

2 方向水平外力を受ける鋼製橋脚の強度と変形能

鳥居純子¹・成田篤哉¹・葛西昭²・宇佐美勉³

¹ 学生会員 名古屋大学工学部社会環境工学科社会資本工学コース(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

² 正会員 博士(工学) 名古屋大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³ フェロー会員 D.Sc. 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

1. 緒言

鋼製橋脚に限らず、土木構造物の従来の耐震設計では、研究成果が発展途上であることも受けて、地震外力の入力方向は1方向に限定されたものである。現行の道路橋示方書¹⁾でも2方向の慣性力を橋軸方向と橋軸直角方向に対して独立に耐震検討するとしている。しかし既応の研究より、実際の地震時における鋼製橋脚の耐震性能を十分に評価しているとは言い難い。

2方向水平外力を想定した研究は近年進められ、鋼製橋脚においては杉浦ら²⁾あるいは小畑ら³⁾による実験的検討、そして永田ら⁴⁾による解析的検討などがある。しかし、これらの研究は2方向外力を受ける場合の応答性状に重点があり、限界性能については述べられていない。また、RC橋脚に関しては、荻元ら⁵⁾、藤倉ら⁶⁾そして早川ら⁷⁾の検討がこれにあたるが、設計法を念頭においた検討まではされていない。

そこで本研究では、耐震照査法の完備の一環として、耐震設計における限界値について検討するために、角部の影響のないパイプ断面を有する鋼製橋脚に、水平2方向から様々な繰り返し水平変位を与えた上で、その結果から合理的な限界値（強度および変形能）を定義し、水平2方向地震動を想定した設計法の提案を行うことを主目的とした。

2. 2方向水平力を想定した耐震設計について

鋼製橋脚直下に入射される水平方向地震動に対して、その応答を例えば橋脚頂部を基部からの相対変位で見ると、図-1のような複雑な軌跡を描くことは容易に想像できる。これを大まかに捉えると、卓越方向への変位の大きさと、その直角方向にどの程度拡がりがある

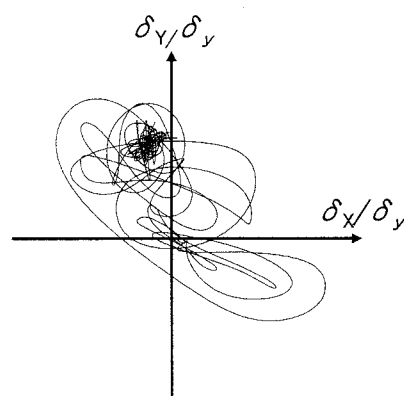


図-1 水平2方向地震動に対する橋脚頂部の応答軌跡⁸⁾

かでまとめることができる。

さて、鋼製橋脚について、岡崎ら⁸⁾は橋軸方向のみならず、橋軸直角方向にも同時に入力された場合の応答についてまとめており、この中では独立で入力するよりも、同時に入力した場合、応答が非常に大きくなることを示唆している。また、葛西ら⁹⁾は、橋脚頂部が平面的な変位履歴を受ける鋼製橋脚の強度と変形能は、線的な変位履歴を受ける場合よりも、小さくなる可能性があるとしている。これらより、現行の耐震設計では、耐震安全性を満足しない場合があることが予想される。

そこで本研究では、設計手順を図-2に示す通りにまとめる。まず、これまでの設計手法と同様に、橋軸方向と橋軸直角方向に対して独立に検討し、その時点の照査条件を満足しない場合は、設計のやり直し、あるいは、耐震性向上策の適用を行う。そして、この両者を満足した場合について、本研究で提案する設計方法を適用することを考える。

本論文で提案する手法の概要を以下にまとめる。

1) 鋼製橋脚に、橋軸及び橋軸直角方向に同時に地震

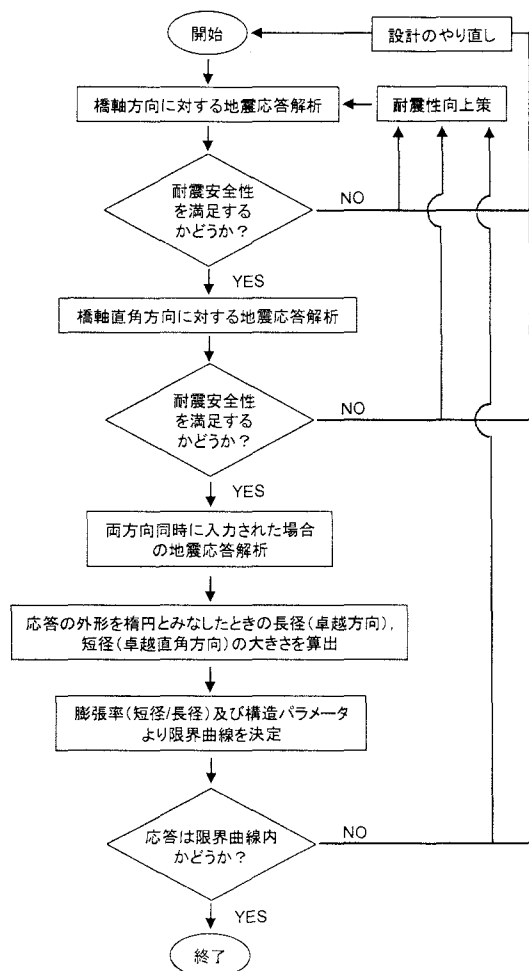


図-2 設計フロー

動を入力する地震応答解析を行う。

- 2) 上記 1)より橋脚頂部と基部との相対変位の変位軌跡が得られるため、その結果より、応答の外形を楕円とみなしたときの長径（卓越方向）、短径（卓越直角方向）の大きさを算出する。
- 3) 長径と短径の比（本研究における膨張率）を定め、本研究の成果より、構造パラメータから膨張率に応じた限界線を算出する。
- 4) 図-3 に示すように応答軌跡に限界曲線を書き込み、応答が限界曲線内にあれば、耐震安全性を満足し、限界曲線を超える場合は、設計のやり直し、あるいは、耐震性向上策の適用を必要とする。

本研究は以上のフローの 3) で必要とする限界線を、パラメトリック解析によって定めることが目的となる。

3. 数値解析手法の概要

(1) 解析対象及びそのモデル化

解析モデルは、図-4 に示したシェル要素とはり要素から構成されている。汎用構造解析プログラム

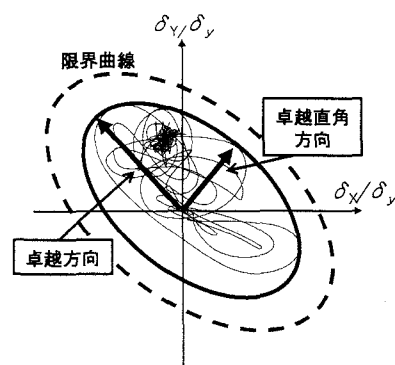
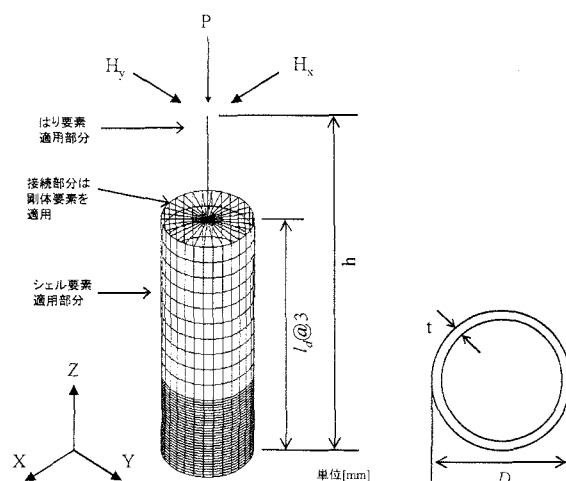


図-3 応答軌跡及び限界線

(例：耐震安全性を満足した場合)



(a) 要素分割部

(b) 断面図

図-4 無補剛パイプ断面橋脚の解析モデル

ABAQUS¹⁰⁾を用い、構成則は構造用鋼材の繰返し挙動を高精度で予測できる修正 2 曲面モデル¹¹⁾を用いた。要素としては、同ソフトに提供されている Timoshenko のはり理論に基づくはり要素 B31 と 4 節点の低減積分有限膜ひずみシェル要素 S4R を用いた。柱基部からダイアフラム($l_d=D$: ダイアフラム間隔=パイプ断面の外部の直径)の 3 つまでをシェル要素でモデル化した。シェル要素で分割した部分のメッシュ分割¹²⁾に関しては、柱軸方向に基部から 1 つ目のダイアフラム区間を 20 分割、残りの上部のシェル要素については 1 つのダイアフラム区間をそれぞれ 5 分割、円周方向に 30 分割とした。また、はり要素の分割数は 10 分割とした。解析モデルには、径厚比パラメータ及び柱の細長比パラメータの異なる 5 体を用い、各構造諸元を表-1 に示す。なお、径厚比パラメータ R_t および細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は、次式(1)、式(2)より定義される。

$$R_t = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \frac{d}{2t} \quad (1)$$

表-1 解析モデルの構造諸元(無補剛パイプ断面橋脚)

解析モデル	R_t	$\bar{\lambda}$	D [mm]	t [mm]	h [mm]
UP50-40	0.050	0.40	789	20	4303
UP75-20	0.075	0.20	1173	20	3227
UP75-40	0.075	0.40	1173	20	6455
UP75-60	0.075	0.60	1173	20	9682
UP100-40	0.100	0.40	1557	20	8605

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

ここで h : 供試体柱長, $d(=D-t)$: パイプ断面の直径, t : 供試体板厚である. また, 軸力比は 0.15 とし, 初期不整は考慮しない. モデル名は, UP が無補剛パイプ断面を, 最初の数字が径厚比パラメータの小数点以下 3 桁を, 次の数字が柱の細長比パラメータの小数点以下 2 桁を表している.

使用鋼材は SM490 とし, 表-2 に材料定数を示す. なお, 表中において E : 弾性係数, ε_y : 降伏ひずみ, E_{st} : ひずみ硬化係数, ε_{st} : ひずみ硬化開始ひずみ, σ_u : 引張強度である.

(2) 荷経路の設定

第 2 節の提案設計法のコンセプトを基に, 荷経路の卓越直角方向への膨らみ具合を変えるような荷パターンを決定し, 強度と変形能への影響を検討する. 膨らみ具合としては, 図-5 に示すように卓越方向を長径 a , 卓越直角方向を短径 b として b/a を膨らみ具合のパラメータ, 膨張率とする. つまり, 膨張率 $b/a=1.0$ は, らせん状の円を描く荷 (以下, 荷パターン CIR と称する) であり, $b/a=0$ は 1 方向荷 (以下, 荷パターン UNI と称する) にあたる. 解析では, 膨張率の影響を見るために, 各解析モデルにおいて, 膨張率を 0 (=UNI), 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 0.90, 1.0 (=CIR) とする 7 パターンの荷経路で解析した.

(3) 強度と変形能の定義

2 方向から水平力を受ける場合, 例えば X 方向の荷重が低下した状態でも, Y 方向の荷重が増加しており, 橋脚の性能は低下しておらず終局状態に至っていない場合や, またその逆もあるなど複雑となる. そこで式 (3) より求める復元力 (以下, 復元力 H と称する) を用いて, 2 方向から水平力を受ける場合の強度と変形能の定義を行う.

表-2 解析モデルの材料定数

鋼種	SM490
E [GPa]	200
σ_y [MPa]	315
ε_y [%]	0.157
E_{st} [GPa]	6.67
ε_{st} [%]	1.10
ν	0.300
σ_u [MPa]	490

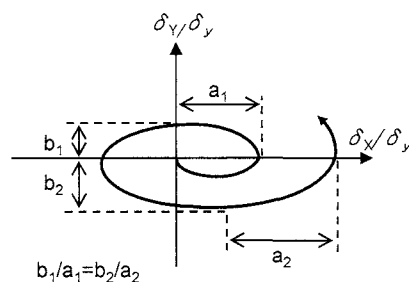


図-5 膨張率の定義

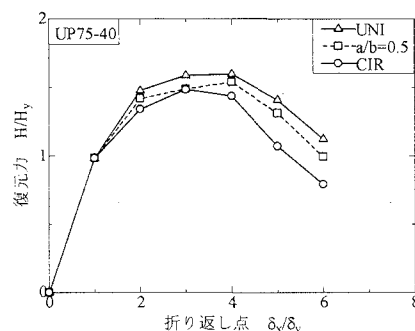


図-6 包絡線

$$H = \sqrt{H_X^2 + H_Y^2} \quad (3)$$

膨張率が 0 の場合は, これまで多くの知見が得られている 1 方向荷と等しい. そこで, この場合との比較を行うことは, これまでの成果を踏襲する意味で都合が良い. よって本研究では, 卓越方向の折り返し点 (x 方向の変位 $=1\delta_y, 2\delta_y, 3\delta_y \dots$, y 方向の変位 $=0$ の点) の復元力 H を用い, 図-6 のような包絡線を用いて終局状態を定義する. 具体的には, 図-7 の包絡線から +側と -側の両側において最大荷重 H_m 及び H_m を求め, 小さい値を最大荷重 H_m とする. その H_m を取った側の包絡線 (図-6 のような包絡線を描くことができる) から, 最大荷重 H_m をとるときの変位を最大荷重時変位 δ_m とする. また最大荷重 H_m の 95% にあたる変位である 95% 耐荷力低下変位の絶対値をとった値を 95% 耐荷力低下変位 δ_{95} とする.

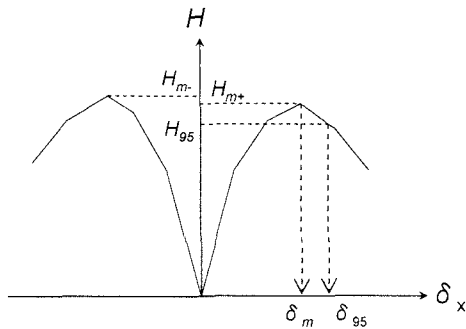


図-7 H_m , δ_m , δ_{95} を求める概略図
(例: H_{m+} の方が小さい場合)

4. 2方向水平外力を想定した鋼製橋脚の強度と変形能

前節で定義した 95%耐荷力低下変位 δ_{95} , 最大荷重 H_m および最大荷重時変位 δ_m を用いることで, 鋼製橋脚の強度と変形能に, 各構造パラメータ及び载荷パターンの違いが及ぼす影響を検討する。

図-8 は, 縦軸に最大荷重 H_m を载荷パターン UNI の最大荷重 H_{mUNI} で除して無次元化したもの, 図-9 は, 縦軸に 95%耐荷力低下変位 δ_{95} を载荷パターン UNI の 95%耐荷力低下変位 δ_{95UNI} で除して無次元化したもの, 図-10 は, 縦軸に最大荷重時変位 δ_m を载荷パターン UNI の最大荷重時変位 δ_{mUNI} で除して無次元化したものであり, いずれも横軸には膨張率をとっている。なお, それぞれの図において, (a)は細長比パラメータが一定 ($\bar{\lambda}=0.4$) のものを表しており, (b)は径厚比パラメータを一定 ($R_t=0.075$) としたものを表している。

(1) 最大荷重 H_m

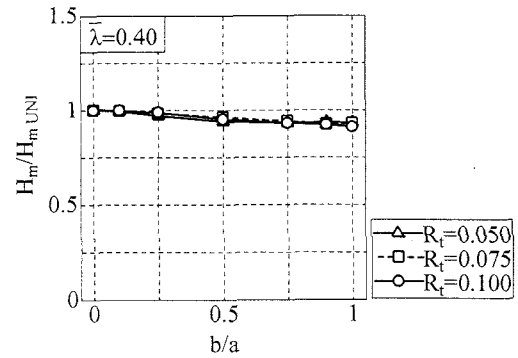
図-8 を見ると, 最大荷重と膨張率の関係は, 膨張率 $b/a=0$ から膨張率が大きくなるほど最大荷重は若干小さくなり, 膨張率 $b/a=1$ で最も小さい値をとる右下がりのグラフとなる。

a) 径厚比パラメータの違いによる影響

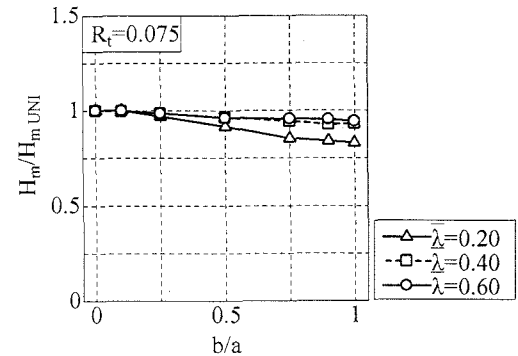
図-8(a)を見ると, グラフは3つとも重なっており, 最大荷重は径厚比パラメータの違いによる影響がほとんどないと考えられる。

b) 細長比パラメータの違いによる影響

図-8(b)を見ると, 細長比が小さくなるにつれて, 同じ膨張率で見た場合, 低減していることが分かる。従って, ごくわずかであるが, 細長比パラメータの違いによる影響はある。



(a) 径厚比パラメータの違いによる影響



(b) 細長比パラメータの違いによる影響

図-8 最大荷重 H_m

(2) 95%耐荷力低下変位 δ_{95}

図-9 を見ると, 95%耐荷力低下変位と膨張率の関係は, 膨張率 $b/a=0$ から膨張率が大きくなるほど, 95%耐荷力低下変位は小さくなり, 膨張率 $b/a=1$ で最も小さい値をとる右下がりのグラフとなる傾向が見られる。

a) 径厚比パラメータの違いによる影響

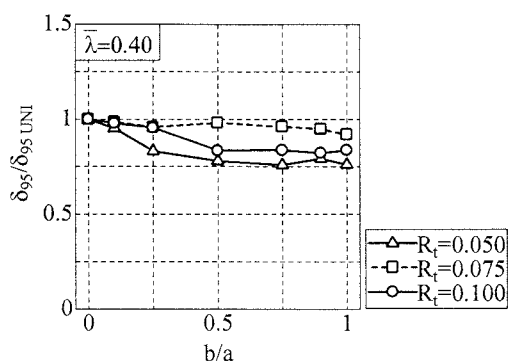
図-9(a)を見ると, UP50-40, UP100-40 の値がほぼ一致していることから, 95%耐荷力低下変位は径厚比パラメータの違いによる影響をほとんど受けないと考えられる。

b) 細長比パラメータの違いによる影響

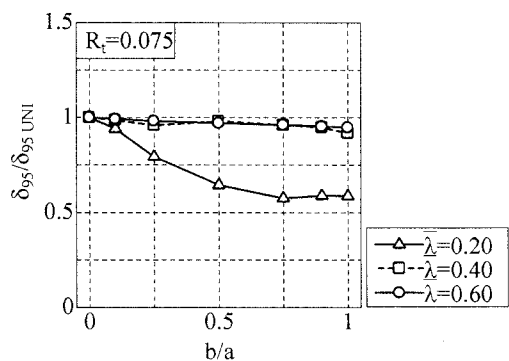
図-9(b)を見ると, UP75-40, UP75-60 の値はほぼ一致しているが, UP75-20 では膨張率の違いによる 95%耐荷力低下変位の違いが著しく表れている。このことから, 細長比パラメータがある程度大きくなると, 膨張率の違いによる 95%耐荷力低下変位への影響が小さくなるということが分かる。

(3) 最大荷重時変位 δ_m

図-10(a), (b)を見ると, どちらのグラフも傾向として膨張率 $b/a=0$ の最大荷重時変位が最も大きくなるものの, 膨張率の違いによる最大荷重時変位の値には決まった傾向が見られない。最大荷重時変位と膨張率の関係については今後検討する必要がある。

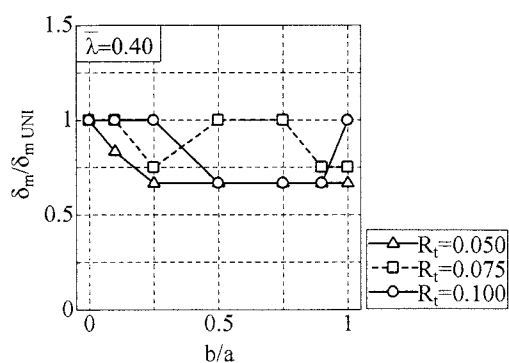


(a) 径厚比パラメータの違いによる影響

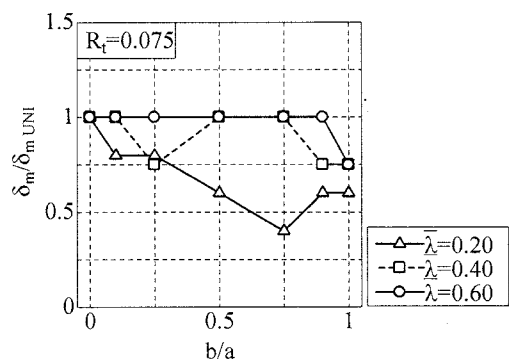


(b) 細長比パラメータの違いによる影響

図-9 95%耐力力低下変位 δ_{95}



(a) 径厚比パラメータの違いによる影響



(b) 細長比パラメータの違いによる影響

図-10 最大荷重時変位 δ_{max}

5. 推定式の決定

前節でまとめられた結果より、パイプ断面橋脚について最大荷重 H_m 、95%耐力力低下変位 δ_{95} についての、膨張率に応じた傾向をつかむことができた。そこでここでは、構造パラメータ、膨張率に応じた強度と変形能の推定式の作成を試みる。なお、1方向荷重の場合との比較である低減率を算出しているので、別途1方向荷重時の強度と変形能を算出する必要があることを付記する。

(1) 最大荷重 H_m

最大荷重 H_m については、4(1)よりほぼ右下がりのグラフとなるので、荷重パターン CIR の値が分かれば、各膨張率における最大荷重 H_m の値を推定できる。これより、解析から得られた CIR のときの H_m/H_{mUNI} の値を、低減率 r_{HmCIR} として、図-11 のように縦軸に r_{HmCIR} 、横軸に径厚比パラメータと細長比パラメータを掛け合わせた値 $R_t\bar{\lambda}$ をとったグラフを作成し、最小二乗法より、 r_{HmCIR} を推定できる式(4)を作成した。なお r_{HmCIR} より、各膨張率の H_m/H_{mUNI} の値を r_{Hm} として、 r_{HmCIR} を用いることで式(5)を作成できる。式(5)より構造パラメータ、膨張率に応じた低減率を求めることができる。

$$r_{HmCIR} = 2.27 R_t \bar{\lambda} + 0.842 \quad (4)$$

$$r_{Hm} = (r_{HmCIR} - 1) \frac{b}{a} + 1 \quad (5)$$

(2) 95%耐力力低下変位 δ_{95}

95%耐力力低下変位 δ_{95} についても、4(2)よりほぼ右下がりのグラフとなることが分かったので、荷重パターン CIR の値が分かれば、各膨張率における 95%耐力力低下変位 δ_{95} の値を推定できる。これより、解析から得られた CIR のときの $\delta_{95}/\delta_{95UNI}$ の値を、低減率 $r_{\delta_{95}CIR}$ として、図-12 のように縦軸に $r_{\delta_{95}CIR}$ 、横軸に径厚比パラメータと細長比パラメータを掛け合わせた値 $R_t\bar{\lambda}$ をとったグラフを作成し、最小二乗法より、 $r_{\delta_{95}CIR}$ を推定できる式(6)を作成した。なお $r_{\delta_{95}CIR}$ より、各膨張率の $\delta_{95}/\delta_{95UNI}$ の値を $r_{\delta_{95}}$ として、 $r_{\delta_{95}CIR}$ を用いることで式(7)を作成できる。式(7)より構造パラメータ、膨張率に応じた低減率を求めることができる。

$$r_{\delta_{95}CIR} = 9.50 R_t \bar{\lambda} + 0.525 \quad (6)$$

$$r_{\delta_{95}} = (r_{\delta_{95}CIR} - 1) \frac{b}{a} + 1 \quad (7)$$

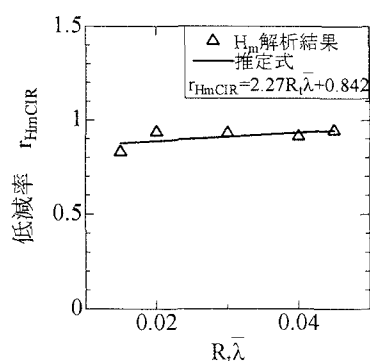


図-11 低減率 r_{HmCIR} の推定式

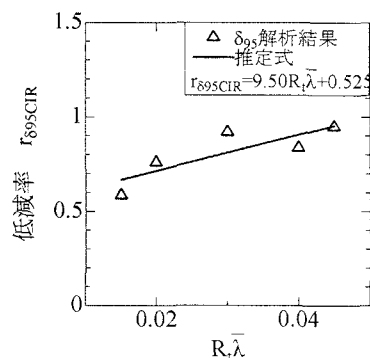


図-12 低減率 $r_{\delta 95CIR}$ の推定式

5. 結言

本研究では、2 方向繰返し水平力を受ける無補剛パイプ断面橋脚の強度と変形能について検討を行い、その上で強度と変形能における推定式を求め、水平 2 方向地震動に対する耐震設計法を提案した。

- ① 図-2 の設計フローより水平 2 方向地震動に対する耐震設計法を提案した。
- ② 式(3)を用いて描いた図-6 の包絡線を用い、最大荷重 H_m 、最大荷重時変位 δ_m 及び 95%耐荷力低下変位 δ_{95} を定めた。
- ③ 最大荷重は膨張率が大きくなるほど小さくなり、径厚比パラメータの影響はほとんど受けず、細長比パラメータが小さい短柱ほど、ごくわずかであるが膨張率の影響を受ける。
- ③ 95%耐荷力低下変位は膨張率が大きくなるほど小さくなり、径厚比パラメータの影響はほとんど受けず、細長比パラメータが小さい短柱ほど膨張率の影響を受ける。
- ④ 最大荷重 H_m 、95%耐荷力低下変位 δ_{95} については、構造パラメータ及び膨張率の関数として、低減率 r_{Hm} 、 $r_{\delta 95}$ の推定式(5)、(7)を作成した。

以上が得られた結論である。なお、本研究では応答値

に対する試みを講じていないため、設計手法 2) の応答値から長径、短径を算出する部分が概念的な表現でとどまっている。これらに関する検討を行うことで、水平 2 方向地震動を想定した耐震設計法が完備されよう。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，丸善，2002.3.
- 2) 杉浦邦征，ウォルター・オヤワ，渡邊英一：繰返し水平 2 方向力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動，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，pp.97-104，2000.
- 3) 小畑誠，下村太郎，松尾奈緒美，後藤芳顯：橋脚モデルの 2 方向荷重疑似動的実験，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集，I-414，pp.827-828，2002.
- 4) 永田和寿，渡邊英一，杉浦邦征：水平 2 方向に地震力を受ける角形鋼製橋脚の弾塑性応答性状に関する研究，土木学会構造工学論文集，Vol.50A，pp.1427-1436，2004.3.
- 5) 荻本栄典，川島一彦，渡邊学歩，永田聖二：2 方向地震力を受ける RC 橋脚の耐震性，第一回性能規定型耐震設計に関する研究発表会講演論文集，pp.155-160，2004.5.
- 6) 藤倉修一，川島一彦，早川涼二：2 方向荷重を受ける RC 橋脚の曲げ耐力劣化機構とファイバー要素解析，第 1 回性能規定型耐震設計に関する研究発表会講演論文集，pp.161-166，2004.5.
- 7) 早川涼二，川島一彦，渡邊学歩：水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚の耐震性，土木学会論文集 No.759/I-67，pp.79-98，2004.4.
- 8) 岡崎靖一郎，葛西昭，宇佐美勉：水平 2 方向地震動を受ける鋼製橋脚の弾塑性地震応答解析，土木学会地震工学論文集，Vol.27，2003.12.
- 9) 葛西昭，成田篤哉，宇佐美勉，青木徹彦：2 方向水平力を受ける鋼製箱形断面橋脚の実験と性能照査法の提案，第 1 回性能規定型耐震設計に関する研究発表会講演論文集，pp.19-24，2004.5.
- 10) ABAQUS, Inc. : ABAQUS Standard User's Manual Ver. 6.4.
- 11) Shen, C., Mamaghani, I. H. P, Mizuno, E. and Usami, T. : Cyclic Behavior of Structural Steels. II : Theory, J. of Eng. Mech., ASCE, Vol. 121, No.11, pp.1165-1172, 1995.
- 12) T.Usami, H.B.Ge : Cyclic behavior of thin-walled steel structures—numerical analysis, Thin-Walled Structures, 32, pp.41-80.