

鋼製円筒橋脚の有限要素解析に関する一考察

山口栄輝*, 永松寿隆**, 南野能克***, 後藤芳顯#, 久保喜延##

*Ph. D. 九州工業大学助教授 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 工学研究科博士前期課程 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

***工修 国土交通省九州地方整備局(港湾空港関係) (〒750-8504 山口県下関市竹崎町4-6-1)

#工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市中昭和区御器所町)

##工博 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)

阪神大震災以降, シェル要素を用いた鋼製橋脚の複合非線形有限要素解析が数多く行われるようになった. この種の解析を行えば局部座屈も再現でき, 実験結果とも良く一致した結果が得られるため, 多大な経費・時間のかかる実験の代役を果たすことが期待されている. しかしながら, 解析精度を確保するには十分に細かな要素を用いる必要があるものの, 要素分割が解析結果に及ぼす影響については必ずしも明らかではない. 本研究では, 種々の要素分割を用いて, 繰り返し水平荷重を受ける鋼製円筒橋脚の複合非線形有限要素解析を行った. その結果, 特に耐荷力の劣化域で顕著な要素分割の影響が認められた. また, 計算時間の短縮にも配慮すべく, 梁要素の適用性についても検討を加え, 梁要素は既存の文献のモデルより大きな領域に適用できることを示した.

Key Words: Steel bridge pier, Nonlinear finite element analysis, Finite element mesh, Cyclic loading

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震では, 鋼製橋脚にも多大な被害が生じた. これらの被害の多くは, 上部工重量に起因する軸圧縮力と地震力である繰り返し水平荷重により生じたものと考えられる. このような荷重下における鋼製橋脚の変形挙動に関する研究は従来より行われてきたが, 兵庫県南部地震以降, その被害状況を踏まえ, さらに精力的に行われている^{1), 2)}.

数多くの実験的検討が行われているが, 耐震性に及ぼす因子は多岐にわたるため, 費用や時間の制約上, 解析による検討も不可欠である. また, ハード, 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急速に整いつつある. 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数多く行われ, シェル要素を用いることにより, 局部座屈が再現され, 解析方法に関してかなりの知見が蓄えられてきている. しかしながら, この種の解析において, 要素分割が解析結果に与える影響について検討した事例はほとんどなく, 文献3), 4)で少し言及されている程度である.

以上のことを踏まえ, 本研究では, 鋼製円筒橋脚を解析対象として取り上げ, 要素分割が解析結果に及ぼす影響について検討する. なお, 本研究の全ての解析

で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. 解析方法

2.1 解析モデル

解析対象には, 建設省土木研究所の載荷実験で採用された No. 8 供試体¹⁾を取り上げる. この橋脚モデルの概略を図-1に示している. 図中, 載荷点と供試体頂部に 230mm のギャップがあるが, これは載荷装置の高さに対応している.

対称性を考慮し, 供試体の 1/2 のみを解析する. 解析に使用する要素は ABAQUS に組み込まれているシェル要素 (S4R) と梁要素 (B310S) であり, これらにより, 解析対象橋脚モデルの要素分割を行う.

材料挙動には, バイリニア型 (2次勾配はヤング率の 1/100) の移動硬化則に基づいた弾塑性 (J2) モデルを適用する. これは, ABAQUS で標準的に扱える構成則モデルである.

2.2 載荷条件

この種の載荷実験で標準的に行われている方法に従い, 一定圧縮軸力 P (公称降伏軸力の 15%) を作用させ

表-1 参照解を得るための要素分割モデル

モデル	細分割領域	粗分割領域
N1	16×15	16×20
N1-1	24×23	24×30
N1-2	32×30	32×40
N1-3	40×38	40×50

(周方向分割数) × (軸方向分割数)

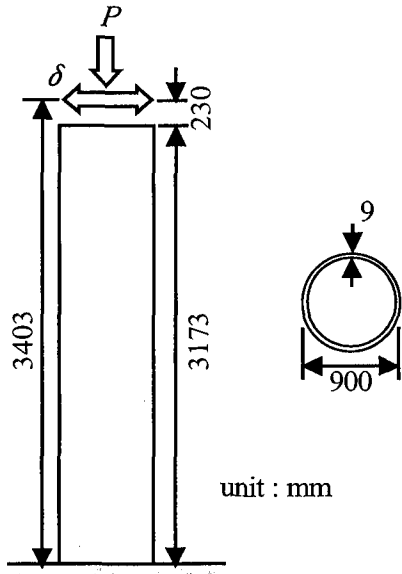


図-1 解析対象鋼製円筒橋脚

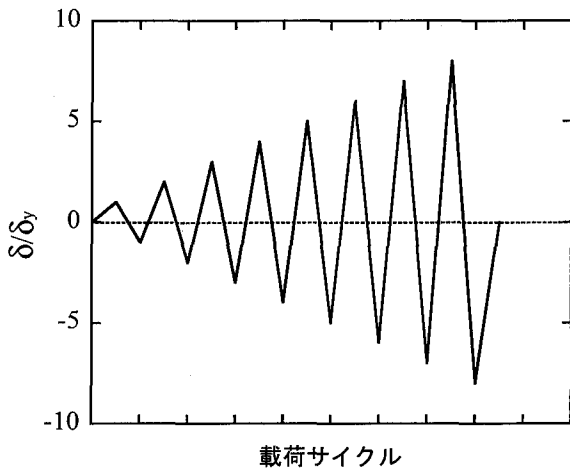
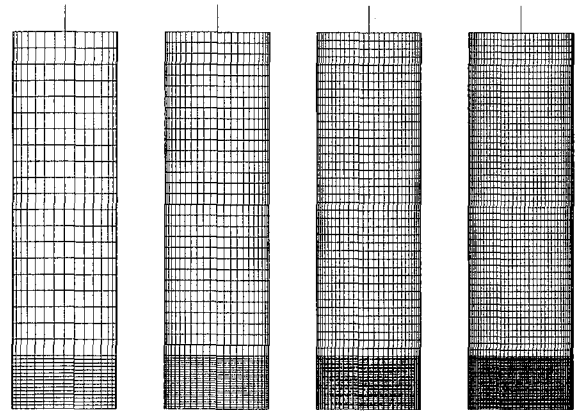


図-2 荷重点の水平変位履歴

た上で、繰り返し水平荷重 H を静的に作用させる水平交番荷重を採用する。水平荷重 H の大きさは、図-2 に示すように、荷重点の水平変位 δ の振幅が $0 \rightarrow +\delta_y \rightarrow -\delta_y \rightarrow +2\delta_y \rightarrow -2\delta_y \rightarrow \dots$ と漸次増加しながら変化するよう制御する。すなわち、各振幅における繰り返しは1回となっている。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 に対応する水平力を H_y で表す。



(a) N1 (b) N1-1 (c) N1-2 (d) N1-3

図-3 参照解を得るための要素分割モデル

3. 解析結果および考察

3.1 参照解

本研究では、要素分割が解析結果に及ぼす影響を検討する。その検討を行うためには、まず参照解を得ておく必要がある。この種の問題では、解析的な厳密解を得ることは可能でないため、ここでは、要素分割を細かくしていった際の収束解を参照解とする。

図-3 (a) に基本の要素分割を示す。橋脚下端より $0.5D$ (D : 断面の直径) 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荷重装置を剛な梁要素1個でモデル化している。これを N1 モデルと呼ぶ。なお、以下では、細かなシェル要素を用いる領域を細分割領域、粗いシェル要素を用いる領域を粗分割領域と言う。

この 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 倍になるような要素分割モデルをさらに設定し、それぞれ N1-1, 2, 3 と呼ぶ。要素分割数の詳細を表-1 にまとめている。表中の数字は (周方向分割数) × (軸方向分割数) である。また、これらの要素分割図を図-3 (b) ~ (d) に

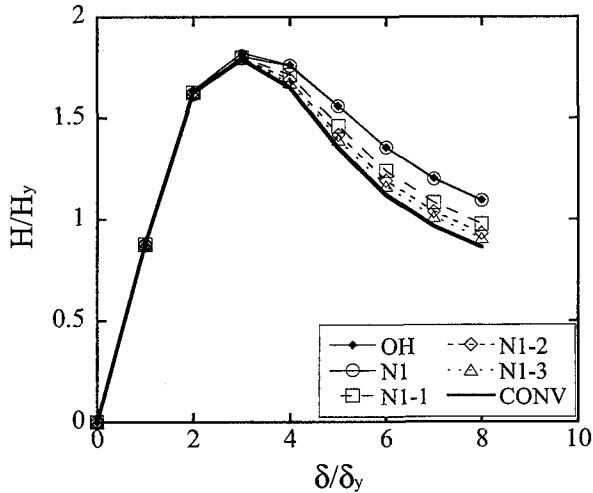


図-4 要素分割の影響

示す。

解析結果として、荷重点での水平荷重 H - 水平変位 δ 関係の包絡線を図-4に示している。要素分割により、解析結果が大きく変わることが、この図から理解される。端的には、最大耐力点近傍から要素分割による影響が明確になり始め、要素が小さなモデルほど、耐力劣化の度合いが大きくなっている。

同一変位点における水平荷重と要素の代表寸法の2乗はほぼ直線的な関係を有する。このことを利用して、収束解（要素が無限小になったときの数値解）を評価したものが、図-4に示す CONV である。

文献6)でも同じ供試体の解析が行われている。この文献に示されている要素分割を用いてここでも解析を行い、その結果を図-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、厳密解とはかなり異なっている。したがって、必ずしも十分に細かな要素分割ではないと思われる。

3.2 梁要素の適用可能領域

鋼製橋脚の局部座屈を扱うには、シェル要素の使用が不可欠であるが、シェル要素と梁要素では、計算時間に大きな違いがある。そのため、鋼製橋脚を部分的にシェル要素でモデル化し、残りは梁要素でモデル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は明らかにされていないのが現状である。ここでは、この点に関する検討を行う。

N1 モデルを基本とし、細分割領域は橋脚基部から $0.5D$ の範囲とした上で、粗分割領域を $2.5D$ から $0.0D$

まで $0.5D$ ずつ変化させて要素分割モデルを設定する。粗分割領域の縮小に伴い、梁要素を用いる領域は $0.5D$ ずつ延びることになる。これらのモデルは順に、それぞれ N2~N7 と名付ける。要素分割図を図-5に示している。

梁要素の数については、N7 モデルにおいて11要素と31要素を用いて解析を行うことで検討を加えたが、要素数による差はほとんど見られなかった。そこで、N7 モデルでは11要素を用いることとし、他の要素分割モデルでは、梁要素の長さが、N7 モデルと同程度となるように分割数を定めることとした。ただし、最上部の梁要素は荷重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としている。

解析結果として、荷重点での水平荷重 H - 水平変位 δ 関係の包絡線を図-6に示す。この図を見ると、 $2\delta_y$

から $4\delta_y$ にかけて差が認められる。しかしながら、同

一変位における耐力の差は最大でも2.1%に過ぎず、実用上、許容できる範囲と考えられる。梁要素は、既存の研究の要素分割モデル^{6),7)}よりも、かなり長い領域に適用できるようである。

3.3 細分割領域の要素分割

前節の結果を踏まえ、N7 モデルを対象とし、細分割領域での要素分割数の影響を検討する。そのために、シェル要素の数が軸方向、周方向共に約1.5, 2.0, 2.5倍となるような要素分割モデルを設定し、N7-1~3と呼ぶ。シェル要素数の詳細は表-2、要素分割図は図-7に示している。

解析結果として、N7 および N7-1~3 による荷重点での水平荷重 H - 水平変位 δ 関係の包絡線を図-8に示す。この図によれば、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、要素が小さなモデルほど、耐力低下の度合いが大きくなっている。

N7, N7-1~3 による解析結果から収束値を推定し、CONV7 として、3.1で求めた収束解 (CONV) とともに図-8に示している。ここでの収束値 (CONV7) と収束解 (CONV) の差は、最大で2.5%である。

円筒のモデル化に使用するシェル要素の数は N7-1 モデルで552個、N7-2 モデルで960個、N7-3 モデルで1520個である。これに対し、最も精度良い解が得られる N1-3 モデルでは、3520個にも上る。シェル要素数の差は計算時間の違いに直結し、N7-1 モデルで約19分、N7-2 モデルで約33分、N7-3 モデルで約56分、N1-3 モデルでは約211分であった。

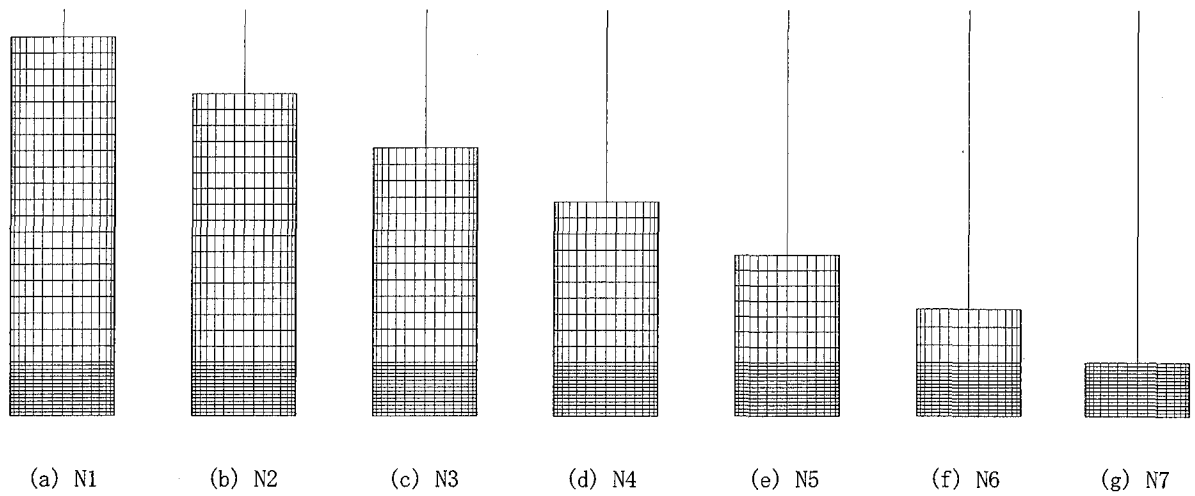


図-5 梁要素適用可能領域を検討するための要素分割モデル

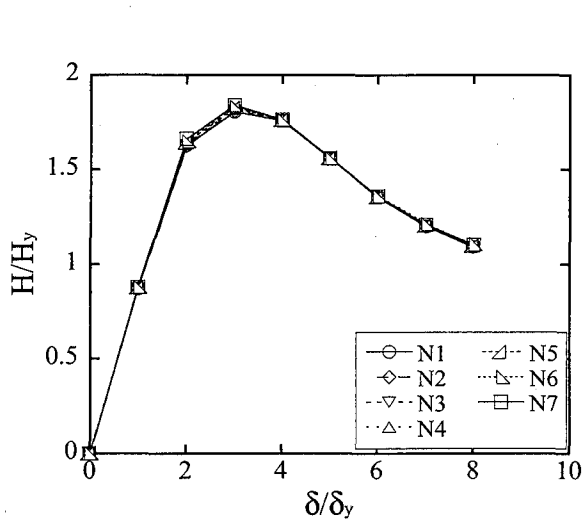


図-6 梁要素適用領域の影響

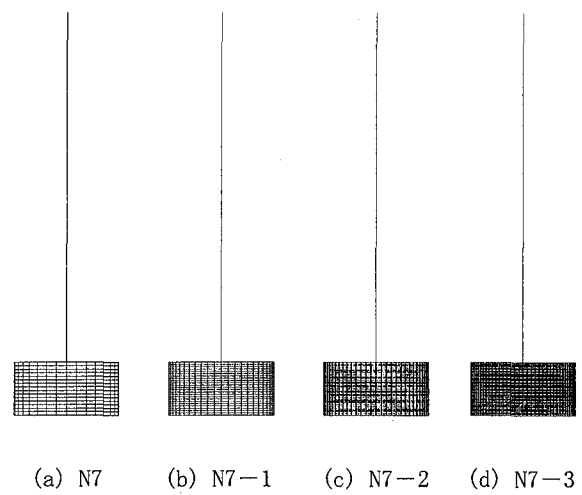


図-7 細分割領域の要素分割を検討するための要素分割モデル

表-2 細分割領域の要素分割を検討するためのモデル

モデル	細分割領域	粗分割領域
N7	16×15	—
N7-1	24×23	—
N7-2	32×30	—
N7-3	40×38	—

(周方向分割数) × (軸方向分割数)

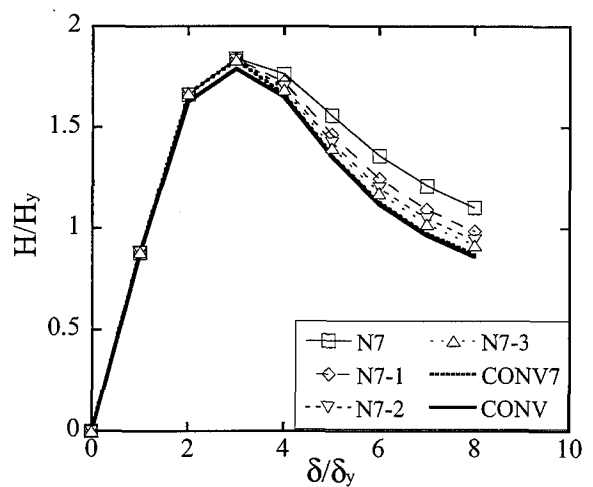


図-8 細分割領域における要素分割の影響

表-3 誤差と計算時間

モデル	$2\delta_y$	$3\delta_y$	$4\delta_y$	$5\delta_y$	計算時間
N7	2.1%	2.8%	6.9%	15.3%	8分
N7-1	2.3	2.7	4.4	8.3	19
N7-2	2.5	2.6	3.0	5.2	33
N7-3	2.5	2.5	2.2	3.5	56
N1-3	0.0	0.2	1.5	3.2	211

実用上は、 $4\delta_y$ まで3%以内の誤差に収まるN7-2モデルで十分なことも多いと思われるが、実際に使用する要素分割は、目的に応じて、計算時間と精度とのバランスで決まることになると思われる。参考のため、N7, N7-1~3 およびN1-3の各モデルを用いた際の、収束解(CONV)に対する誤差と計算時間を表-3に示す。

4. まとめ

本研究では、建設省土木研究所の載荷実験に用いられたNo.8供試体を対象に、要素分割について検討した。その結果、要素分割が解析結果に大きな影響を及ぼすこと、梁要素は既存の文献のモデルより大きな領域に適用できることを示した。さらに、要素分割と誤差および計算時間を整理し表示した。本研究が、類似の解析を行う際の参考になれば幸いである。

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: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同報告書(Ⅰ), 1997年.
- 2) 耐震設計WG: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 土木学会(鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会), 1996年.
- 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, 205-219, 1996年.
- 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年.
- 5) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.5, 1995.
- 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, pp. 33-39, 1997年.
- 7) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉, 村松寿男: 鋼製パイプ断面橋脚も繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究, 土木学会論文集, No. 577/I-41, 181-190, 1997年.

(2001年12月7日受付)

ON FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STEEL BRIDGE PIER WITH PIPE SECTION

Eiki YAMAGUCHI, Hisataka NAGMATSU, Yoshikatsu NANNO, Yoshiaki GOTO and Yoshinobu KUBO

After the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan, 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 and the analyses are expected to fill 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 conducted the nonlinear finite element analysis of a steel bridge pier with a pipe section, using various meshes. The influence was indeed significant especially in

the post-peak region. Also, the region where beam elements were applicable was investigated, and it has been found that much larger portion of a bridge pier than in existing studies can be modeled by beam elements.