

逆L形八角形鋼製橋脚の繰返し載荷実験及び 弾塑性解析による研究

鈴木真一¹・塚本芳正²・鈴木森晶³・青木徹彦⁴

¹学生会員 愛知工業大学大学院修士課程 建設システム工学専攻(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

²学生会員 愛知工業大学大学院修士課程 建設システム工学専攻(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

³正会員 博(工) 愛知工業大学助教授 工学部土木工学科(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

⁴正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科(〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

都市高速など市街地における高架橋は、立地的な条件から様々な構造形態の橋脚が使用されている。なかでも逆L形鋼製橋脚のような上部工重量が偏心載荷される橋脚はT形鋼製橋脚に比べ、偏心による付加曲げが作用するため、地震後の残留変位が張出し方向に大きく生じることが予想される。このため橋脚の機能保持の観点からこの影響を検討しておくことは重要である。本研究では、鉛直荷重が偏心して作用した八角形鋼製橋脚について等荷重繰返し載荷実験および、汎用構造解析プログラムDIANAによる弾塑性有限変位解析を行い、偏心パラメータ e/r (e =偏心量, r =橋脚の断面2次半径)が強度や変形性能に及ぼす影響を検証した。

Key Words: *eccentrically loaded, inverted L-shaped, octagonal section, cyclic loading test, FEM analysis*

1. はじめに

都市高速など市街地における高架橋は、立地的な条件から様々な構造形態の橋脚が使用されている。なかでも逆L形鋼製橋脚のような上部工重量が偏心載荷される橋脚はT形鋼製橋脚に比べ、偏心による付加曲げが作用するため、地震後の残留変位が張出し方向に大きく生じることが予想される¹⁾。このため橋脚の機能保持の観点からこの影響を検討しておくことは重要である。

本研究では、偏心パラメータ e/r (e =偏心量, r =橋脚の断面2次半径)を定義し、偏心パラメータが強度と変形性能に及ぼす影響を検証するため、鉛直荷重が偏心して作用した鋼製橋脚の等荷重繰返し載荷実験を計画、実施した。本研究で用いた供試体は、正八角形断面である。八角形断面は箱型断面に比べ、光の影が縦方向に細長く入るために、実際の寸法よりも細長くスマートに見えるという利点があるほか、断面構成要素の幅厚比が小さくできるため局部座屈が生じにくく、耐震性能上有利と考えられる^{2)~3)}。また、この実験結果を対象とし、汎用構造解析プログラムDIANAによる弾塑性有限変位解析を行い、実験結果を再現し得る有効な解析条件を検討し、偏心パラメータ e/r が強度と変形性能に及ぼす影響を検証した。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体は実橋脚の1/3~1/4を想定した縮尺モデルであり、材質はSS400、コーナー部に半径 $R=100\text{mm}$ で曲げ加工を施した補剛材を有する板厚 $t=6\text{mm}$ の正八角形補剛断面である。供試体概要図を図-1、供試体寸法および各パラメータを表-1に示す。表-1における幅厚比パラメータ R_R および細長比パラメータ λ は次式により定義される。

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{4n^2\pi^2 E}} \quad (1)$$

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

ここで、 b =構成板の板幅、 t =構成板の板厚、 ν =ポアソン比、 n =構成板が補剛材によって区切られるパネルの数、 σ_y =構成板の降伏応力、 E =ヤング率、 h =供試体高さ、 r =断面二次半径である。

材料特性は、供試体から採取したJIS5号試験片を製作し、引張試験により求めた。表-2にその結果を示す。

実験は本研究で定義する偏心パラメータ $e/r=0, 1.0$ (e :鉛直荷重載荷点から橋脚中心までの偏心量, r :橋脚断面の断面二次半径)を対象とし各1体、計2体行う。

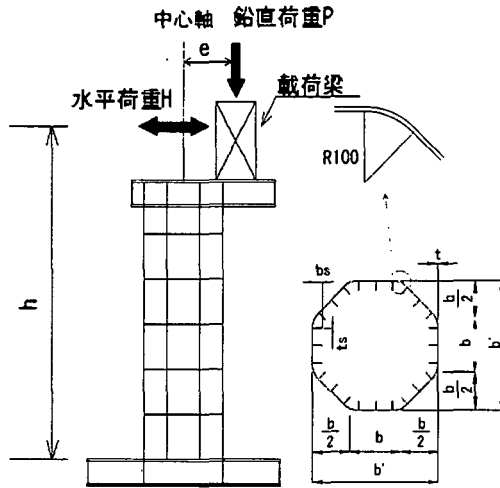


図-1 供試体概要図

(2) 実験方法

実験で用いる降伏変位 δ_y は、供試体の座屈が予想される圧縮側基部（下部から250mm）にひずみゲージ5枚を等間隔に張付け、その平均値が引張試験で得られる降伏ひずみ ε_y に達したときの水平変位と定義する。またこのときの水平荷重を降伏荷重 H_y とする。上部工重量を想定した鉛直荷重は供試体上部に載荷梁を設け、2000kN アクチュエータ2基を鉛直方向に取付け載荷した。また、水平荷重は4000kN アクチュエータ1基を用いて載荷した。

載荷方法は従来の等変位繰返し載荷法とは異なり、等荷重繰返し載荷法⁴⁾とする。これは、逆L形鋼製橋脚は上部工重量が橋脚の中心軸に対して偏心しているため、鉛直荷重載荷時に付加的なモーメントが生じる。このため張出し側の耐力と、その逆側の耐力に差が生じる（以後、張出し側を(+), その逆側を(-)とする）。この状態で地震時に正負ほぼ同量の繰返し水平力が橋脚頂部に作用すると、従来、偏心のない橋脚で行われていたように、橋脚が(+方向)に生じた変位と同量だけ(-方向)に戻されるということは逆L形鋼製橋脚では考えにくい。したがって、本実験では(+方向)に作用した荷重を(-方向)でも同量の荷重を作用させることがより実際の地震時の挙動に近い方法と考え、等荷重繰返し載荷法を採用する。

鉛直荷重 P においては、次に示す有効座屈長の概念に基づき、はり-柱強度相関式により計算し、算出された P のうち小さい方の値を鉛直荷重として採用した。軸力比 P/P_y は $e/r=0$, $e/r=1.0$ それぞれ0.17, 0.13である。

$$\frac{\alpha P}{P_u} + \frac{C_m \alpha M_0}{M_y (1 - \alpha P/P_y)} \leq f \quad (3)$$

$$\frac{\alpha P}{P_y} + \frac{\alpha M_0}{M_y} \leq f \quad (4)$$

ここで、 α =安全率(=1.14), C_m =等価モーメント修正係数(=0.85), P_E =オイラーの座屈強度, P_y =降伏軸力, P =鉛直荷重, M_y =降伏モーメント, P_u =道路橋示方書⁶⁾に示される局部座屈を考慮した中心軸圧縮強度である。

表-1 供試体寸法及び各パラメータ

全幅	b' (mm)	900
補剛板幅	b (mm)	373
補剛板板厚	t (mm)	6.00
補剛材幅	b_s (mm)	65.0
補剛材板厚	t_s (mm)	6.00
供試体高さ	h (mm)	3700
断面二次半径	r (mm)	317
細長比パラメータ	λ	0.296
幅厚比パラメータ	R_R	0.326
補剛材細長比パラメータ	λ_s	0.292
$\gamma_{1\gamma}$		1.595

表-2 供試体材料特性

ヤング率	E (GPa)	214
ポアソン比	ν	0.295
降伏応力	σ_y (MPa)	340
降伏ひずみ	ε_y (μ)	1589

3. 実験結果

(1) 水平荷重-水平変位

$e/r=0$, $e/r=1.0$ の水平荷重-水平変位履歴曲線をそれぞれ図-2, 図-3に示す。縦軸に水平荷重を、横軸に水平変位を示す。 $e/r=1.0$ の履歴挙動は、(+方向)で生じた変位が(-方向)では戻りきらない結果となった。したがって、逆L形鋼製橋脚はT形鋼製橋脚に比べ残留変位が生じやすく、震災時の機能保持の観点から、新たに残留変位に関する評価式を構築する必要がある。

(2) 包絡線

図-4に実験結果である $e/r=0$ と $e/r=1.0$ における水平荷重-水平変位の包絡線を示す。 $e/r=1.0$ は $e/r=0$ に比べ最大荷重が10%ほど低下した。また最大荷重以降の挙動において、 $e/r=0$ は急な耐力低下がみられたのに対し、 $e/r=1.0$ は耐力低下が緩やかである。

(3) エネルギー吸収量

エネルギー吸収量は、地震時に構造物が地震外力をどの程度吸収・消散できるかという耐震性能を評価する上で重要な指標である。図-5に累積エネルギー吸収量と載荷ループの関係を示す。縦軸に累積エネルギー吸収量を、横軸に載荷ループを示す。最大荷重に到達するサイクルまでの累積エネルギー吸収量は $e/r=0$ に比べ $e/r=1.0$ は1/4の吸収量しかない。これは偏心モーメントにより、(+方向)で生じた変位まで(-方向)の変位が戻りきらないため、断面全体で効率良くエネルギー吸収をしていないためと考えられる。この結果(-方向)での損傷がなく耐力低下が緩やかであると考えられる。吸収エネルギーは応答変位を小さくする効果があるので、逆L形鋼製橋脚は予想以上に大きな応答が生じる恐れがあることに注意が必要である。

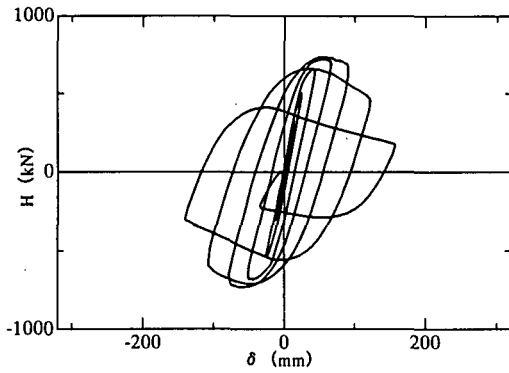


図-2 $e/r=0$ 履歴曲線

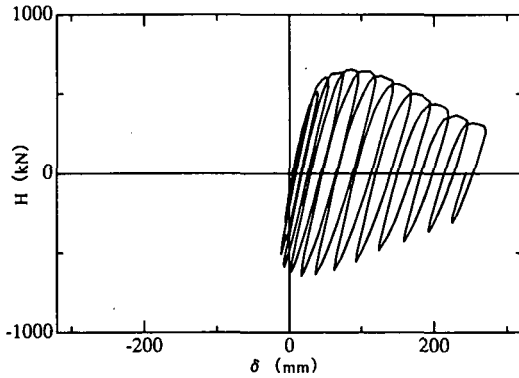


図-3 $e/r=1.0$ 履歴曲線

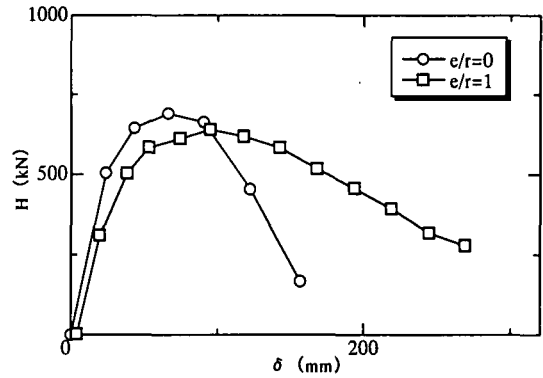


図-4 包絡線

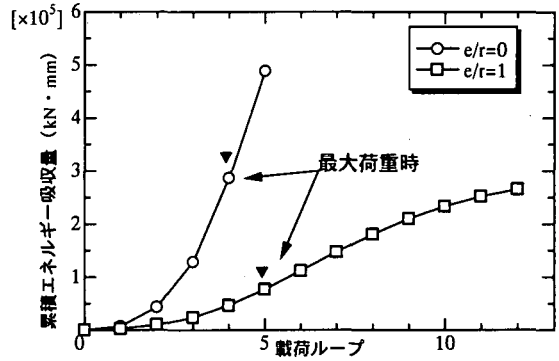


図-5 累積エネルギー吸収量

4. 解析概要

(1) 解析モデル

本研究の解析対象は、図-6 に示した片持ち八角形断面柱であり、実験の結果を比較対象とした。

解析は汎用構造解析プログラム DIANA[®] を用いて行った。解析対象は実験を行った供試体を想定してモデル化を行った。解析モデルにおいては対称性を考慮して全体モデルの 1/2 とし、要素分割は一辺 6 分割とし、高さ方向の分割に関しては、局部座屈が発生すると予想される基部から 500mm までを 8 分割、その上部に関しては分割数を減少させている。使用した要素は、橋脚部に 4 節点シェル要素とし、載荷治具のモデル化には 3 節点シェル要素を使用した。

(2) 解析条件

引張試験から得られる応力-ひずみ曲線を用いて多直線モデルの単軸弾塑性挙動を仮定し、また多軸応力下の弾塑性挙動は、Von Mises の降伏条件式および移動硬化則を用いた。

解析対象の橋脚には上部工重量として一定の圧縮軸力 P を定常的に作用させた状態で、実験と同様の載荷方法で水平力を繰り返し与えた。なお、降伏変位 δ_y は実験で得られた値を用いた。なお、解析には初期不正である初期たわみと残留応力は考慮しない。

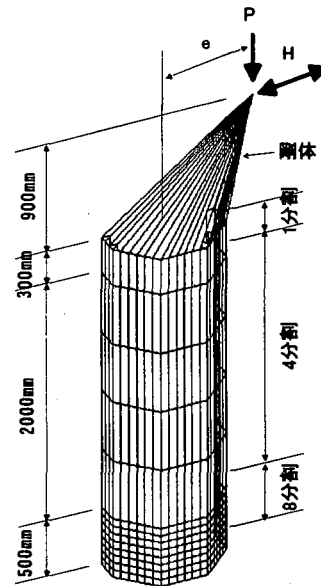


図-6 解析モデル

5. 解析結果

(1) 実験結果との比較

$e/r=0$ 、 $e/r=1.0$ の水平荷重-水平変位履歴曲線および、実験結果の包絡線をそれぞれ図-7、図-8 に示す。縦軸に水平荷重を、横軸に水平変位を示す。

解析結果は、荷重が増加する硬化域において実験結果と大きな差が生じている。これは材料のひずみ硬化則に用いている移動硬化則が、弾性域から塑性域に移行する降伏状態を適切に表現しきれていないためと考えられる。

(2) 偏心パラメータの影響

図-9に $e/r=0, 1.0, 2.0, 3.0$ における水平荷重-水平変位の包絡線(解析値)を示す。 $e/r=1.0$ の等荷重繰返し載荷法での包絡線が、単調載荷での結果とほぼ等しい結果となったことから、 $e/r=2.0, 3.0$ の解析曲線は、単調載荷結果を示す。実験と同様に、 $e/r=0$ は急な耐力低下がみられたのに対し、 $e/r=1.0, 2.0, 3.0$ は耐力低下が緩やかである。これは先に述べたように、 $e/r=1.0, 2.0, 3.0$ は(-)方向への塑性変形によるエネルギー吸収が小さいため、(+)方向への耐力低下が緩やかになったと考えられる。また、最大荷重においては偏心パラメータ e/r が大きくなるにつれ、低下する傾向があり、 $e/r=3.0$ は $e/r=0$ に比べ最大荷重が28%低下した。

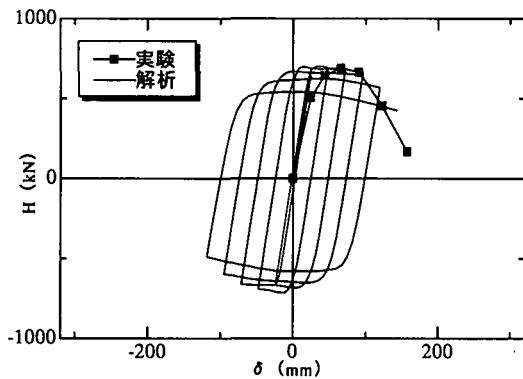


図-7 $e/r=0$ 履歴曲線

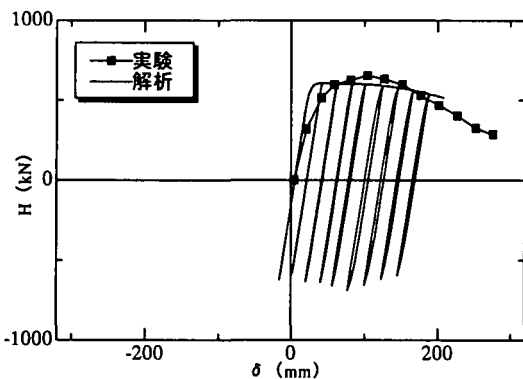


図-8 $e/r=1.0$ 履歴曲線

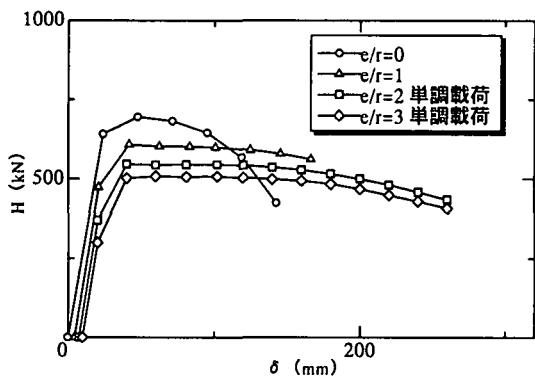


図-9 包絡線

6. まとめ

本研究では、上部工重量が偏心載荷される橋脚の耐震設計に必要な基礎データを得ることを目的として、八角形鋼製橋脚 $e/r=0$ と $e/r=1.0$ に対して、等荷重繰返し載荷実験を行った。また、この実験結果を比較対象とした弾塑性有限変位解析を行い、実験結果を再現し得る有効な解析方法を検討し、偏心パラメータ e/r が強度と変形性能に及ぼす影響を調べた。得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 等荷重繰返し載荷実験を行ったところ、 $e/r=1.0$ の供試体は(+)方向で生じた変位が(-)方向では戻りきらない結果となった。したがって、逆L形鋼製橋脚はT形鋼製橋脚に比べ残留変位が大きく生じる傾向があると考えられる。
- 2) 逆L形鋼製橋脚はT形鋼製橋脚に比べ残留変位が生じやすく、エネルギー吸収量が期待できないことから、耐震安全性については十分注意が必要である。
- 3) 荷重が増加する硬化域において実験結果と解析結果に大きな差が生じている。これは、材料のひずみ硬化則に用いている移動硬化則が、弾性域から塑性域に移行する降伏状態を適切に表現しきれていないためと考えられる。したがって、さらに精度を高めるには修正二曲面モデルや3曲面モデルなどの硬化則が必要となろう。
- 4) 解析結果より、偏心パラメータ e/r が大きくなるにつれ、最大荷重が低下する傾向があり、 $e/r=3.0$ は $e/r=0$ に比べ最大荷重が28%低下した。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, 本間大介, 芳崎一也: 鉛直力が偏心して作用する鋼製橋脚のハイブリッド応答実験, 土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 197-206, 1999. 7.
- 2) 山田尚之, 葛西昭, 宇佐美勉: コンクリートを部分的に充填した鋼製八角形断面柱の最適充填率と変形能に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 237-242, 1997. 3.
- 3) 前野裕文, 宇佐美勉, 葛西昭, 岡本隆, 水谷慎吾, 魚井啓次: コンクリート部分充填鋼製八角形断面橋脚の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 189-199, 1998. 3.
- 4) 成瀬孝之, 青木徹彦, 鈴木森晶: 繰返し等荷重を受ける逆L形鋼管橋脚の強度と変形性能に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 45-55, 2001. 3.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 丸善, 1996.
- 6) DIANA-7.2 User's Manual, 2000. 4.

(2001. 5. 25 受付)