

鋼製円形断面橋脚の複合非線形解析における要素分割について

On finite element mesh in nonlinear analysis of a steel circular-section bridge pier

山口栄輝*, 鬼木浩二**, 永松寿隆***, 南野能克****

Eiki Yamaguchi, Kouji Oniki, Hisataka Nagamatsu, Yoshikatsu Nanno

*Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**九州工業大学大学院工学研究科建設社会工学専攻 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

***修 (工) 国土交通省九州地方整備局北九州国道工事事務所 (〒802-0803 福岡県北九州市小倉南区春ヶ丘 10-10)

****修 (工) 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-0025 山口県下関市竹崎町 4-6-1)

After the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, quite a few nonlinear finite element analyses have been conducted for steel bridge piers. Local bucklings observed in the earthquake have been reproduced in such numerical analyses. These analyses are expected to play some roles of experiments that are very costly and time-consuming. However, so far, an appropriate finite element mesh is not well-understood for this class of nonlinear analysis, although the mesh may influence numerical results considerably. Against this background, we conduct the nonlinear finite element analysis of a steel circular-section bridge pier to investigate the influence of mesh. The influence turns out to be significant especially in the post-peak region. Also, the portion where beam elements are applicable is investigated, and it is found that quite a larger portion of a bridge pier can be modeled by beam elements. This study of mesh is also extended to include the effect of the radius-thickness ratio of a section.

Key Words: Steel circular-section bridge pier, local buckling, finite element analysis, finite element mesh

キーワード: 鋼製円形断面橋脚, 局部座屈, 有限要素解析, 要素分割

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、鋼製橋脚に多大な被害が生じた。そのため、1995年以降、鋼製橋脚の耐震性向上を目的に、数多くの載荷実験が行われている¹⁾。

鋼製橋脚に影響を及ぼす因子は多岐にわたる。したがって、実験のみでの検討は費用や時間の制約上、実際的ではない。一方、コンピュータや構造解析ソフトの飛躍的な進歩により、非線形構造解析も比較的容易に行える環境が整ってきている。このような背景のもと、有限要素法を用いた複合非線形解析が行われ、局部座屈をはじめ、鋼製橋脚の変形性状が数値解析で再現されるようになってきている²⁾。

しかしながら、有限要素解析の精度に影響する要素分割については、中村³⁾が言及してはいるものの、土木学会・JSSCの小委員会報告⁴⁾では中村が提案する要素分割では必ずしも十分でないとの指摘もあり、

検討の余地が残されている。

以上のことを踏まえ、本研究では、鋼製円形断面橋脚を取り上げ、要素分割が解析結果に及ぼす影響を検討する。なお、本研究の全ての解析には、汎用有限要素解析プログラムABAQUS⁵⁾を用い、計算機には、Alpha21264 (500MHz) を搭載したワークステーションを使用する。

2. 解析概要

2.1 橋脚モデル

解析対象橋脚には、建設省土木研究所の載荷実験に用いられたNo. 8 供試体¹⁾を取り上げる。この供試体の概略を図-1に示す。解析モデルは、対称性を考慮して供試体の1/2とし、4節点の低減積分シェル要素S4RとTimoshenkoの梁理論に基づく2節点梁要素B310Sを使用する。

構成則には、ABAQUSに標準的に組み込まれてい

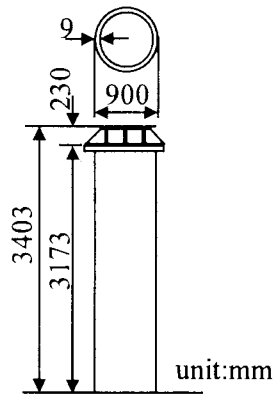


図-1 解析対象橋脚 (No. 8 供試体)

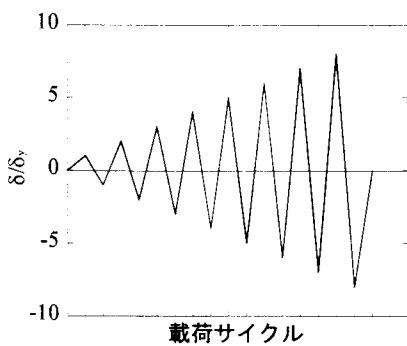


図-2 載荷条件

るバイリニア型移動硬化則のMises型弾塑性モデルを採用し、応力-ひずみ関係の骨格曲線の第2勾配はヤング率 E の1/100とする。なお、ヤング率 E は206 GPa, ポアソン比 ν は0.3, 初期降伏応力 σ_y は290 MPaとする。

2.2 載荷条件と解析法

鋼製橋脚の実験で標準的に行われている方法に従い、供試体頂部に一定圧縮軸力 P (公称降伏軸力の15%)を作用させた上で、繰り返し水平荷重 H を静的に作用させ、その点の水平変位 δ の振幅が $0 \rightarrow +\delta_y \rightarrow -\delta_y \rightarrow +2\delta_y \rightarrow -2\delta_y \dots$ と漸次増加しながら変化するよう繰り返し載荷を行う(図-2)。なお、基本変位 δ_y は、橋脚を片持梁と見なして求めた初期降伏水平変位である。また、基本変位 δ_y に対応する水平荷重を H_y とする。

載荷条件に合わせ、載荷点水平変位 δ を制御して解析する。増分幅はABAQUSの自動増分機能で決定する。解法はニュートン法、収束判定にはデフォルト値を用いる。

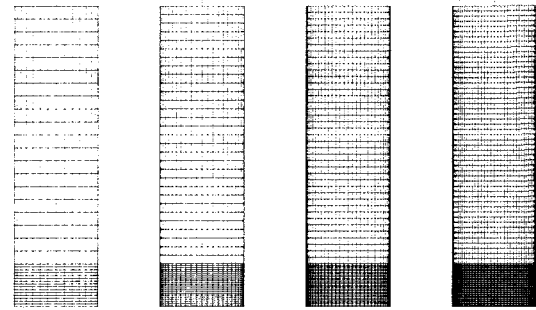


図-3 要素分割 (N1 シリーズ)

3. 参照解

要素分割が解析結果に及ぼす影響を議論するには、厳密解が既知であることが望ましい。しかしながら、この種の問題では、厳密解を得るのは容易でない。そこで、本研究では、厳密解に代わる参照解として、要素分割を細かくしていった際の収束解を用いる。

3.1 解析モデル

文献6), 7)を参考に、橋脚基部から0.5D (D: 断面直径)の領域を細かなシェル要素, 残りを粗いシェル要素, 橋脚供試体頂部に設置された載荷装置を剛な梁要素1個でモデル化する。梁要素とシェル要素の結合にはMPC (多点拘束)機能を使用し、結合断面で変位と回転を連続させる。図-3 (a)に基本の要素分割N1を示しているが、細かなシェル要素を用いる領域では、軸方向に15分割している。その他の分割数は要素形状比から決定している。この要素形状比は、細かいシェル要素の領域(以下では、細分割領域と呼ぶ)で約3.0, 粗いシェル要素の領域(以下では、粗分割領域と呼ぶ)で約0.7となっている。

N1モデルを基本とし、シェル要素の軸方向と周方向の要素分割数がほぼ1.5, 2.0, 2.5倍(すなわち、要素辺長はほぼ1/1.5, 1/2.0, 1/2.5)になるような要素分割モデルをさらに設定し、N1-1~3と呼ぶ。これらの要素分割を図-3 (b)~(d)に示す。

3.2 解析結果

N1シリーズ(N1, N1-1~3)の解析結果として、載荷点における水平荷重-水平変位関係(履歴曲線)の第1象限の包絡線を図-4に示す。この図より、要素分割が解析結果に大きな影響を及ぼすことが理解される。要素分割の影響は、最大耐力力点近傍で現れ始め、最大耐力力点以降の劣化域で顕著となる。要素が細かなモデルほど、耐力力低下の度合いは大

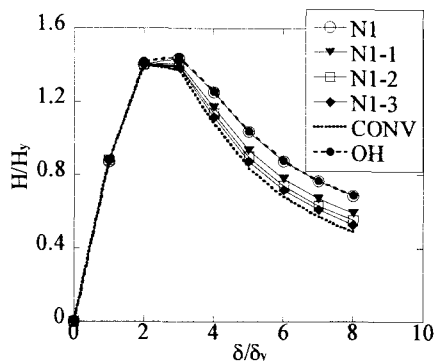


図-4 水平荷重-水平変位関係の包絡線 (N1 シリーズ)

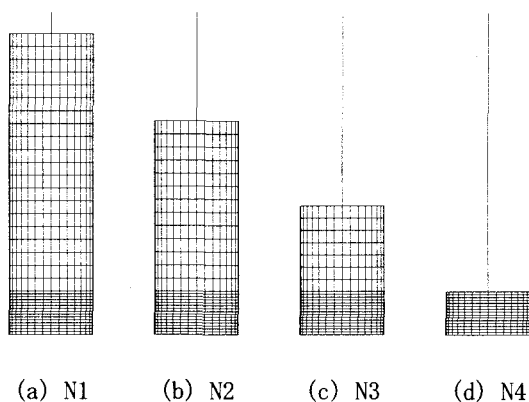


図-5 要素分割 (N1~N4)

きい。ただし、モデル間で局部座屈モードの違いは生じなかった。N1 シリーズの結果を外挿することにより、要素が無限小となった時の数値解 (収束解) を算定した。それが、図-4 の CONV である。

文献6) でも同じ供試体の解析が行われている。この文献の要素分割を用いて解析した結果を、図-4 に OH として示している。これは N1 モデルの結果とほぼ一致しており、収束解 (CONV) とはかなり異なっている。文献6) では、この要素分割を用いた解析により、種々の構成則の特性を、最大耐荷力点以降の挙動も含めて比較検討しているが、離散化誤差が十分小さくないため、その検討結果については再吟味の必要性が感じられる。

4. 梁要素の適用可能領域

鋼製橋脚の局部座屈を再現するには、シェル要素の使用が不可欠である。しかしながら、シェル要素を用いた解析は多大な計算時間を必要とする。そのため、鋼製橋脚で局部座屈が発生しそうな領域のみをシェル要素でモデル化し、残りは梁要素でモデル

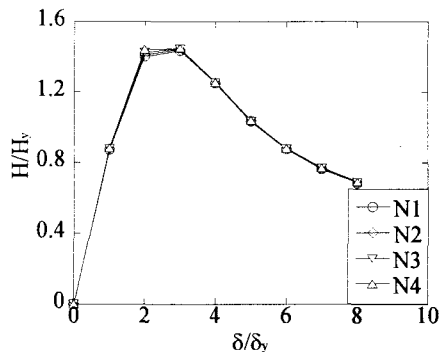


図-6 水平荷重-水平変位関係の包絡線 (N1~N4)

化することがしばしば行われている。しかしながら、梁要素を適用できる領域について仔細に検討した事例はない。ここでは、この点に関する検討を行う。

4.1 解析モデル

N1 モデルをもとに、細分割領域を橋脚基部から高さ $0.5D$ までに固定した上で、粗分割領域を漸次減少させ、減少した部分に梁要素を適用して新たな要素分割モデルを作成する。これらのモデルは N2~N4 と名付け、図-5 に示している。

N4 モデルにおいて、梁要素を 11 個と 31 個用いた 2 種類のモデルを設定し、解析を行った。その結果、両者にほとんど差が見られなかったため、梁要素の数は 11 個とした。N2, N3 モデルでは、梁要素の長さが N4 モデルの場合と同程度になるよう梁の要素数を定めている。ただし、上端の梁要素は載荷装置をモデル化しているため、いずれの要素分割モデルでも、N1 モデルの場合と同じ長さになっている。

4.2 解析結果

解析結果として、包絡線を図-6 に示す。 $2\delta_y$ から $4\delta_y$ にかけて多少の差が認められるが、その差は最大でも 2.8% に過ぎず、実用上、許容できる範囲である。また、モデル間で局部座屈モードの違いも生じなかった。これらのことより、粗分割領域をなくし、梁要素領域と細分割領域を直結した N4 モデルも使用可能と考えられる。

5. 細分割領域の要素分割

5.1 解析モデル

4 章の結果を踏まえ、N4 モデルを用いて、細分割領域での要素分割数の影響を検討する。N4 モデルの要素分割を基本とし、その細分割領域のシェル要素による分割数が軸方向、周方向ともにほぼ 1.5, 2.0, 2.5 倍 (要素辺長はほぼ $1/1.5$, $1/2.0$, $1/2.5$) となるような要素分割モデルを設定し、N4-1~3 と呼ぶ。

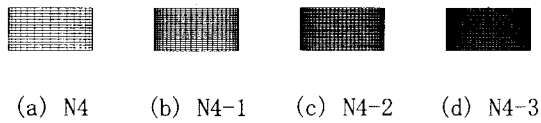


図-7 要素分割 (N4 シリーズ)

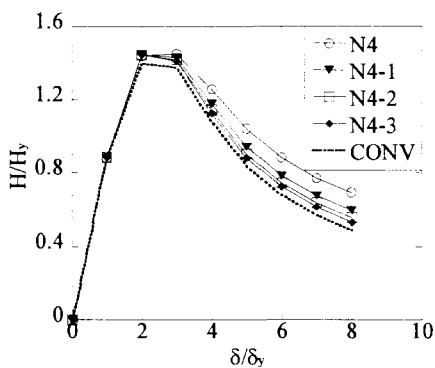


図-8 水平荷重-水平変位関係の包絡線 (No. 8 供試体 ; N4 シリーズ)

図-7にこれらのモデルを示している。

5.2 解析結果

解析結果として、N4 および N4-1~3 による水平荷重-水平変位曲線の包絡線を図-8に示す。要素分割の影響は、最大耐力力までは見られず、劣化域のみに現れ、要素が細かなモデルほど、耐力力低下の度合いが大きくなっている。ただし、モデル間で局部座屈モードに違いは生じなかった。

収束解に対する各モデルの解析誤差は、最大耐力力点である $2\delta_y$ において、N4 で 3.0%、N4-1 で 3.2%、N4-2 で 3.3%、N4-3 で 3.3% である。変形が進むにつれて誤差は増え、 $4\delta_y$ においては、N4 で 16.2%、N4-1 で 8.9%、N4-2 で 5.8%、N4-3 で 4.1% となる。ちなみに、この変形状態では、最も精度よい解が得られる N1-3 モデルでも 3.2% の誤差がある。

各要素分割モデルで使用されたシェル要素の数は、N4 モデルで 240、N4-1 モデルで 552、N4-2 モデルで 960、N4-3 モデルで 1520 である。これに対し、N1-3 モデルでは 3520 にも上る。このようなシェル要素の差は計算時間の差に直結し、本解析では、N4 モデル

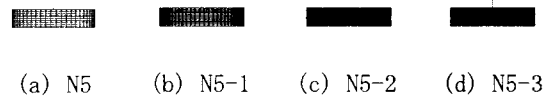


図-9 要素分割 (N5 シリーズ)

で 8 分、N4-1 モデルで 15 分、N4-2 モデルで 28 分、N4-3 モデルで 46 分、N1-3 モデルでは 219 分であった。

6. 径厚比の影響

径厚比により局部座屈の性状は変化する。そのため、道路橋示方書耐震設計編⁸⁾では、径厚比に制限を設けている。また、中村は、円形断面橋脚で象脚型座屈が発生する軸方向範囲を $3\sqrt{Rt}$ (R : 断面半径、 t : 板厚) としている³⁾。そこで、ここでは、径厚比が異なった場合の要素分割の影響について検討する。

具体的には、文献 1) の円形断面橋脚実験供試体の径厚比が 0.0763~0.123 であることに鑑み、径厚比として 0.075, 0.1, 0.125 の 3 つの値を考慮する。ちなみに、図-1 の円形断面橋脚の径厚比は 0.115 である。

径厚比は次のように定義される。

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

そこで、ここでは、図-1 の橋脚の板厚を変化させ、3 つの径厚比の異なる鋼製円形断面橋脚モデルを作成する。

6.1 解析モデル

図-7 の要素分割をここでも用いる。ただし、所定の径厚比になるよう、板厚を変化させる。加えて、中村の提案³⁾に従い、細分割領域を $3\sqrt{Rt}$ としたモデルでの解析も行う。この場合には、板厚だけでなく、細分割領域の大きさ(高さ)も径厚比に応じて変化する。その解析にも 4 種類 (N5, N5-1~3) の要素分割を考え、それぞれが N4, N4-1~3 の要素と同

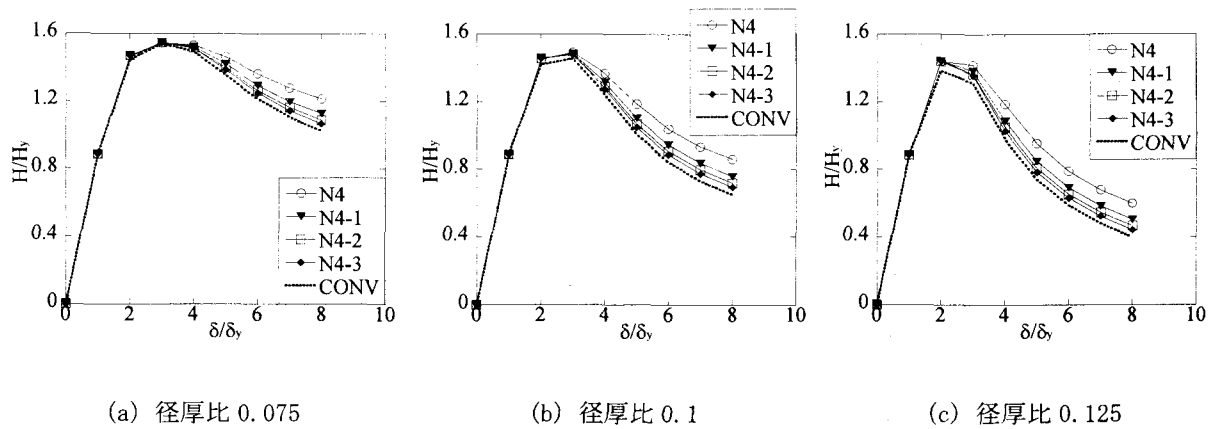


図-10 水平荷重-水平変位関係の包絡線 (N4 シリーズ)

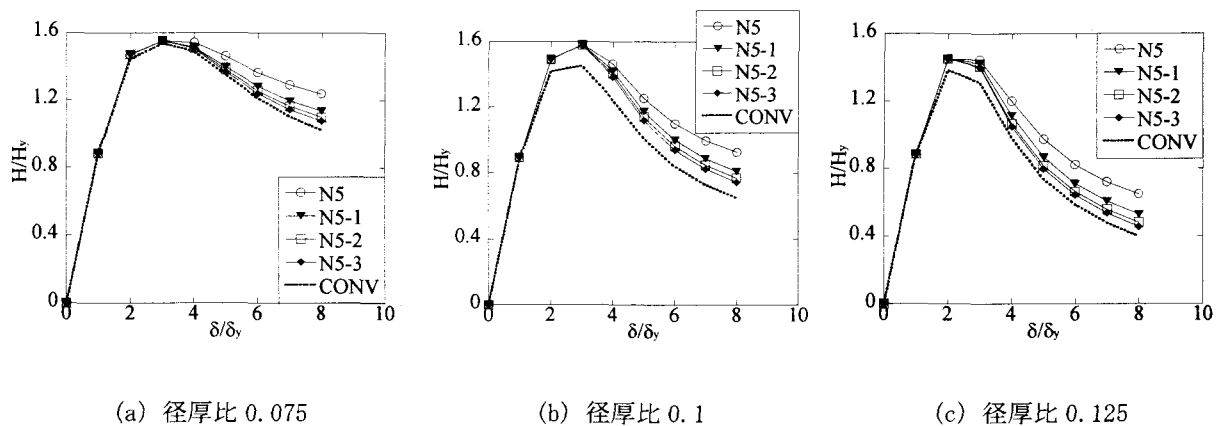


図-11 水平荷重-水平変位関係の包絡線 (N5 シリーズ)

程度の大きさとなるように分割数を定める。N5 シリーズの要素分割を図-9に示す。なお、ここでも比較検討のため、図-3のモデルを用いて、各径厚比に対する収束解を求める。

6.2 解析結果

解析結果として、径厚比ごとの水平荷重-水平変位曲線の包絡線を収束解とともに図-10, 11に示す。また、水平変位の折り返し点における、収束解に対する各モデルの解析誤差を表-1, 2にまとめている。表中、最大耐荷力点の変位を*で示している。

N4 シリーズの結果では、径厚比が大きくなると、最大耐荷力点の変位が小さくなる、最大耐荷力の値が減少する、最大耐荷力点以降の劣化勾配が大きくなる、解析誤差が増加するといった傾向が認められる。また、多少の例外はあるが、変位の増加に伴い、解析誤差は増加している。

一方、N5 シリーズの結果には、N4 シリーズほどの一貫性は見られない。径厚比 0.1 の最大耐荷力は径厚比 0.075 の場合よりも大きく、径厚比 0.1 の N5-2、

N5-3 モデルでの解析誤差は、径厚比 0.125 の場合よりもかなり大きくなっている。また、N4 シリーズに比して、全般的に誤差は大きい。なお、いずれのシリーズにおいても、モデル間で局部座屈モードに違いは生じなかった。

図-12, 13に、最大耐荷力点から水平変位が1サイクル進展した時点での変形性状を示している。径厚比が小さいと、局部座屈によって面外に変形する領域は広がっている。しかしながら、N4 シリーズでは、いずれの径厚比においても、細分割領域は局部座屈波形に比して十分大きい。それに対し、N5 シリーズでは、面外変形が細分割領域のほぼ全域にわたって生じている。そのため、局部座屈による面外変形挙動が、要素分割により制約を受けている可能性が高い。このことが、N5 シリーズでは解析結果に一貫性が見られず、また N4 シリーズよりも誤差が大きくなっている原因と考えられる。これより、梁要素と細分割領域だけで解析する場合には、細分割領域の大きさとして $3\sqrt{Rt}$ を採用するのは、避けた方がよ

表-1 解析誤差 (N4 シリーズ)

表-2 解析誤差 (N5 シリーズ)

(a) 径厚比 0.075

	$2\delta_y$	$3\delta_y^*$	$4\delta_y$	$5\delta_y$
N4	1.3%	0.4%	2.7%	8.0%
N4-1	1.6	0.5	2.0	4.7
N4-2	1.7	0.6	1.5	3.2
N4-3	1.7	0.6	1.3	2.4

(a) 径厚比 0.075

	$2\delta_y$	$3\delta_y^*$	$4\delta_y$	$5\delta_y$
N5	1.8%	1.1%	3.5%	8.1%
N5-1	2.0	1.1	1.7	3.5
N5-2	2.1	1.1	1.5	2.2
N5-3	2.1	1.2	1.1	1.3

(b) 径厚比 0.1

	$2\delta_y$	$3\delta_y^*$	$4\delta_y$	$5\delta_y$
N4	2.2%	2.7%	10.2%	17.7%
N4-1	2.5	2.3	5.9	9.5
N4-2	2.5	1.9	4.0	6.1
N4-3	2.6	1.8	2.9	4.1

(b) 径厚比 0.1

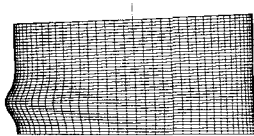
	$2\delta_y$	$3\delta_y^*$	$4\delta_y$	$5\delta_y$
N5	5.1%	9.0%	18.0%	24.4%
N5-1	5.2	8.9	14.7	16.4
N5-2	5.2	8.8	12.9	13.3
N5-3	5.2	8.8	11.5	11.0

(c) 径厚比 0.125

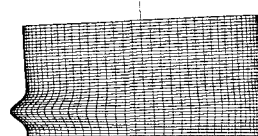
	$2\delta_y^*$	$3\delta_y$	$4\delta_y$	$5\delta_y$
N4	3.8%	8.1%	20.9%	29.0%
N4-1	3.9	5.5	10.9	14.8
N4-2	3.9	4.3	7.0	9.2
N4-3	3.9	3.5	4.8	6.0

(c) 径厚比 0.125

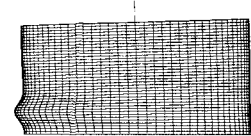
	$2\delta_y^*$	$3\delta_y$	$4\delta_y$	$5\delta_y$
N5	4.8%	10.3%	22.5%	31.9%
N5-1	4.9	8.8	13.7	17.5
N5-2	4.9	7.3	8.7	10.8
N5-3	4.9	6.8	7.1	8.1



(a) 径厚比 0.075 ($4\delta_y$)

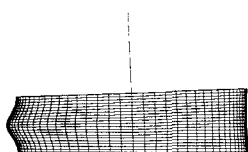


(b) 径厚比 0.1 ($4\delta_y$)

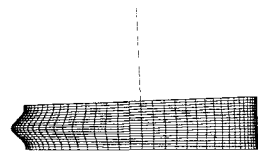


(c) 径厚比 0.125 ($3\delta_y$)

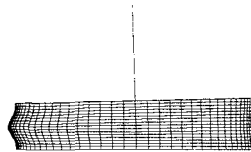
図-12 変形性状 (N4 シリーズ; 変形倍率 5 倍)



(a) 径厚比 0.075 ($4\delta_y$)



(b) 径厚比 0.1 ($4\delta_y$)



(c) 径厚比 0.12 ($3\delta_y$)

図-13 変形性状 (N5 シリーズ; 変形倍率 5 倍)

いと判断される。

表-1 に示された N4 シリーズの誤差に着目する。基本の N4 モデルを用いれば、すべての径厚比におい

て、最大耐荷力点での誤差は 5% を十分に下回っている。最大耐荷力点より水平変位が 1 サイクル進展した変形状態でも、10% 程度の解析誤差が許容できるの

であれば、N4モデルでよい。解析誤差を5%以下に抑えるためには、径厚比が0.075の場合にはN4モデルでよいが、径厚比が大きくなると、N4-2モデルを使用する必要がある。N4-1モデルでは、5%を若干上回る解析誤差となる。最大耐力力点より水平変位が2サイクル進展した変形状態では、解析誤差を10%以下にするには、径厚比0.075, 0.1, 0.125の橋脚に対して、それぞれN4, N4-1, N4-2モデルを使用する必要がある。解析誤差を5%以下にするには、径厚比0.075の場合にはN4-1モデル、径厚比0.1, 0.125の場合にはN4-3モデルを用いる必要がある。

7. まとめ

繰り返し水平荷重を受ける鋼製円形断面橋脚の複合非線形解析を、有限要素法で行う際の要素分割について検討した。解析には汎用有限要素解析プログラムABAQUS⁵⁾を使用し、S4R(シェル要素)と梁要素B310S(梁要素)でモデル化を行った。構成則には、ABAQUSに標準的に組み込まれているバイリニア型移動硬化則のMises型弾塑性モデルを使用した。本研究で得られた主な成果は次の通りである。

- (1) 要素分割の影響は、最大耐力力点近傍で現れ始め、劣化域で顕著となる。
- (2) 橋脚基部からの距離が0.5D(D:断面直径)より上の領域については、梁要素によるモデル化が可能である。このようなモデル化により、計算時間は大幅に短縮できる。
- (3) 径厚比が大きくなると、解析誤差が増加する。また、変位の増加に伴い、解析誤差は増加する傾向にある。径厚比の大きな橋脚、大きな変形状態までの解析を行う際には、より細かな要素分割が必要とされる。
- (4) 橋脚基部から高さ0.5Dまでの領域は、シェル要素で分割する必要がある。この領域の軸方向を15分割、要素の縦横比を1:3としたものを基本モデルとする。この基本モデルで、最大耐力力までは径厚比によらず、解析誤差を5%以下に抑えられる。
- (5) 最大耐力力点より1サイクル進んだ変形状態でも、解析誤差を10%まで許容できるのであれば、径厚比によらず、基本モデルで十分である。しかしながら、誤差を5%以下に抑える必要があ

れば、径厚比が0.075の場合を除き、要素の辺長を縦横ともに基本モデルの1/2.0にまで小さくする必要がある。

- (6) 最大耐力力点より2サイクル進んだ変形状態では、誤差はさらに大きくなる。解析誤差を10%以下に抑えるには、径厚比0.075では基本モデルでよいが、径厚比0.1では基本モデルの1/1.5、径厚比0.125では基本モデルの1/2.0の要素辺長を有するシェル要素を使用する必要がある。解析誤差を5%以下とするには、径厚比0.075では基本モデルの1/1.5、径厚比0.1および0.125では、基本モデルの1/2.5の要素辺長を有するシェル要素を使用しなければならない。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 名古屋高速道路公社, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会: 道路橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同報告書(I), 1997.
- 2) 鋼構造物の耐震検討小委員会: 第4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, 土木学会鋼構造委員会, 2002.
- 3) 中村秀治: 鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析, 土木学会論文集, No. 549/I-37, pp. 205-219, 1996.
- 4) 土木学会・JSSC 橋梁システムと耐震性小委員会: 橋梁システムの動的解析と耐震性, 土木学会鋼構造委員会・日本鋼構造協会次世代土木鋼構造研究特別委員会, 2000.
- 5) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.8, 1998.
- 6) 大田孝二, 中村聖三, 小林洋一, 中川知和, 水谷慎吾, 野中哲也: 鋼製橋脚の耐震設計に対する構造解析ソフトウェアの適用性, 橋梁と基礎, 97-12, pp. 33-39, 1997.
- 7) 山田大彦: 鋼製円筒形貯水槽の像の脚現象に関する考察, 圧力技術, 第18巻, 第6号, pp. 287-294, 1980.
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 丸善, 2002.

(2004年9月17日受付)