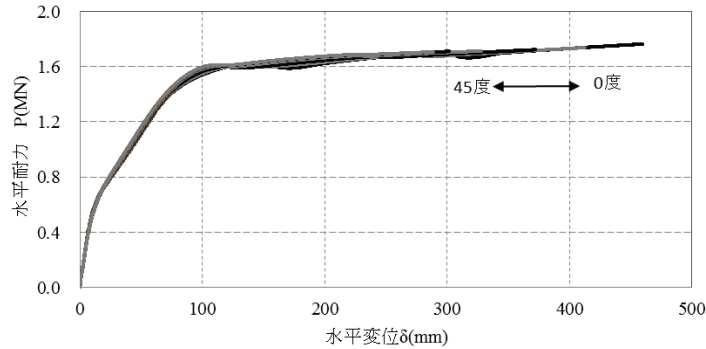


図-1 断面諸元・載荷方向

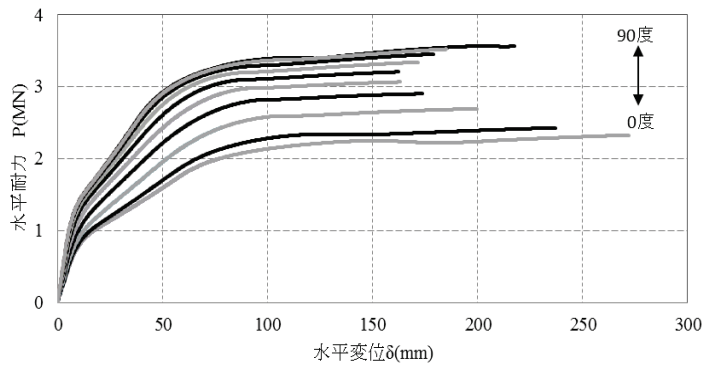
ここで、断面形式として、断面高さ 2m の矩形断面とし、その縦横比を 1:1 (Case1), 1:1.5 (Case2), 1:2 (Case3) とした 3 断面を設定した。これら 3 断面に対して、荷重方向 θ をパラメータとした一連のパラメトリックシミュレーションを実施した。ここで、荷重方向 θ は、図-1 (b), (c), (d) に示すように、X 軸に対する角度として定義し、従って、 $\theta=0^\circ \Rightarrow$ 橋軸方向 (X 軸方向)、 $\theta=90^\circ \Rightarrow$ 橋軸直角方向 (Z 軸方向)、となる。

3. 斜め荷重による変形挙動 (P- δ 関係)

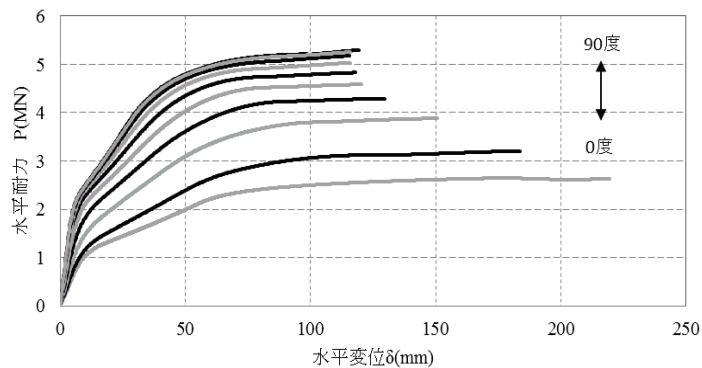
上記に設定した 3 断面の解析結果 (鉄筋量が D29 の場合) として、荷重-変位(P- δ)曲線を図-2 示す。



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図-2 荷重-変位曲線 (D29) の場合

この結果から、荷重角度 θ が大きくなるほど（斜め荷重方向は長軸に移るほど）耐力は上昇することが分かった。ただし、Case1 では正方形断面（対称断面）となり、同一の $P \sim \delta$ 曲線上に推移する。また、変位に関しては、Case1 では45度、Case2 では60度、Case3 では70度にて、最大変位の値が最も低くなった（最大変位とは、H24 道路橋示方書・同解説V 耐震設計編にて定義される限界変位を意味する）。

こちらの理由としては、断面の寸法と比率、荷重角度、鉄筋量すべてが関係していると考えられる。特に、荷重角度に関しては、各 Case の断面にて、対角線上に近い荷重角度の場合、最大変位が最小となっていることが推測できる。

4. 最大耐力の2軸相関特性に関するモデル化

最大耐力に関する2方向(X軸, Z軸方向)の相関特性については、2方向成分 (X軸およびZ軸) の対応する単軸耐力にてよって正規化した下式を用いて考える。

$$\left(\frac{P_u^x}{P_{u0}^x}\right)^\alpha + \left(\frac{P_u^z}{P_{u0}^z}\right)^\alpha = 1 \tag{1}$$

- P_u^x : 終局水平耐力の X 軸方向成分
- P_{u0}^x : X 軸方向の単軸終局水平耐力
- P_u^z : 終局水平耐力の Z 軸方向成分
- P_{u0}^z : Z 軸方向の単軸の終局水平耐力
- α : 係数

このように定義した式(1)は、図-3のような数学的特性をもつ。すなわち、 $\alpha=2$ のとき円、 $\alpha=1$ 直線となる。図2が示すように、 α の増加に従って2軸特性は希薄となる（お互いに影響しない）ことになる。

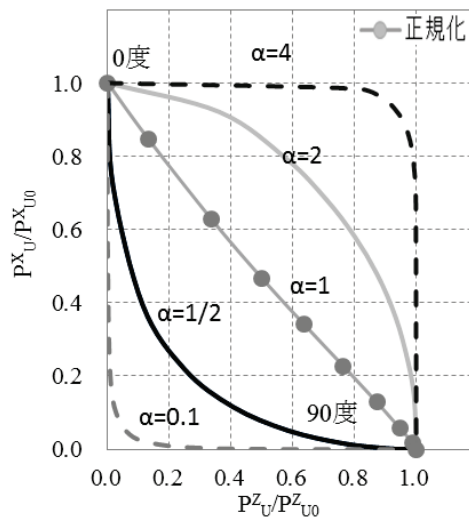


図-3 相関曲線の数学的特性（係数 α をパラメータとしている）

さらに、本研究では長方形断面を取扱うことになるので、 α を m と n の2つに分けて、次式のような数式モデルに修正した。

$$\left(\frac{P_u^x}{P_{u0}^x}\right)^m + \left(\frac{P_u^z}{P_{u0}^z}\right)^n = 1 \tag{2}$$

- m : X 軸の係数
- n : Z 軸の係数

5. 相関特性の考察

一連のパラメトリックシミュレーションにより得られた変形挙動（P- δ 関係）から、最大耐荷力（終局水平耐力の X 軸方向成分と Z 軸成分）を抽出した。まずは、正規化する前の実単位系にて水平 2 軸耐力の相互作用を算出し、2 軸相互作用図として図-4 に示した。

ここでは、式(1)にて定義した終局水平耐力の X 軸方向成分 P_U^x を縦軸、終局水平耐力の Z 軸方向成分 P_U^z を横軸、として、実単位（MN）にて図化している。

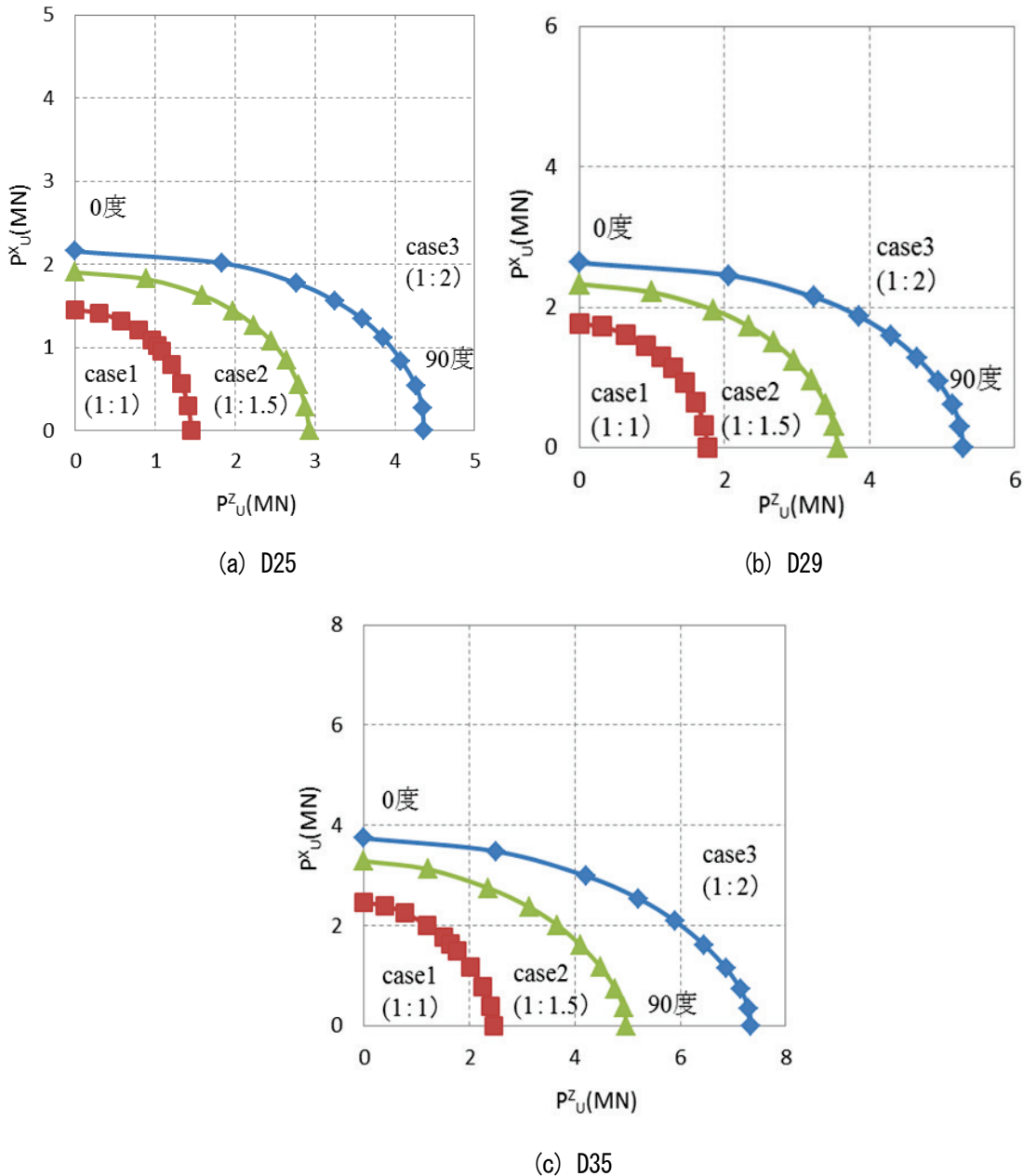


図-4 水平耐力の相互作用図(実単位表示)

ここでは、3つの断面 Case では、断面高さ H を $H=2\text{m}$ と一定としているので、Case1（縦横比 1:1）では、2軸の単軸の同一となり、Case2（縦横比 1:1.5）、Case3（縦横比 1:2）となるほど、Z 軸方向（長辺側）の水平耐力の増加の割合が大きい。主鉄筋量をパラメータとした(a)~(c)を比較すると、(a)と(c)の間で約 2 倍の水平耐力の向上が確認できる。各主鉄筋比を比較すると、(a)D25 では $p_t=0.34\%$ 、(c)D35 では $p_t=0.64\%$ と約 1.9 倍上昇している。主鉄筋比の上昇が、そのまま耐力に影響を及ぼしていることが分かる。

次に、図-4のような実単位表示に対して、各方向の単軸水平耐力により正規化を実施し、図-5のように整理した。

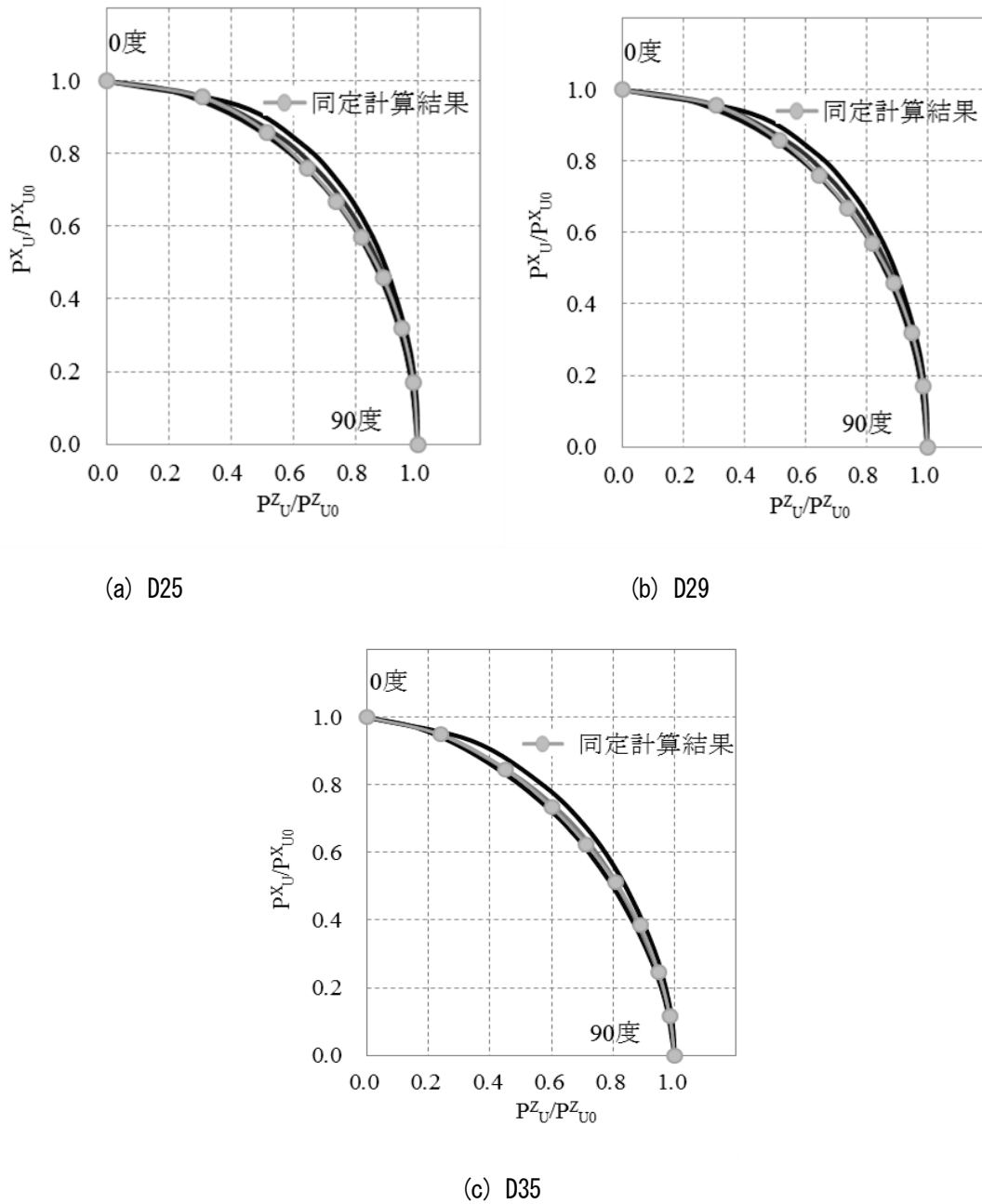


図-5 水平耐荷力の相互作用図(正規化無次元表示)

このような正規化無次元表示により、最大耐荷力の相互作用図が、各 case についてほぼ同一曲線上に推移していると言える。さらに、相互作用図は概ね円形を呈し、係数 m , n の値が 2 に近いということが推測できる。

6. 係数 m, n の同定

前出の一連の解析結果から、係数 m, n の同定を行い、その結果を表-2のように整理した。さらに、これらの係数によるものを、図-5に●として併記した。

また、主鉄筋比(鉄筋径)が大きくなるほど、係数 m, n がともに減少していることが推察される。ただし、このことについては、論理的な考察と更なるパラメトリック解析が必要であり、今後の課題としたい。

表-2 係数 m, n の値

	D25($P_t=0.45\sim0.59\%$)		D29($P_t=0.57\sim0.75\%$)		D35($P_t=0.85\sim1.12\%$)	
	m	n	m	n	m	n
耐荷力P	1.95	2.10	1.82	2.00	1.73	1.76

7. まとめ

本報のまとめとして、パラメトリックシミュレーションの実施手順を整理/再記し、さらに考察を加えた。

- ・単柱形式の鉄筋コンクリート橋脚を対象構造物とし、H24 道路橋示方書・同解説V耐震設計編の耐震基準に準拠して設計した。総計算ケースは、(断面:3Case)×(鉄筋量:3種)×(载荷角度:10)=90 ケース、である。
- ・ファイバーモデルを用いた2軸非線形単調载荷(プッシュオーバー解析)を実施した(文献[4]を参考にしている)。これは、変位制御型斜め载荷により、X軸方向(橋軸方向)とZ軸方向(橋軸直交方向)の2軸方向に同時に変位を付与するものである。この際、斜め角度を10°刻みにセットし、両軸方向の変位比率を変化させた。
- ・得られた変形挙動(P-δ関係)から、終局水平耐力のX軸方向成分 P_u^x とZ軸方向成分 P_u^z を読み取り、2軸相互作用図を作成し、2軸相関特性を考察した。相互作用図に関しては、実単位系、および両軸の単軸耐力 P_{u0}^x と P_{u0}^z に正規化した、2つ方法にて作画した。
- ・以上のような一連の解析作業により、断面形状(縦横比)と鉄筋量の差異による相関特性について、知見を得た。また、正規化することにより、すべて解析ケース(縦横比, 鉄筋量)がほぼ同一円弧上に集約されることが分かった。ただし、さらなる一般化には、多くのパラメトリック解析が必要と思われる。
- ・本報告の解析結果は、本報の冒頭にて指摘した現行示方書の耐震基準の再検討に資することができると思う。

8. 参考文献

- [1] 樋口航平：RC 橋脚の耐荷力と靱性に関する2軸相関特性および多数設計データの定量分析に関する考察、東京都市大学 都市工学専攻 修士論文、2014.3
- [2] 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、社団法人日本道路協会、丸善株式会社、2012.3
- [3] 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、社団法人日本道路協会、丸善株式会社、2002.3
- [4] 吉川・青戸・甲斐：数値シミュレーションで考える構造解析 -ソフトで学ぶ非線形解析と動的応答- 建通新聞社 2009.11