

# 論文 2方向繰返し水平荷重を受ける逆L字型RC橋脚模型実験のFEM3次元解析

大内 一\*1・長沼一洋\*1・米澤健次\*1

**要旨：**2軸曲げとねじりモーメントが合成作用する逆L字型橋脚の繰返し水平載荷実験結果に対してFEM3次元解析を行って、その適用性を検討した。その結果、解析は耐力・履歴特性・終局変位まで良好な予測を与えることが出来た。加えて橋軸方向載荷に伴なう橋軸直角方向への残留変位の増大現象や、偏心水平載荷により発生するねじりモーメントの耐力・履歴特性に与える影響について定量的な説明を行った。

**キーワード：**逆L字型橋脚, 偏心, 繰返し載荷, FEM3次元解析, ねじりモーメント

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートを対象としたFEM非線形解析手法は近年長足の進歩を遂げたが、ソリッド要素をベースとする3次元解析は、特に正負繰返し載荷に関しては実験の少ないこともあり解析例が極めて少ない。土屋等<sup>1)</sup>は、常時偏心軸力のもと、ねじりモーメントと1方向正負水平繰返し載荷を受ける3体のRC橋脚模型実験結果に対して3次元解析を行っている。一方、川島等<sup>2)</sup>は、上部構造の自重が橋軸線と偏心した位置に作用する逆L字型橋脚を対象に、偏心量と載荷方向(1方向および2方向)をパラメータとした繰返し水平載荷実験を行っている。ねじりモーメントの組合せ下では3次元応力状態となり、偏心量が大きくなるほどその影響が大きくなる。本論文は川島らの実験結果に対し、1)著者らが構築してきたFEM3次元非線形解析手法の適用性を検証し、2)特徴的な挙動を説明することを目的とした研究成果の報告である。

## 2. 解析モデルと試験体

### 2.1 要素モデル

図-1に示すように、柱部は以下の要素でモデル化する。コンクリート：ソリッド要素、主鉄筋：トラス要素+接合要素(付着特性考慮)、帯鉄筋：トラス要素(完全付着)。基部は、主鉄筋の抜出しを考慮するため以下のようにモデル

化する。主鉄筋：トラス要素+接合要素(付着特性考慮)。ソリッド要素：フーチング上面で完全固定。基部主鉄筋：アンカ一部分で完全固定。

### 2.2 材料モデル

コンクリートは直交異方性モデルで表現し、3軸応力下の非直交ひび割れモデルを適用した。材料モデルの詳細は文献3),4)を参照されたい。鉄筋の $\sigma$ - $\epsilon$ 履歴特性は

Ciampiのモデル、鉄筋とコンクリートの付着特性は最大強度点を2.69MPa, 1mmとする曲線モデルで表現した(図-2)。

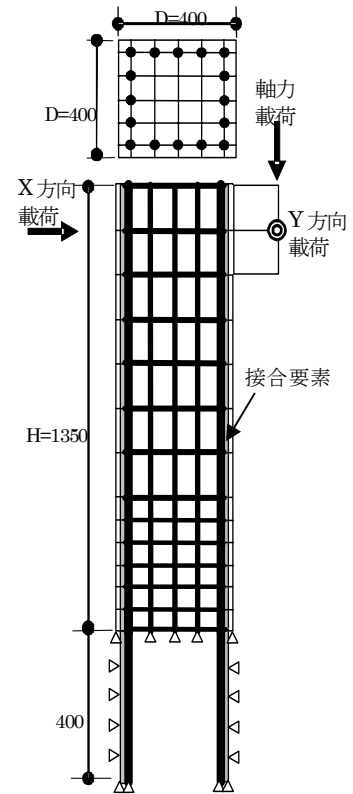


図-1 解析モデル

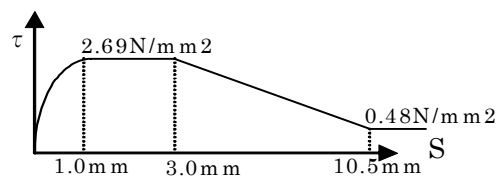


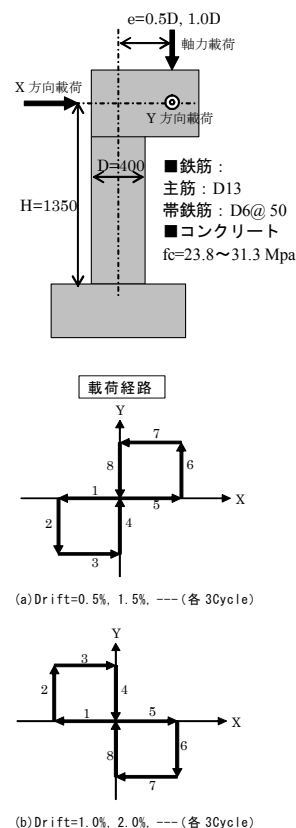
図-2 鉄とコンクリートの付着特性モデル

\*1 (株)大林組技術研究所 工博(正会員)

表-1 解析対象とする試験体 (P1~P8)

偏心量*	X方向荷重	Y方向荷重	2方向荷重
e=0	P1 		P2 
e=0.5D	P3 	P4 	P5 
e=1.0D	P6 	P7 	P8 

\* e: 軸力およびY方向荷重作用点の偏心量, D: 断面辺長



## 2.3 試験体

表-1に、解析対象とする試験体一覧を示す。

## 3. 結果の概要

解析結果の概要を表-2に示す。

### 3.1 最大荷重

偏心軸圧縮力を受け X 方向水平荷重のみの P3,P6 試験体で、耐力が小さくなる正側で誤差が10%以上となる。さらに、ねじりモーメントが作用する P4 試験体の負側耐力、そして、さらに偏心量の大きい P8 試験体の正側耐力も同様に10%以上の誤差を示す。しかしこれら一部のケースを除き、基部軸方向鉄筋の引張降伏で決まる最大荷重を、数%以内の精度で予測できている。

### 3.2 終局変位

中心軸圧縮力を受け X 方向水平荷重のみの P1 試験体では、主筋座屈を考慮しない解析は、大変形域でも数値計算上不安定とならず耐力を保持し続けるため終局変位を定義できない。ねじりモーメントの顕著な影響を受ける P7 試験体は、耐力への影響を受けるものの破壊が局在

化せず、4%ドリフトを超えても耐力低下はともないつつも数値計算上は安定であり、同様に終局変位を定義できない。その他の試験体については、数値計算上不安定となる変位振幅（そのサイクルの最大変位振幅）で解析上の終局変位を定義し、コンクリートの圧壊、かぶり剥落、または顕著な耐力低下に着目して定義した実験値と比較を試みた。その結果良好な対応を得た。ここに、数値計算上の安定性はかぶり部分コンクリート破壊後の解放力の大きさに支配される。なお、変位振幅の増分は表-1中に示すように0.5%である。

### 3.3 荷重-変位関係

3次元応力状態となる P4、P7 試験体の Y 方向荷重-変位（載荷点）関係、および P5、P8 試験体の X 方向荷重-変位（載荷点）関係を図-3に示す。R=0.5/100 変位振幅時 ( $\delta=6.75\text{mm}$ ) の立上り剛性および耐力とも解析値が実験値を全般に上回る。解析ではコンクリートの弾性係数や引張強度を一様に仮定しており、初期の乾燥収縮によるひび割れなどを考慮していないためである。しかしながら、それ以降の

最大荷重や耐力低下，除荷過程を含む履歴ループ形状まで実験結果を良好に予測できている。Y 方向水平荷重のみの P4, P7 試験体では，大変形域での耐力低下は実験結果ほど顕著ではな

いが，ねじりせん断による履歴ループの狭まりについては，とくにその影響が大きくなる P7 試験体の場合にも、実験結果を説明できている。

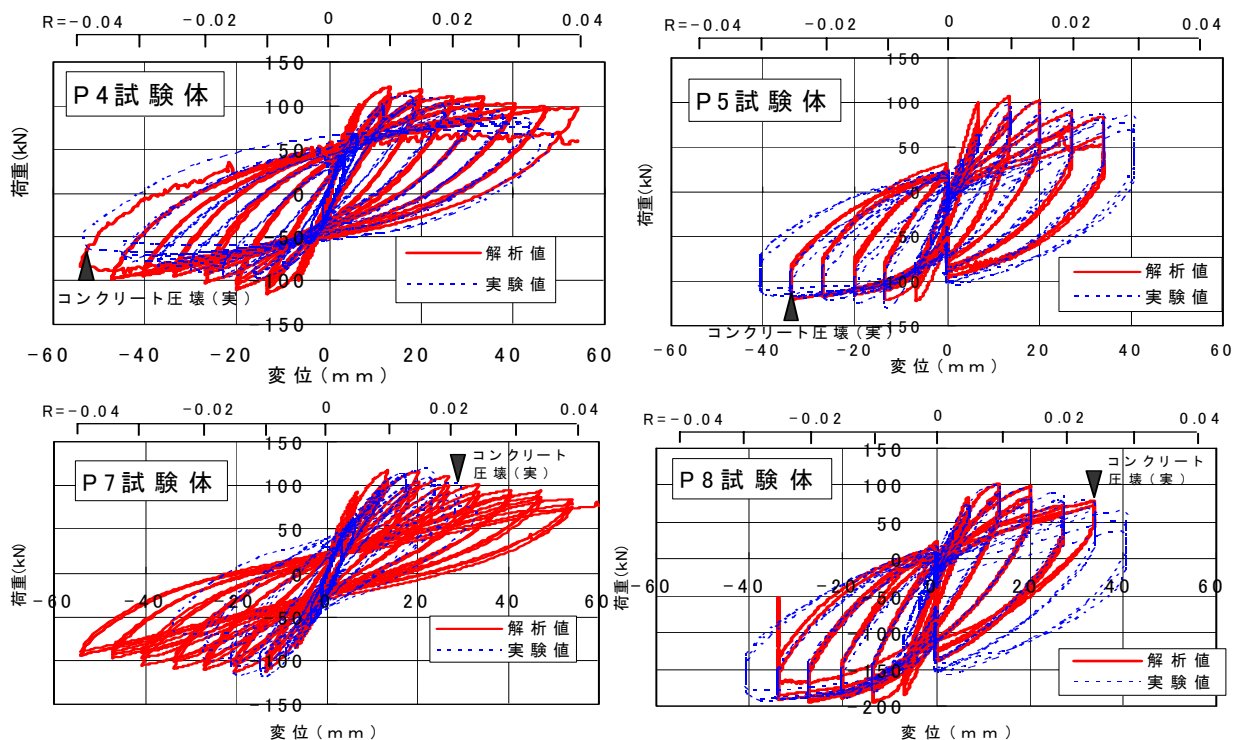
表－2 解析結果概要（最大荷重と終局変位）

試験体	偏心量	水平載荷方向	最大荷重:正荷重(負荷重)			終局変位(ドリフト振幅角)*註		
			実験(kN)	解析(kN)	解析/実験	実験	解析	解析/実験
P1	e=0	X	124(-119)	131(-122)	1.06(1.03)	4.00%	>4.0%	—
P2		X	120(-108)	115(-107)	0.96(0.99)	3.00%	3.00%	1.00
	Y	109(-102)	103(-97)	0.94(0.95)				
P3	e=0.5D	X	108(-130)	131(130)	1.21(1.00)	4.00%	3.50%	0.88
P4		Y	111(-97)	122(-115)	1.10(1.19)	4.00%	4.00%	1.00
P5		X	100(-129)	107(-122)	1.07(0.95)			
		Y	82(-75)	81(-78)	0.99(1.04)			
P6	e=1.0D	X	107(-214)	124(-196)	1.16(0.92)	3.50%	3.50%	1.00
P7		Y	119(-117)	117(-113)	0.98(0.97)	2.00%	>4.0%	—
P8		X	100(-192)	102(-192)	1.02(1.00)			
		Y	87(-80)	71(-74)	0.82(0.93)			

\* 註: 終局変位の定義

実験値: コンクリートの大きな圧壊、かぶり剥落、または顕著な耐力低下が起こる変位振幅(ドリフト角)

解析値: 数値計算上不安定になる変位振幅(ドリフト角)



図－3 荷重－変位関係 (P4, P5, P7, P8 試験体)

#### 4. 着目すべき挙動と分析

3. では解析の適用性について概説したが、ここではいくつかの興味ある挙動について、説明を加える。

##### 4.1 偏心軸圧縮方向への残留変位

偏心軸圧縮を受ける試験体の場合、Y方向のみの水平荷重であっても剛性低下に伴ない、偏心軸力による曲げモーメントによりX方向に残留変位の蓄積されていくことが実験で観察されている。図-4にP4試験体の荷重前半の結果を示すが、実験・解析ともに逆くの字型の履歴を示す。観点を変えて偏心軸力による曲げモーメントとX方向変位  $D_x$  の比で定義する曲げ剛性 ( $K_m = N_0 \times e / D_x$ ) の変化を考えてみる。図-5にはY方向変位  $D_y$  に対する曲げ剛性の推移

を示すが、当然のことながら逆への字型履歴を示す。同一変位サイクルでは、 $D_y$  の増加に伴い剛性は増大し、 $D_y = 0$  で最小になる。また、変位振幅が増大するにつれ、逆への字型ループはならされていく。図-6に  $R=1/100(D_y=13.5\text{mm})$  変位振幅時の基部コンクリート断面の圧縮領域を示す。 $D_y$  の増大にともないその圧縮応力負担縁が曲げ剛性の回復に寄与するのが分かる。さらに変位振幅が大きくなると、Y方向荷重による引張残留ひずみ領域が広がるため、圧縮領域は次第に細まって来る(図中  $R=3/100(D_y=40.5\text{mm})$  変位振幅時)。加えて大ひずみ履歴により剛性も低下する。これが図-4に示した逆くの字型ループの均されていくメカニズムである。

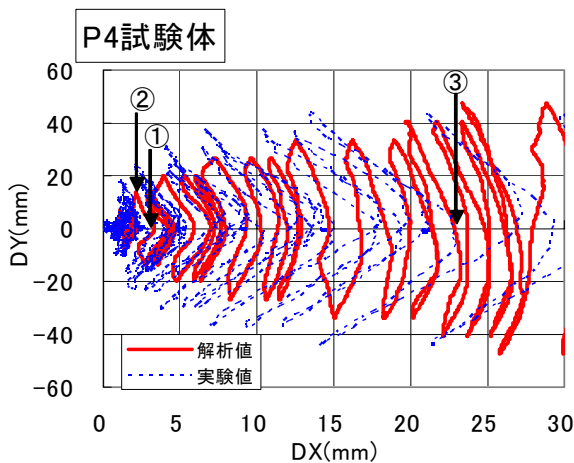


図-4 残留変位の蓄積 (P4 試験体)

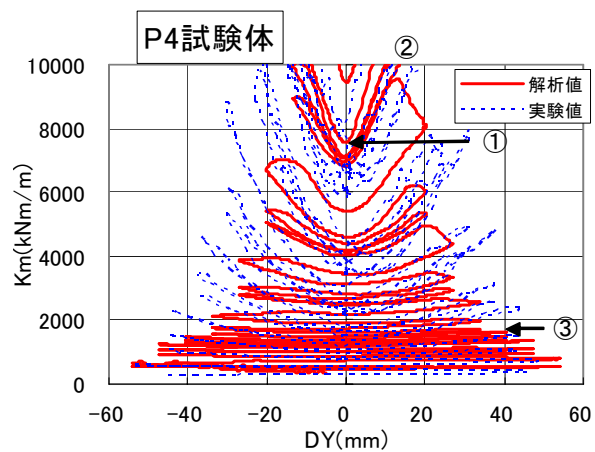
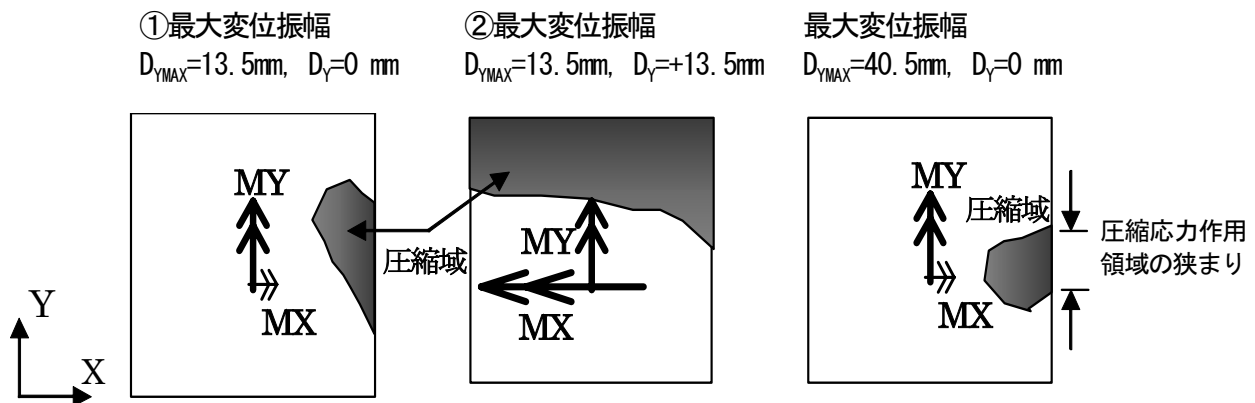


図-5 X方向曲げ剛性の推移 (P4 試験体)



MY: 偏心軸力による曲げモーメント, MX: Y方向荷重による曲げモーメント

図-6 基部断面圧縮応力作用領域 (P4 試験体)

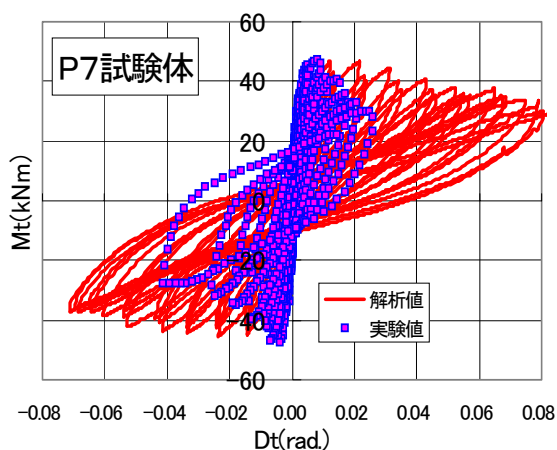


図-7 ねじりモーメント-ねじり角  
関係 (P7 試験体)

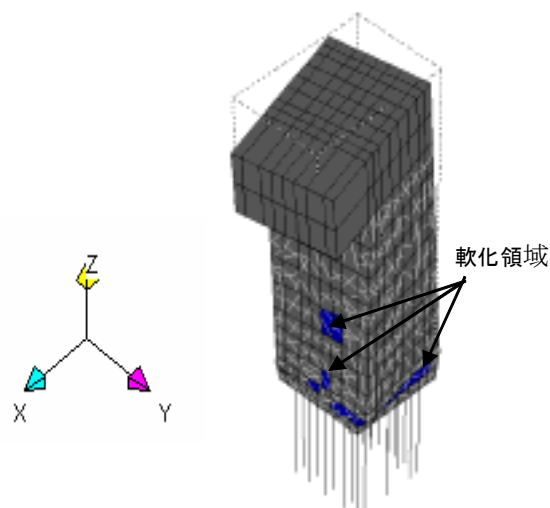


図-8 コンクリートの破壊状況 (P7 試験体解析)

#### 4.2 偏心水平荷重によるねじり変形

P7 試験体を取り上げ、偏心水平荷重にともなうねじり挙動を検討する。図-7にねじりモーメント ( $M_t = P_y \times e$ ) とねじり角 (荷重位置断面の辺直行方向変位差/距離) の関係を示す。実験では、ねじり変形の小さい段階で正負の対称性を示すものの、変位振幅の増大にともない耐力低下しつつ負側で増大する。破壊の偏在化と考えられる。これに比較し、解析は正負で対象、かつ3.3で述べたように耐力低下も比較的緩やかである。解析ではコンクリートのひび割れに対して一様な引張強度特性を仮定していることもあり、ねじりせん断にともなう離散性の強い斜めひび割れや、最終的な局在的な破壊現象は起こっていない。

図-8および9には、 $R = +3/100$  ( $\delta_y = +40.25 \text{ mm}$ ) におけるコンクリートの破壊状況、およびウェブ面の帯鉄筋降伏状況を示す。破壊モードは、中腹部でコンクリートの軟化がみられるものの基本的には基部の2軸曲げ破壊である。図中には、4.3で後述するように、参考として実施した無偏心水平荷重解析での帯鉄筋降伏状況を示す。無偏心水平荷重のケースは基部に降伏が集中しているのに対して、偏心水平荷重の場合、中腹部まで帯筋降伏域が及んでおり、ねじりモーメントの影響が明白に現れている。

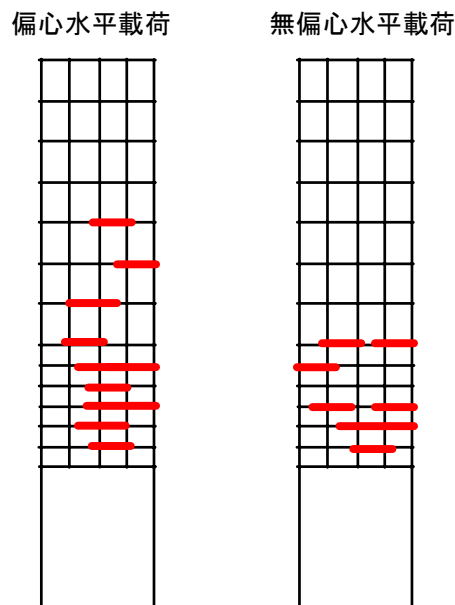


図-9 帯鉄筋の降伏状況 (P7 試験体解析)

#### 4.3 ねじりモーメントの復元力特性への影響

偏心水平荷重にともない発生するねじりモーメントの耐力や履歴特性への影響を調べる目的で、意図的に水平荷重のみ無偏心とした解析を行った。ここでは、P4およびP7試験体に関しその結果を比較紹介する。

図-10および11に得られた荷重-変位関係を示す。P4試験体の場合、耐力、履歴特性に大きな違いは観られないが、偏心水平荷重によりエネルギー吸収性能はやや低下する。一方、偏



心量の大きな P7 試験体の場合には、無偏心水平荷に比較し、耐力、エネルギー吸収性能は顕著に低下している。

図-9で比較したように、無偏心水平荷の場合は、試験体高さ 1/3 程度の断面にも一部降伏域が観られるが、脚部曲げ圧縮域で降伏している。一方、偏心水平荷の場合は、試験体高さ 1/2 以上にまで帯筋降伏域が広がっている。これは水平荷にともなうせん断力に加え、ねじりモーメントによるせん断ひび割れ領域が拡大していることを意味する。

## 5. まとめ

偏心量と荷方向をパラメータとした川島等の 8 体の模型試験結果<sup>1)</sup>に対して、FEM3 次元解析を行いその適用性を検討した。以下に得られた結果と課題を箇条書きで示す。

- ・耐力、および破壊に至る履歴特性を良好に予測することが出来た。
- ・主筋座屈を考慮していない解析では、一般にかぶりコンクリートの破壊が数値計算の安定性を支配する。計算上不安定となる変位振幅で定義した解析値は、コンクリートの圧壊、かぶり剥落、または顕著な耐力低下で定義した実験結果を良好に予測できた。
- ・偏心軸力存在下で、橋軸方向繰返し水平荷による橋軸直角方向への残留変位増大メカニズムを説明出来た。

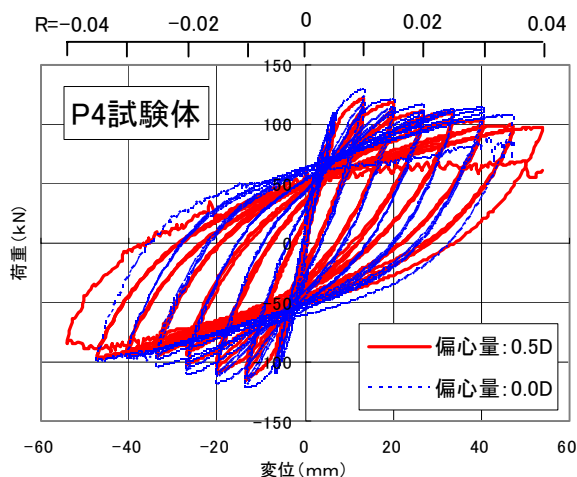


図-10 偏心荷の影響 (P4 試験体) : 解析値比較

- ・ 偏心水平荷にともなうねじりモーメントの耐力や履歴特性に与える影響を定量的に示した。
- ・ 主筋座屈考慮した解析が今後の課題である。

**謝辞：**貴重な実験データを快く提供頂いた東京工業大学川島一彦教授、およびご協力頂いた同大学院博士後期課程永田聖二さんに深謝致します。

## 参考文献

- 1) 土屋智史他：常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断を複合荷したRC柱の非線形三次元有限要素立体解析，土木学会論文集 No. 683/V-52, pp131-143, 2001. 8
- 2) 川島一彦他：逆L字型鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究，土木学会論文集 No. 745/I-65, pp. 171-189, 2003. 10
- 3) 米澤健次他：正負繰返し荷重を受けるRC柱の三次元FEM解析，コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.43-48, 2003
- 4) Naganuma, K. et al. :Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three Dimensional Finite Element Method, 13th WCEE, Paper No.586, Aug. 2004

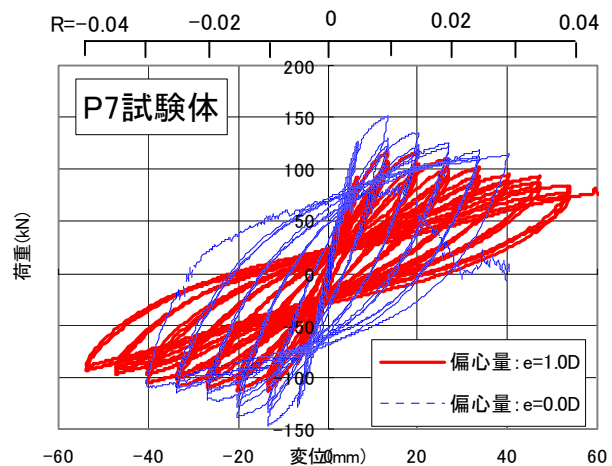


図-11 偏心荷の影響 (P7 試験体) : 解析値比較