

十字型補剛壁を有する箱形鋼製橋脚の 終局挙動及び耐震性能の検討

石井善太¹・王占飛²・山尾敏孝³

¹学生員 熊本大学大学院 自然科学研究科博士前期課程 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)
²学生員 修(工) 熊本大学大学院 自然科学研究科博士後期課程 (同上)
³正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (同上)

1. はじめに

これまでの土木構造物における耐震設計法では、地震外力の入力方向は1方向のみしか考慮されていなかった。しかし最近では、出来る限り実現象に近い状態を想定した耐震設計を行うことが重要であると考え始められてきた。実際、文献 1) , 2) などで見られるように、2方向外力を想定した鋼製橋脚の実験や解析等の研究が精力的に行われている。一方、山尾らは1995年の兵庫県南部地震を契機として、大きな地震力が作用しても脆性的な破壊が生じない、じん性を十分に確保できる十字型補剛鋼を有する製橋脚を提案してきた³⁾。この補剛方法は、十字型形状の補剛壁を橋脚基部に適当な高さまで配置する形式で、既往の実験や解析等の研究を通して、多縦リブ補剛橋脚やコンクリート部分充填橋脚と比較し、同等もしくはそれらよりも優れた耐震性能を有することを明らかにしてきた。十字型補剛の鋼製橋脚を実用化する為には、水平2方向地震外力を想定した耐震性能の特性を明らかにする必要がある。これまでに、十字型補剛壁を有する円形断面橋脚については2方向外力を受ける繰り返し解析を行い、円形断面での耐震性能特性を明らかにしてきた⁴⁾。しかし、箱形断面橋脚についての研究が進んでいないのが現状である。

そこで本研究では、十字補剛壁の鋼製橋脚の耐震照査法を確立するため、水平2方向繰り返し外力を受ける場合の箱形断面鋼製橋脚の終局状態における強度と変形能を求め、その結果から構造パラメータが橋脚の耐震性能に及ぼす影響について検討を行った。

2. 2方向外力を受ける十字型補剛橋脚の繰り返し載荷解析

(1) 解析モデルと載荷パターン

図-1に示すような解析モデルを対象に、載荷パターンおよび構造パラメータを設定し、弾塑性有限変位解析法を用いてパラメトリック解析を行った。

載荷パターンは図-2に示すように2種類の1方向載荷パターンと3種類の2方向載荷パターンの計5通りである。使用した解析モデル諸元は、実際に設計されている橋脚の寸法を想定して設定したもので、表-1に示す。解析モデルの母材の幅厚比パラメータ R_R と細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ 、ならびに補剛材の細長比パラメータ $\bar{\lambda}_s$ は次式で定義したものを使用した。

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

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

$$\bar{\lambda}_s = \frac{a}{r_s} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{Q}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

上式中、 b ：断面幅、 h ：橋脚高さ、 t ：板厚、 t_s ：補剛材の板厚、 σ_y ：鋼材の降伏応力、 E ：ヤング係数、 ν ：鋼材のポアソン比、 n ：縦方向補剛材によって区切られるパネル数、 K ：柱の座屈係数(片持ち梁時 $K=2$)、 r ：断面2次半径、 r_s ：補剛材と隣接パネルからなるT型断面の断面2次半径、 a ：ダイアフラム間隔、 Q ：補剛材で囲まれた板パネルの強度である。

表-1 解析モデル諸元

Models	R_R	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_s$	h [mm]	b [mm]	h_c [mm]	$t(=t_s=t_c)$ [mm]	b_s [mm]
CA37-03	0.37	0.30	0.33	10530	2150	3389	30	23
CA37-04		0.40		14020		4512		
CA37-05		0.50		17520		5639		
CA52-03	0.52	0.30	0.36	14670	3000	4735	30	31.5
CA52-04		0.40		19580		6320		
CA52-05		0.50		24480		7902		
CB52-03	0.52	0.30	0.30	9330	2000	3047	40	23.5
CB52-04		0.40		12440		4063		
CB52-05		0.50		15520		5069		
CB70-03	0.70	0.30	0.42	9380	2000	3122	30	19.5
CB70-04		0.40		12500		4161		
CB70-05		0.50		15650		5209		

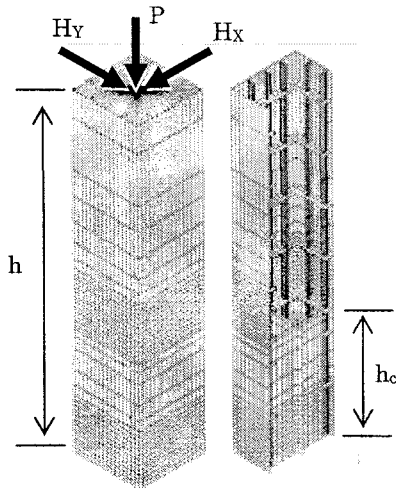


図-1 十字型補剛橋脚メッシュ分割

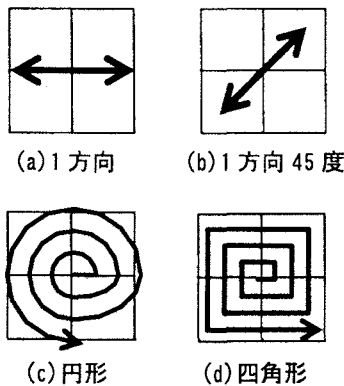


図-2 载荷パターン

今回、幅厚比パラメータを $R_R=0.37\sim 0.70$ 、細長比パラメータ $\bar{\lambda}=0.3\sim 0.5$ の範囲で変化させ解析を行った。モデル名の CA, CB は図-3 に示すような断面形状の違いを表すものである。これは幅厚比パラメータの値と実際用いられている橋脚の寸法を考慮した際、種々の十字補剛壁の断面形状を検討する必要があるためである。そこで $R_R=0.52$ モデルでは、断面形状が異なる CA52 と CB52 両方でモデル作成を行った。また、十字補剛高さ h_c の算出式は(4)式で表されるが、詳細については文献 3)を参照されたい。

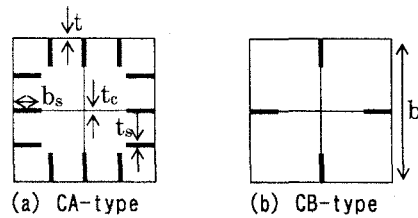


図-3 十字補剛橋脚の断面形状

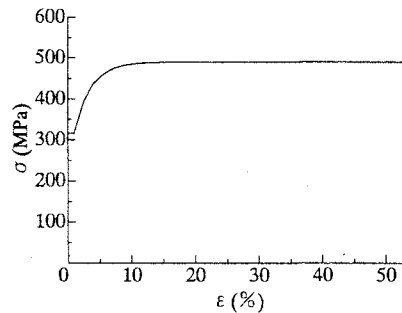


図-4 鋼材の応力-ひずみ関係

$$h_c = \left(1 - \frac{\sigma_{ub} I_B}{\sigma_{uA} I_A} \right) h \quad (4)$$

式中、 σ_{uA} ：十字型壁を含む補剛板の終局応力度、 σ_{ub} ：十字型壁を含まない補剛板の終局応力度、 I_A ：十字型壁を含む断面の断面 2 次モーメント、 I_B ：十字型壁を含まない断面の断面 2 次モーメントである。

解析ソフトは、汎用解析プログラム MARC®を用いた。また、解析モデルのメッシュ分割については図-1 に示すように、局部座屈の発生が予想される橋脚基部と十字補剛上部においては、それぞれダイアグラム 1 つ分の分割要素の縦横比が 1 に近い正方形要素になるように分割した。それ以外では、作用荷重点に近づくにつれ、高さ方向には段々と荒くなるよう分割した。使用鋼材の鋼種は SM490 を想定し、応力-ひずみ関係を図-5 に示した。ヤング率： $E=200\text{GPa}$ 、降伏応力： $\sigma_y=315\text{MPa}$ 、ポアソン比： $\nu=0.3$ とした。なお、今回解析における初期不整については影響が小さいと考え、考慮していなかった。

(2) 載荷方法

解析モデルには図-1 に示すように上部構造の荷重を想定した一定の鉛直荷重 P と地震力を想定した水平繰返し変位 δ を与えた。軸力は断面降伏荷重の15%の軸圧縮力を作用させ、式(5)より求めた。降伏水平荷重 H_y 、降伏変位 δ_y はそれぞれ式(6)、(7)により求めた。

$$P = 0.15 A_c \sigma_y \quad (5)$$

$$H_y = \left(\sigma_y - \frac{P}{A_c} \right) \frac{Z_c}{h} \quad (6)$$

$$\delta_y = \frac{H_y}{3EI_A} \left\{ h^3 + (h - h_c)^3 \left(\frac{I_A}{I_B} - 1 \right) \right\} \quad (7)$$

式中、 A_c ：十字壁を含む断面の面積、 Z_c ：十字壁を含む断面の断面係数である。

(3) 解析手法の妥当性検討

FEM 解析には、境界条件やシェル要素の分割方法などによって精度に差が生じる。そこで本解析をする前に、既往の論文における実験供試体をモデル化し解析方法の検討を行った。現時点で水平 2 方向外力を想定した十字型補剛鋼製橋脚の実験が行われていない為、正方形縦リブ補剛箱形断面である愛知工業大学と名古屋大学の実験供試体を選んだ¹⁾。円形載荷により解析を行ったところ、図-6 に示すような結果となった。最大点付近で解析値が実験値を少々上回っているが、これは材料の構成則に移動硬化則を用いたことが一因だと考えられる。しかし、本論文ではエネルギー吸収量による比較検討を行わないことから、第 2 象限、第 4 象限の差異については大きな問題でないと考え移動硬化則を採用した。なお、材料構成則に修正 2 曲面モデルを用いるとよく

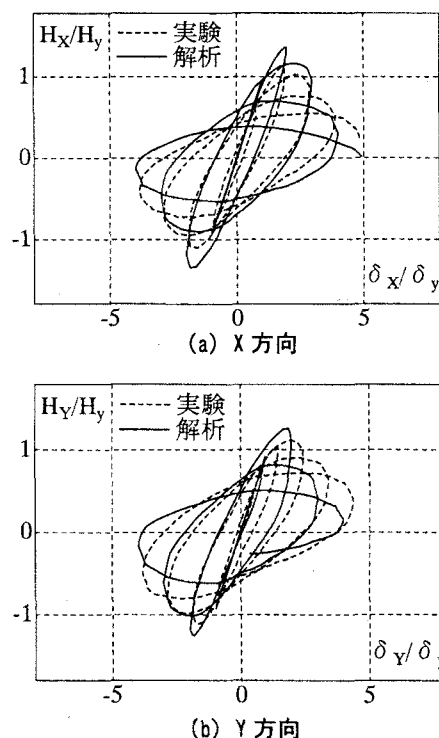


図-6 実験結果と解析結果の比較

一致するとの報告もある⁷⁾が、解析結果は十分な精度を持つものと考えられる。

3. 解析結果と考察

(1) 強度と変形能の定義

水平 2 方向外力を受ける場合 X, Y 方向それぞれの荷重と変位が生じるため、橋脚頂部における荷重－変位関係は複雑なものとなる。そこで耐震性能を評価する指標として、繰返し載荷の X, Y 成分それぞれの荷重と変位を式(8)、(9)により方向性を持たない強度 H と変位 δ と定義した。

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (8)$$

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (9)$$

これらの関係をグラフ化すると図-7 のようになる。

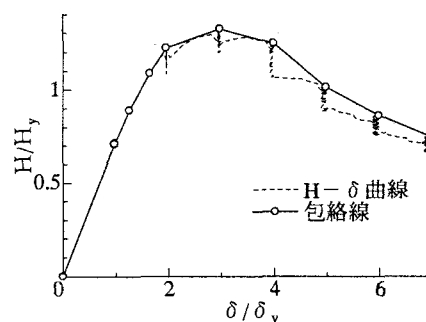
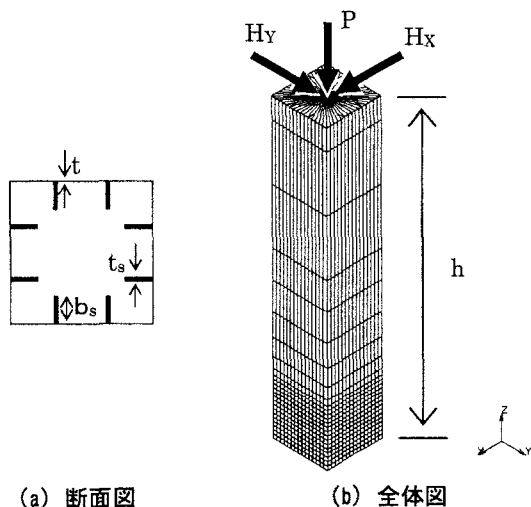


図-7 強度と変形能の定義(CA37-03, 円形載荷)



(a) 断面図

(b) 全体図

図-5 妥当性検討解析モデル

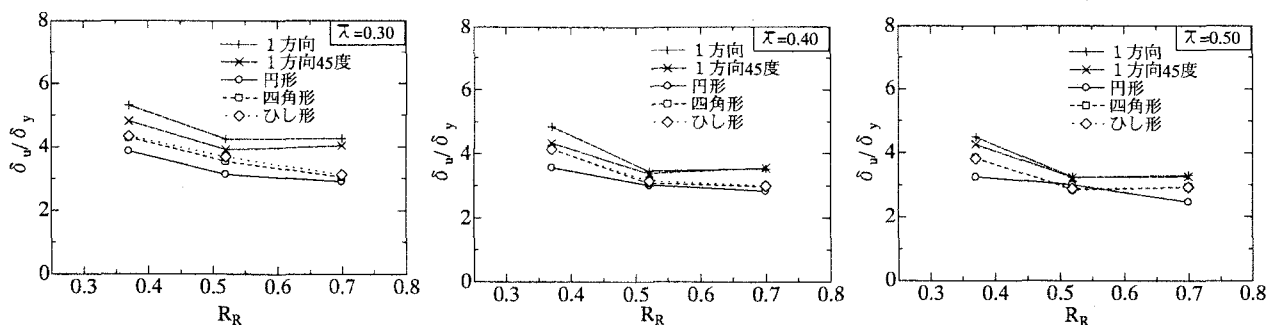


図-8 幅厚比と終局変位の関係

縦軸は H を降伏荷重 H_y , 横軸は δ を降伏変位 δ_y で除して無次元化したものである。このような包絡線から求まる最大点の 95% 低下点を終局点と定義し、これより強度と変形能を定量化することができる。今回、終局点における変位を δ_u , 強度を H_u と定めた。以下の解析結果と考察については、特に性能規定型設計法において重要である終局変位について行った。

(2) 幅厚比パラメータが終局変位に及ぼす影響

細長比パラメータ $\bar{\lambda} = 0.30, 0.40, 0.50$ 毎に、幅厚比パラメータ R_R が 0.37, 0.52, 0.70 と異なるモデルの解析結果を比較したものを図-8 に示す。縦軸に終局変位 δ_u を水平降伏変位 δ_y で除して無次元化したものを取り、横軸は R_R の値をとっている。図-9 に CA37-03 と CB52-03 の包絡線を載荷パターン別に比較図を示した。(b) と (c) より同じ幅厚比でも終局

強度の大きさが異なることがわかる。そのため $R_R = 0.52$ の値は、図-9 から読み取れるように CA モデルと CB モデルとで比較した結果、終局変位の値が小さかった CA52 モデルの値を用いた。

以上の結果から判断すると、水平 2 方向載荷パターン(円形・四角形・ひし形)では、幅厚比パラメータが大きくなるにつれて終局変位が小さくなることわかる。しかし、水平 1 方向載荷パターン(1 方向・45 度 1 方向)においては $R_R = 0.52$ と $R_R = 0.70$ の終局変位はほとんど変化がなく、その間の終局変位は幅厚比パラメータの値に依存しないことがわかった。これはどの細長比パラメータにおいても同様であった。だが、全体的に見ればどの載荷パターンにおいても幅厚比パラメータが大きくなるほど終局変位が小さくなる傾向があると言える。

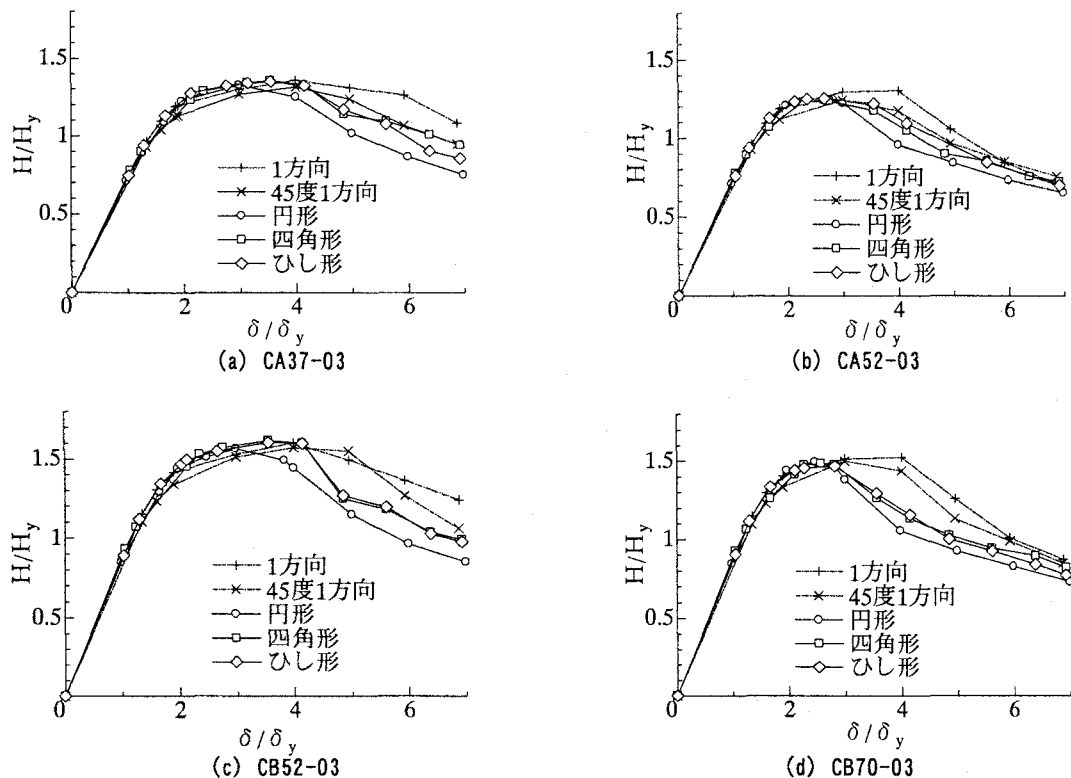


図-9 載荷パターン別包絡線比較

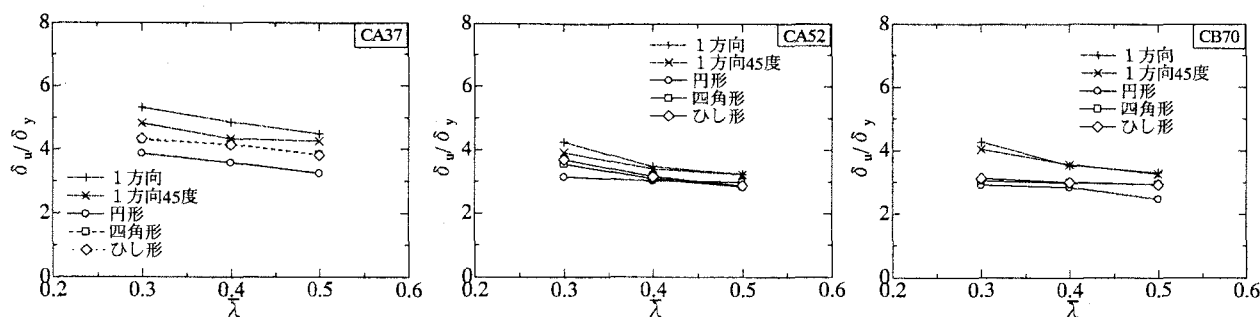


図-10 細長比パラメータと終局変位の関係

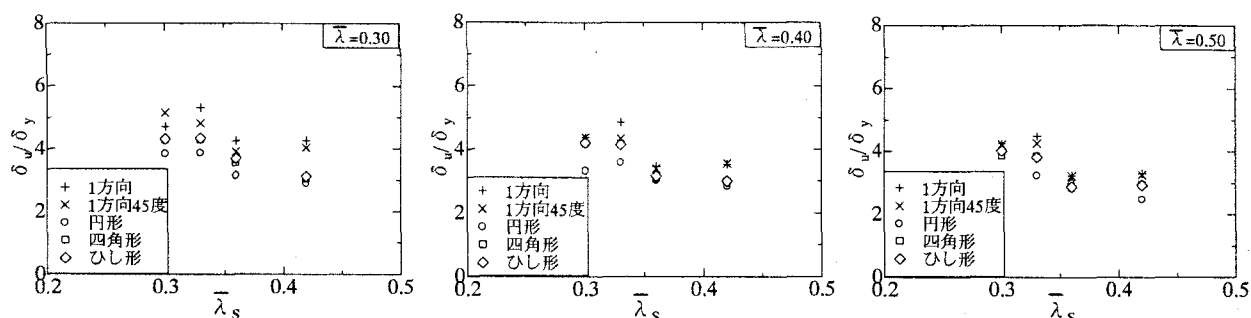


図-11 補剛材の細長比パラメータと終局変位の関係

(3) 細長比パラメータが終局変位に及ぼす影響

幅厚比パラメータ $R_R=0.37, 0.52, 0.70$ 毎に母材の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が $0.30, 0.40, 0.50$ と変化させたモデルの解析結果を比較したものを図-10 に示す。縦軸は終局変位 δ_u を水平降伏変位 δ_y で除して無次元化したものを取り、横軸は $\bar{\lambda}$ の値をとっている。

解析結果より、CA52 モデルと CB70 モデルでは細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が大きくなるにつれて終局変位が小さくなっていることが分かる。一方、CA37 モデルではそれぞれほぼ平行である。前項で述べたように幅厚比パラメータが小さい程、载荷パターンの影響が大きくなることが考えられる。

同様に δ_u/δ_y と補剛材の細長比パラメータ $\bar{\lambda}_s$ の関係を図-11 に示す。図より全体的にモデルの $\bar{\lambda}_s$ 値が大きくなるほど終局変位が小さくなるという相関関係があることが分かった。

(4) 载荷パターンによる包絡線への影響

図-9 より円形载荷における包絡線では他の载荷パターンと比べて早く終局状態を迎えることが分かる。例を挙げると、1 方向载荷パターンのときは $R_R=0.37, \bar{\lambda}=0.30$ のとき $5.3\delta_y$ であるのに対し円形载荷パターンでは $4\delta_y$ 程度まで小さくなる。この傾向は他の幅厚比パラメータの場合でも同様である。よって、十字型補剛を有する箱形断面橋脚では、円形载荷パターン解析を重視した設計が有効であるということが言える。また、円形载荷は地震動による実現象に最も近い载荷パターンであると考えられる。その

為、今後の研究として 2 方向地震動を入力した動的解析による検討を行う必要があると考えられる。

(5) 十字補剛板厚の影響

十字型補剛橋脚での変形性能における重要点は、母材よりも十字補剛板が先に座屈を生じないことである。これまでの水平 1 方向载荷では母材板厚と十字型補剛板厚を同じ厚さにしても十分その性能は保たれると考えられていた為、今回も同様の設定でモデル作成を行った。しかし、CA モデルにおける 2 方向载荷パターンでは、ほぼ同時期に局部座屈が発生した。これは十字型補剛板の剛性が母材の縦リブ補剛板の剛性よりも小さい為だと考えられる。そのため今回 CA52-03 モデルにおいて、十字型補剛板厚を 2 倍 (=十字型補剛板の R_R と母材補剛板の R_R が同じになるよう設定) と、1.5 倍に設定したものを 1 方向载荷にて比較検討を行った。この結果の包絡線を

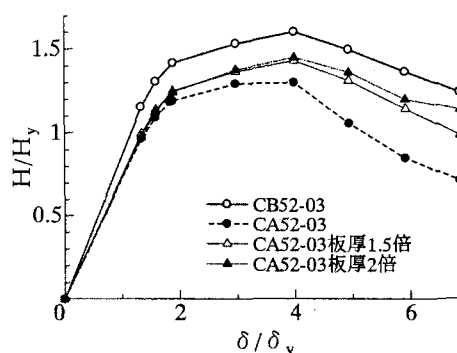


図-12 十字補剛板厚の検討

図-12 に示す，十字補剛板の板厚が 1.5 倍モデルと板厚 2 倍モデルとではほぼ最大強度点が同じであることが分かる．また，CB52-03 モデルと比較してみるとこれら 2 つの解析モデルとともに包絡線の形状も良く似ていることが分かる．これより CA モデルでは十字補剛板厚は母材の幅厚比パラメータに基づいて決定することが妥当であると考えられる．今後，十字型補剛橋脚を設計する際はこの点に留意する必要がある．

4. おわりに

2 方向外力を受ける十字型補剛を有する箱形断面鋼製橋脚における強度と変形性能について，幅厚比パラメータ R_R や細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ などに着目して解析的研究を行い，終局状態における強度と変形性能を求めた．得られた結果をまとめると以下のようになる．

- 1) 解析モデルの構造パラメータが同じ場合では，他の載荷パターンと比較すると円形載荷パターン時で最も終局変位が小さくなった．
- 2) 幅厚比パラメータが大きくなる程，終局変位は小さくなった．
- 3) 水平 1 方向外力では幅厚比パラメータ R_R が 0.52 以降の場合，終局変位に対する R_R の影響はほとんど無くなった．
- 4) 細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ ，補剛材の細長比パラメータ $\bar{\lambda}_s$ ，共に値が大きくなるにつれて終局変位は小さくなった．
- 5) 幅厚比パラメータが大きくなる程，載荷パターンの影響が小さくなった．また，細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ ，補剛材の細長比パラメータ $\bar{\lambda}_s$ についても同様に値が大きくなるほど載荷パターンの影響が小さくなる傾向があった．

- 6) 十字補剛板の幅厚比パラメータは，母材の幅厚比パラメータと等しくなるよう設定したほうが良いと考えられる．

参考文献

- 1) 葛西昭，成田篤也，宇佐美勉，青木徹彦：2 方向水平外力を受ける鋼製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，pp19-24，2004 年．
- 2) 永田和寿，渡辺英一，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 年．
- 3) 松村新也，原岡雅史，岩坪要，山尾敏孝：十字型補剛壁を有する鋼製橋脚の耐震性能に関する研究，構造工学論文集 Vol.47A pp809-818，2001 年．
- 4) Wang ZhanFei, Toshitaka YAMAO, Zenta ISHII : EFFECT OF TWO DIRECTIONAL LOADING ON DUCTILITY AND ULTIMATE STRENGTH OF STEEL BRIDGE PIERS WITH INNER CRUCIFORM WALLS, Advances in Steel Structures, Vol.1, pp197-202, 2004.
- 5) 宇佐美勉，鈴木森昌，Iraj H.P. Mamaghani, 葛 漢彬：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案 土木学会論文集 No.525/I-33, pp69-82 1995.
- 6) MARC K7 : Users Manual Volume A-E, 2001.
- 7) 三好喬，崎元達郎，鶴田栄一，渡辺浩：繰返しねじり力を受ける鋼構造物の終局挙動解析における材料硬化則の影響，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，I-395，土木学会，2002.