

ファイバーモデルを用いた鋼製橋脚のモデル化に関する検討

小野 潔¹・奥村 徹²・後藤 芳顕³

¹正会員 博（工） 大阪大学大学院准教授 工学研究科地球総合工学専攻
（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

²正会員 博（工） 名古屋工業大学大学院助教 工学研究科 社会工学専攻
（〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町）

³フェロー会員 工博 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科 社会工学専攻（同上）

1. はじめに

近年、ファイバーモデルを用いて鋼製橋脚、鋼製アーチ橋等の鋼橋の耐震性能に関する検討を行う例が報告されるようになってきている。ファイバーモデルによる解析は、鋼材等の材料の応力-ひずみ関係を直接定義して鋼部材の塑性履歴特性を表現するもので、解析においては軸方向の変形（軸力変動）の影響を自動的に考慮できるため汎用性があり、適切な解析を行えば鋼構造物（鋼部材）の耐震性能の検討を行う上で非常に有用なツールとなり得ると考えられる。

その一方、ファイバーモデルによる解析では、要素分割や断面分割の程度が解析結果の精度に与える影響が大きく、実設計で用いるには検討課題が残されているとの指摘もなされている^{1), 2), 3)}。また、当然のことながら、解析ソフトウェア間の解析結果のばらつきがあることも考えられ、その違いを把握しておくことは重要であると言える。

そこで、JSSCの「鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会：耐震設計法研究部会（主査：後藤芳顕）」（以下、「JSSC耐震部会」という）では、実務設計レベルでのファイバーモデルによる鋼橋の耐震性能評価が適切に行えるようにするため、多方面から検討を行ってきた。その中で、基本となる単柱式鋼製橋脚を対象に面内の解析により耐震性能評価を行う際の要素分割と断面分割の検討、解析ソフトウェアの差異による解析結果のばらつきに関する検討、モデル化に際しての留意事項の整理を行った。本稿では、JSSC耐震部会の報告書⁴⁾で紹介される単柱式鋼製橋脚に関する検討結果のうち、静的解析の検討結

果の概要について報告を行う。なお、詳細については、JSSC耐震部会報告書⁴⁾を参照いただきたい。

2. 検討対象とした鋼製橋脚の概要

静的解析に関する検討を行うために用いる矩形断面鋼製橋脚（コンクリート無充填）の選定を行った。静的解析に関する検討では、土木研究所等の共同研究⁵⁾で用いられたコンクリート無充填矩形断面鋼製橋脚の供試体KD-5を解析対象とした。図-2.1に概要と諸元を示す。

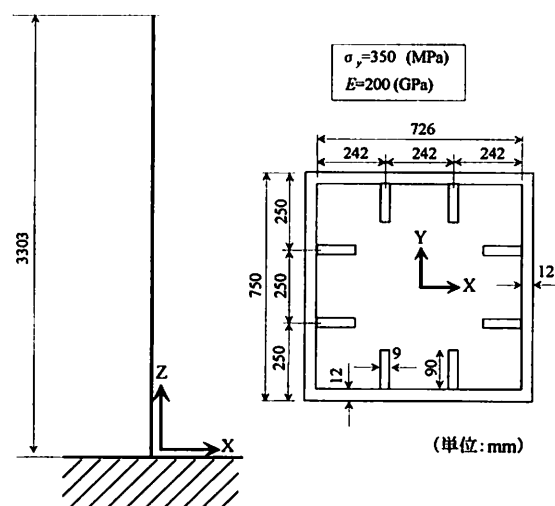


図-2.1 KD-5 供試体

3. 単柱式鋼製橋脚のモデル化

本検討の目的は、ファイバーモデルによる実験結果の再現性の検証ではなく、妥当な精度を得るための要素分割と断面分割数の提案、解析ソフトウェアの差異による解析結果のばらつきの検証であるため、橋脚部分のみを対象とした単純な構造について解析を行った。すなわち、基礎構造を剛と仮定して橋脚基部を完全固定し、上部構造は質量のみを考慮した。

(1) 縦リブのモデル化

実際の断面のとおり、縦リブは忠実にモデル化した（図-3.1参照）。

(2) 使用する要素と材料構成則

静的解析における検討では、曲げせん断変形を無視したベルヌーイ・オイラーはり理論に基づくはり要素を用いた検討も行ったが、本稿では、曲げせん断変形の影響を考慮した弾塑性チモシェンコはり要素を用いた検討結果のみを紹介する。ここでは、橋脚断面に作用する垂直応力とせん断応力との連成⁶⁾が材料構成則に与える影響は無視し、垂直応力と軸ひずみ間のみに材料非線形性を考慮した。せん断応力とせん断ひずみの関係は以下のようにせん断力とせん断ひずみ間の線形弾性の関係として定義した。

$$V = A_{ef} G \gamma \quad (3.1)$$

ここに、 V ：せん断力、 A_{ef} ：橋脚の有効せん断断面面積でフランジを除いたウェブの断面積、 G ：せん断弾性係数、 γ ：せん断ひずみ（一様）である。

垂直応力と軸ひずみ間の材料構成則は 2 次勾配 $E/100$ のバイリニア移動硬化則を使用した。

4. 要素分割

提案する要素分割・断面分割の方法について以下に述べる。なお、以下に示す(1)の要素分割および(2)の断面分割モデルを「提案分割」と呼ぶこととする（図-3.1）。さらに、提案分割の妥当性を検証するために、収束解を得るための要素分割・断面分割モデルとして図-4.1に示す要素分割・断面分割を十分に細かくとった「細分割」を設定する。

(1) 要素分割

a) 塑性化する領域の要素分割

- $B_E/5$ 以下の要素長とする。ここで、 $B_E = (B_F + B_W)/2$ 、 B_F 、 B_W ：フランジおよびウェブの幅（図-3.1））である。
- 塑性化が生じる可能性がある部位については、下記のb)ではなく、当該a)の要素長を使用する。
- ひずみを使用して鋼部材の耐震性能を評価する場合、塑性化する、しないに関わらず、平均ひずみの算出を行う領域（部位）の分割に用いる要素長は当該a)の要素長を使用する。

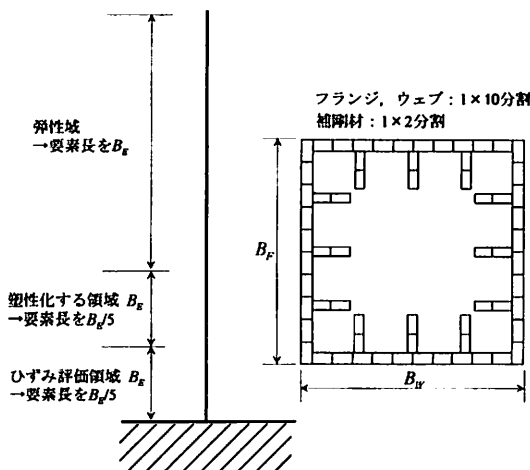


図-3.1 要素分割・断面分割（提案分割）

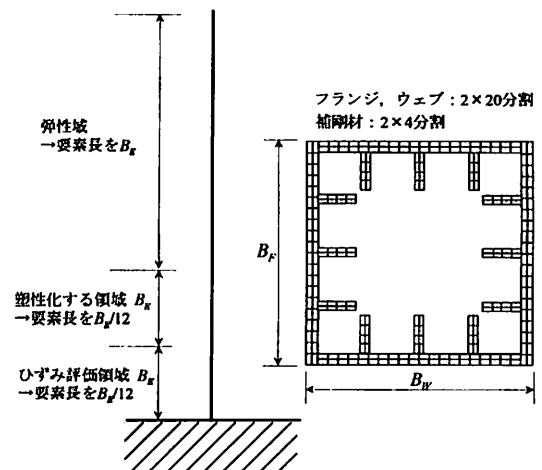


図-4.1 要素分割・断面分割（細分割）

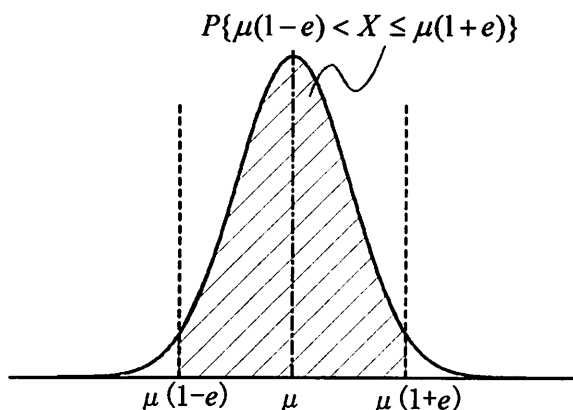


図-5.1 正規分布を仮定した場合のデータのばらつき

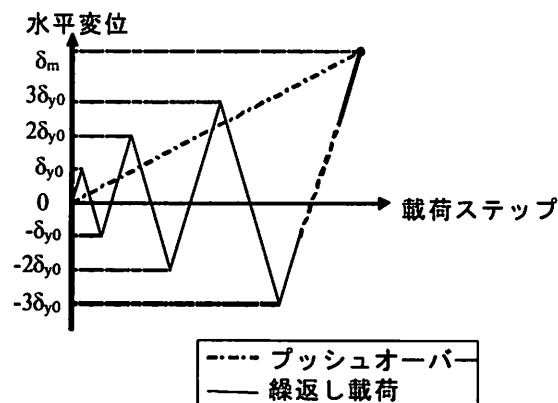


図-6.1 水平変位の与え方

b) 塑性化しない領域の要素分割

- ・ B_E 以下の要素長とする。

(2) 断面分割

a) フランジおよびウェブの板幅方向の分割

- ・ フランジおよびウェブの板幅方向について10分割以上の断面分割を行うこととする (図-3.1)。

b) 縦リブの高さ方向の断面分割

- ・ 縦リブの高さ方向に関して2分割以上とする。
- ・ ただし、上記の縦リブの分割による微小断面の幅が a) のフランジまたはウェブの分割による微小断面の幅よりも大きくなる場合には、a) の分割に相当する程度の断面分割を行うこととする。

c) フランジ、ウェブおよび縦リブの板厚方向の断面分割

- ・ フランジ、ウェブおよび縦リブの板厚方向の断面分割についてはそれぞれ1分割以上とする。

(3) 要素分割・断面分割の提案を行うにあたって配慮した事項等の概要

- ・ ウェブの幅に対して板厚は十分小さく、平面保持の仮定のもとでは板厚方向のひずみ分布の勾配が解析結果に与える影響は十分に小さいことから、板厚方向の分割は1分割でよいものとした。
- ・ 各解析の収束条件は使用するソフトウェアのデフォルトの値を用いた。
- ・ 当然のことながら、JSSC耐震部会報告書⁴⁾および本稿で紹介する上記の提案は、妥当性を個別に検

証した本報告書の提案以外の要素分割・断面分割等の使用を何ら妨げるものではない。また、解析ソフトも適宜バージョンの変更が行われる。そのような状況に対応するため、検討内容・結果はベンチマーク的な役割を果たす資料となることを1つの目的として作成した。

5. ばらつきを表す指標

図-5.1に示すように各解析結果の分布として正規分布を仮定することで着目する応答値のばらつきの評価を行った。具体的には、応答値のばらつきの大小を判断するための基準として、 $\mu(1 \pm e)$ を誤差の許容範囲として設定し、この範囲内の確率 ($P\{\mu(1-e) < X \leq \mu(1+e)\}$) を表示する。ここに、 μ は平均値、 e は平均値に関する誤差の許容範囲を定めるパラメータである。本検討では誤差の許容範囲として $e=0.05$ 、すなわち平均値に対して $\pm 5\%$ を設定し、ばらつきに関する考察を行うこととした。参考のため、各解析結果には上記の確率 ($P\{\mu(1-e) < X \leq \mu(1+e)\}$) に加えて変動係数も表示する。また、個々の解析機関の応答値の精度を確認するために、平均値に対する各解析結果の比を用い、上記の許容範囲 $\mu(1 \pm e)$ との比較により考察を行った。

6. 静的解析における検討

図-2.1に示した橋脚A (KD-5) を対象とした

pushover解析および、漸増繰り返し載荷解析により、提案する要素分割・断面分割方法の妥当性の検証と各解析ソフトウェア間の差異による解析結果のばらつきについて検討を行った。なお、7種類の解析ソフトを用いて、14の機関で解析を行った。

(1) 解析方法
解析は、橋脚モデルの頂部に鉛直下向きの一定荷

表-6.1 Pushover 解析の結果（提案分割）

解析機関	柱基部の平均ひずみ		柱基部の曲げモーメント		柱基部の水平反力	
	$\varepsilon/\varepsilon_y$	$\varepsilon/\bar{\varepsilon}$	$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M/\bar{M}$	$H(\text{kN})$	$H/\bar{H}$
A1	6.00	(1.01)	4247	(1.00)	1233	(0.99)
A2	5.97	(1.01)	4241	(1.00)	1243	(1.00)
A3	5.99	(1.01)	4244	(1.00)	1232	(0.99)
B1	5.97	(1.01)	4247	(1.00)	1286	(1.04)
B2	5.83	(1.00)	4244	(1.00)	1285	(1.03)
C1	5.92	(1.00)	4235	(1.00)	1236	(1.00)
C2	5.92	(1.00)	4235	(1.00)	1240	(1.00)
D1	5.91	(1.00)	4240	(1.00)	1237	(1.00)
D2	5.97	(1.01)	4243	(1.00)	1242	(1.00)
E1	5.88	(0.99)	4222	(1.00)	1235	(0.99)
E2	5.90	(1.00)	4237	(1.00)	1236	(1.00)
F	5.69	(0.96)	4224	(1.00)	1280	(1.03)
G1	5.97	(1.01)	4246	(1.00)	1240	(1.00)
G2	5.98	(1.01)	4258	(1.00)	1243	(1.00)
平均値	$\bar{\varepsilon}/\varepsilon_y = 5.92$		$\bar{M} = 4239 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$		$\bar{H} = 1241 \text{ (kN)}$	
提案分割の平均/細分割の平均	1.00		1.00		1.00	
変動係数	1.4%		0.2%		1.0%	
$P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$	1.00		1.00		1.00	

※) 括弧内の数値は平均値に対する比をあらわす。
平均値, 変動係数, $P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$ は微小変位解析のソフトウェアBを除いて求めた。
 $P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$: 応答値Xが許容範囲(平均±5%)内に入る確率(ただし, 正規分布を仮定)

表-6.2 Pushover 解析の結果（細分割）

解析機関	柱基部の平均ひずみ		柱基部の曲げモーメント		柱基部の水平反力	
	$\varepsilon/\varepsilon_y$	$\varepsilon/\bar{\varepsilon}$	$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M/\bar{M}$	$H(\text{kN})$	$H/\bar{H}$
A1	6.00	(1.02)	4249	(1.00)	1226	(0.99)
A2	5.97	(1.01)	4244	(1.00)	1231	(0.99)
A3	5.99	(1.01)	4247	(1.00)	1225	(0.99)
B1	5.96	(1.01)	4247	(1.00)	1286	(1.04)
B2	5.83	(0.99)	4243	(1.00)	1285	(1.04)
C1	5.91	(1.00)	4238	(1.00)	1237	(1.00)
C2	5.91	(1.00)	4238	(1.00)	1237	(1.00)
D1	5.91	(1.00)	4240	(1.00)	1237	(1.00)
D2	5.92	(1.00)	4240	(1.00)	1241	(1.00)
E1	5.88	(0.99)	4195	(0.99)	1237	(1.00)
E2	5.90	(1.00)	4240	(1.00)	1236	(1.00)
F	5.69	(0.96)	4228	(1.00)	1281	(1.03)
G1	5.94	(1.01)	4243	(1.00)	1239	(1.00)
G2	5.86	(0.99)	4364	(1.03)	1236	(1.00)
平均値	$\bar{\varepsilon}/\varepsilon_y = 5.91$		$\bar{M} = 4247 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$		$\bar{H} = 1239 \text{ (kN)}$	
変動係数	1.3%		0.9%		1.1%	
$P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$	1.00		1.00		1.00	

※) 括弧内の数値は平均値に対する比をあらわす。
平均値, 変動係数, $P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$ は微小変位解析のソフトウェアBを除いて求めた。
 $P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$: 応答値Xが許容範囲(平均±5%)内に入る確率(ただし, 正規分布を仮定)

重 $P=2,439$ (kN)を作用させた状態で、下記のa)およびb)の2種類の水平変位を与えた。基本的には幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮し、各インクリメントで収束計算を実施した（ただし、解析

ソフトウェアBにおいてはソフトウェアの制約上、微小変位解析となる）。収束基準は各解析ソフトウェアのデフォルト値を用いた。

a) Pushover解析

表-6.3 繰り返し載荷解析の結果（提案分割）

解析機関	柱基部の平均ひずみ		柱基部の曲げモーメント		柱基部の水平反力	
	$\varepsilon/\varepsilon_y$	$\varepsilon/\bar{\varepsilon}$	$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M/\bar{M}$	$H(\text{kN})$	$H/\bar{H}$
A1	10.38	(1.02)	4392	(1.00)	1273	(0.99)
A2	10.33	(1.01)	4386	(1.00)	1284	(1.00)
A3	10.37	(1.01)	4389	(1.00)	1272	(0.99)
B1	10.26	(1.00)	4393	(1.00)	1330	(1.04)
B2	10.05	(0.98)	4395	(1.00)	1330	(1.04)
C1	10.34	(1.01)	4380	(1.00)	1276	(1.00)
C2	10.34	(1.01)	4380	(1.00)	1289	(1.01)
D1	10.17	(1.00)	4384	(1.00)	1275	(1.00)
D2	10.26	(1.00)	4387	(1.00)	1276	(1.00)
E1	10.27	(1.01)	4327	(0.99)	1257	(0.98)
E2	10.19	(1.00)	4383	(1.00)	1274	(0.99)
F	9.60	(0.94)	4365	(1.00)	1324	(1.03)
G1	10.11	(0.99)	4390	(1.00)	1279	(1.00)
G2	10.22	(1.00)	4428	(1.01)	1291	(1.01)
平均値	$\bar{\varepsilon}/\varepsilon_y = 10.21$		$\bar{M} = 4383 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$		$\bar{H} = 1281 \text{ (kN)}$	
提案分割の平均/細分割の平均	1.00		1.00		1.00	
変動係数	2.0%		0.5%		1.2%	
$P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$	0.99		1.00		1.00	

※) 括弧内の数値は平均値に対する比をあらわす。

平均値、変動係数、 $P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$ は微小変位解析のソフトウェアBを除いて求めた。

$P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$: 応答値 X が許容範囲(平均 $\pm 5\%$)内に入る確率(ただし、正規分布を仮定)

表-6.4 繰り返し載荷解析の結果（細分割）

解析機関	柱基部の平均ひずみ		柱基部の曲げモーメント		柱基部の水平反力	
	$\varepsilon/\varepsilon_y$	$\varepsilon/\bar{\varepsilon}$	$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M/\bar{M}$	$H(\text{kN})$	$H/\bar{H}$
A1	10.42	(1.02)	4397	(1.00)	1267	(0.99)
A2	10.36	(1.01)	4391	(1.00)	1271	(1.00)
A3	10.40	(1.02)	4394	(1.00)	1266	(0.99)
B1	10.27	(1.00)	4395	(1.00)	1330	(1.04)
B2	10.04	(0.98)	4390	(1.00)	1329	(1.04)
C1	10.31	(1.01)	4384	(1.00)	1277	(1.00)
C2	10.31	(1.01)	4384	(1.00)	1284	(1.01)
D1	10.17	(0.99)	4385	(1.00)	1275	(1.00)
D2	10.19	(1.00)	4386	(1.00)	1275	(1.00)
E1	10.26	(1.00)	4323	(0.99)	1256	(0.98)
E2	10.16	(0.99)	4366	(1.00)	1277	(1.00)
F	9.71	(0.95)	4372	(1.00)	1326	(1.04)
G1	10.31	(1.01)	4389	(1.00)	1279	(1.00)
G2	10.24	(1.00)	4422	(1.01)	1255	(0.98)
平均値	$\bar{\varepsilon}/\varepsilon_y = 10.24$		$\bar{M} = 4383 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$		$\bar{H} = 1276 \text{ (kN)}$	
変動係数	1.7%		0.5%		1.4%	
$P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$	1.00		1.00		1.00	

※) 括弧内の数値は平均値に対する比をあらわす。

平均値、変動係数、 $P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$ は微小変位解析のソフトウェアBを除いて求めた。

$P\{\mu(1-0.05)<X\leq\mu(1+0.05)\}$: 応答値 X が許容範囲(平均 $\pm 5\%$)内に入る確率(ただし、正規分布を仮定)

- ・変位制御により，図-6.1に示すように水平変位64mmまで単調に載荷した。
- ・目標水平変位 $\delta_m=64\text{mm}$ までの増分数（インクリメント数）は100とした。

b) 繰返し載荷解析

- ・変位制御により，図-6.1に示すような正負交番載荷で $+\delta_{y0}(=12\text{mm}) \rightarrow -\delta_{y0} \rightarrow +2\delta_{y0} \rightarrow +6\delta_{y0}(=72\text{mm})$ まで載荷した。
- ・目標水平変位 $\delta_m=+6\delta_{y0}(=72\text{mm})$ まで変位増分1mmで解析を行った。

(2) 評価指標

Pushover解析および繰返し載荷解析において，目標水平変位 δ_m に達した時の以下のa)～c)の3つの指標に着目して評価を行った。

- 図-3.1に示すひずみ評価領域 $[B_E = (B_F + B_W)/2 = 750\text{mm}]$ の圧縮フランジの板厚中心位置での平均ひずみ ϵ
- 基部の曲げモーメント M
- 基部の最大水平反力 H

(3) 解析結果および考察

表-6.1および表-6.2にpushover解析の結果を，表-6.3および表-6.4に繰返し載荷解析の結果を示す。表-6.1～表-6.4の「解析機関」の覧に表記される，「A」～「G」が7種類のソフトウェアの種類を示している。各表には各応答値のばらつきを表すための指標として，5章で述べた許容範囲（平均値 $\pm 5\%$ ）内におさまる確率 $(P\{\mu(1-e) < X \leq \mu(1+e)\})$ と変動係数を表の下段に，各解析結果の精度を表す指標として平均値に対する各解析の応答値の比を括弧内に示す。さらに提案分割の結果をまとめた表-6.1および表-6.3については，細分割の平均値に対する提案分割の平均値の比を示す。なお，平均値や変動係数は，微小変位解析のソフトウェアBを除いて求めた。

a) 提案する要素分割・断面分割による収束性

提案する要素分割・断面分割による解析結果（表-6.1，表-6.3）の下段に示す，細分割の平均値に対する提案分割の平均値の比をみると，いずれの応答値もほぼ1.00となっており，要素分割・断面分割に関して十分収束していることがわかる。

b) 提案する要素分割・断面分割による解析結果のばらつき

表-6.1および表-6.3をもとに提案分割による解析結果のばらつきについて考察する。いずれの解析においても全ての応答値について，設定した許容範囲（平均値 $\pm 5\%$ ）内におさまる確率が1.00となっており，ばらつきは非常に小さいことがわかる。

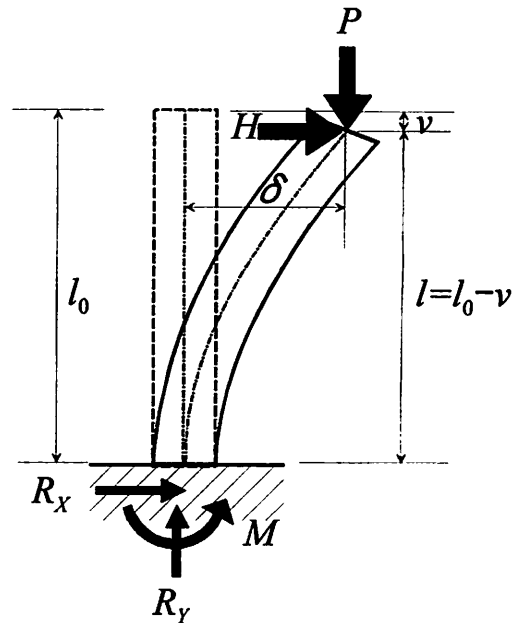


図-6.2 単柱に作用する力

pushover解析よりも柱基部のひずみが大きく生ずる繰返し載荷解析においても設定した許容範囲（平均値 $\pm 5\%$ ）内におさまる確率は最小でも0.99（表-6.3，柱基部の平均ひずみ）であり，ばらつきは十分小さい。また，各応答値の中で曲げモーメントのばらつきが最も小さい（変動係数が最も小さい）ことがわかる。

c) 幾何学的非線形性の影響による応答値の差異

微小変位解析の解析ソフトウェアBと他の有限変位解析のソフトウェアの結果との差異について考察する。表-6.1～表-6.4に示すいずれの解析においても解析ソフトウェアBの柱基部の平均ひずみや曲げモーメントは有限変位解析の平均値と良く一致しているが，水平反力については有限変位解析の平均値に対して4%程度大きく生じていることがわかる。

この傾向について単柱に作用する力のつりあいをもとに考察する。図-6.2を参考に，有限変位解析および微小変位解析による柱基部のモーメントの反力は以下の式(6.1)，式(6.2)で表される。

$$M_l = H_l \times l + P \times d \quad (\text{有限変位解析}) \quad (6.1)$$

$$M_s = H_s \times l_0 \quad (\text{微小変位解析}) \quad (6.2)$$

ここに， M_l ， H_l ：有限変位解析における柱基部のモーメントおよび水平復元力（＝水平反力）， M_s ， H_s ：微小変位解析における柱基部のモーメントおよび水平復元力（＝水平反力）を表す。式(6.1)の右辺第1項については，軸力と曲げにより生ずる鉛直変位 v は十分小さく， $l \approx l_0$ と考えられる

ので式(6.1)における右辺第2項が水平反力の差異を生ずる大きな要因と考えられる。いずれの解析でも基部断面はほぼ塑性化しており、曲げモーメントの変化がほとんど無い領域に到達しているため基部反力 M_l と M_s がほぼ等しくなる。式(6.1)、式(6.2)において、 $M_l = M_s$ とすると、微小変位解析による水平反力 H_s の有限変位解析による水平反力 H_l に対する比 H_s/H_l は以下の式で表される。

$$\frac{H_s}{H_l} = 1 + \frac{P\delta}{H_l l_0} \quad (6.3)$$

解析条件として与えられている各パラメータ ($P = 2439\text{kN}$, $l_0 = 3,330\text{mm}$, pushover解析: $\delta = 64\text{ mm}$, 繰返し載荷解析: $\delta = 72\text{ mm}$) および各解析により得られた水平反力 (pushover解析: $H_l = \bar{H}$ ($= 1239 \sim 1246\text{kN}$), 繰返し載荷解析: $H_l = \bar{H}$ ($= 1276 \sim 1285\text{kN}$)) を式(6.3)に代入すると、 $H_s/H_l \approx 1.04$ となることが確認できる。

以上のように変位制御で解析を行う場合、微小変位解析においては剛性行列に幾何剛性が含まれないため水平反力を高めに評価する傾向がみられるが、本解析ケースについてはその誤差は小さく、幾何学的非線形性の影響は十分無視できる。すでに、単柱式鋼製橋脚のpushover解析において、幾何学的非線形性を無視した場合の終局点近傍における復元力-変位関係に生じる誤差 e と構造パラメータの関係を図-6.3のように示している⁶⁾が、本解析で対象とした橋脚は図中の●印のように、誤差1%の線上に位置しており、十分小さいことが確認できる。図中には実在する単柱式橋脚も○で示しており、実在の橋脚においても幾何学的非線形性を無視することによる誤差は小さいことがわかる。なお、図-6.3を用いると橋脚の解析において幾何学非線形の必要性の有無を一般的に判断できる。

7. まとめ

単柱式橋脚について、14機関で7種類の汎用ソフトウェアを用いて各種の解析を実施した。これらの解析結果より、提案する要素分割・断面分割の妥当性および解析ソフトウェアの差異によるばらつきについて検証を行った。その結果、pushover解析および繰返し解析、いずれにおいても、提案分割による解析結果は細分割の解析結果と良く一致しており、収束解を得る妥当な分割方法であることが明らかとなった。各応答値が許容範囲 (平均値 $\pm 5\%$) 内に

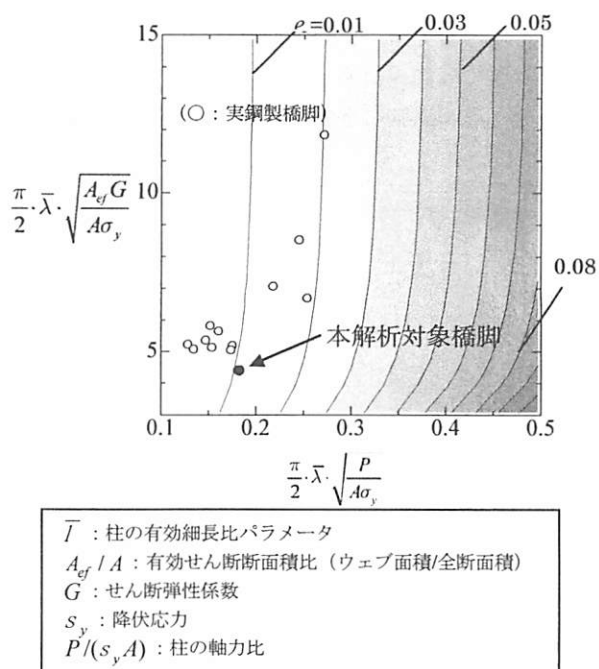


図-6.3 幾何学的非線形性を無視したときの誤差⁶⁾

おさまる確率はほぼ1.00となりばらつきは非常に小さいといえる。

謝辞：本稿で紹介した検討内容は、JSSCの「鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会：耐震設計法研究部会（主査：後藤芳顕）」として行われたものです。参加いただいた委員の方、JSSCの関係各位にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 熊木幸，矢部正明：軸力変動を考慮したラーメン系柱部の簡易照査（概略的な検討段階における照査）に関する検討，第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.9-16, 2003.
- 2) 小野潔，橋本亮，西村宣男，山口栄輝：ファイバーモデルを用いた補剛矩形断面鋼部材の耐震性能照査法に関する一提案，橋梁と基礎，Vol.41，No.6，pp.26-33, 2007.
- 3) 小野潔，橋本亮，西村宣男，山口栄輝：「ファイバーモデルを用いた補剛矩形断面鋼部材の耐震性能照査法に関する一提案」への討議に対する回答，橋梁と基礎，Vol.42，No.3，pp.36-39, 2008.

- 4) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震設計の信頼性と耐震性能の向上，JSSCテクニカルレポートNo.93，2011.
- 5) 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研究報告書(VI)，1997.
- 6) 後藤芳顕，奥村徹，鈴木昌哉：非線形はりモデルを用いた鋼製橋脚の耐震解析における幾何学的非線形性とせん断変形の影響，土木学会論文集，No.696/I-58，pp. 157-172，2002.