

道路橋 RC 橋脚の 3 次元非線形動的解析による 耐震性能評価に関する一考察

富 健一¹，梅原秀哲²

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社（〒451-0046 名古屋市西区牛島町2番5号トミタビル）

（名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム専攻 博士後期課程）

²フェロー会員 名古屋工業大学大学院教授，工学研究科社会工学専攻 Ph.D.（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）

1. はじめに

構造物に伝達される地震動は任意方向から作用するので，構造物の挙動は3次的に複雑な挙動となる．道路橋も含めた橋梁構造物の橋脚は，任意方向から作用する地震力に対して，橋軸方向と橋軸直角方向の同時に地震力が作用する2軸断面力作用下の部材となる．しかし，現在の道路橋示方書¹⁾（以下，道示と記す）で示されている耐震設計での動的解析手法は，橋軸方向，橋軸直角方向それぞれに地震力を作用させて解析が行われているのが現状である．

2方向地震動を同時に受けるRC橋脚の耐震性に関しては，繰り返し実験やハイブリッド載荷実験，振動台実験等により実挙動と解析結果の整合性について研究が行われている．

例えば，西田，運上らは，正方形断面および円形断面を有するRC単柱式橋脚に対して，振動台実験を行い，2方向に地震力を与えた場合，橋脚基部全面に損傷が生じることを示している²⁾．早川らは，繰り返し載荷実験により，斜め方向，矩形，円形，楕円形に単純化した履歴を用いて2方向地震力を受けた場合の耐力低下のメカニズムを明らかにすると同時に，ファイバー要素解析により，載荷履歴を精度良く再現できることを示している³⁾．萩本・川島らは，正方形RC単柱式橋脚を対象に水平2方向地震力を同時に載荷するハイブリッド実験を行い，ファイバーモデル解析と実験の再現性について検討している⁴⁾．

また，一般的に道路橋RC橋脚の耐震設計において利用されているM- ϕ モデルは1方向地震動による解析手法を基本としているが，このM- ϕ モデルと2方向地震力を受ける場合に適用性の高いファイバーモデルとの解析精度については，高梨らの研究でほぼ同等の結果が得られることが示されている⁵⁾．

以上より，ファイバーモデルによる3次元非線形動的解析による耐震性能の照査は，実際の地震動が作用する場合は2軸状態になることや，曲線橋や斜橋，偏心橋脚などのように幾何学的形状が非対称な場合の地震時応答は2軸曲げの影響が顕著になる可能性があるため，その影響の定量的な評価を行う上で非常に有効な手法であると考えられる．

ファイバーモデルによる解析では，鉄筋コンクリート断面の各セルに作用するひずみが応答値として算出されるが，そのひずみと構造物の損傷状態との関係を定量的に評価する手法として弾性剛性残存率がある．土屋・前川らは，多方向入力を受けるRC棒部材の損傷指標としてファイバーモデル解析によって得られる各セルのひずみより弾性剛性残存率を算出し，構造物の耐震性能2を満足することができる断面損傷指標の限界値が0.500であることを示されており⁶⁾，土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾（以下，コン示と示す）耐震性能照査編でRC部材の耐震性能照査手法として示されている．ここで，耐震性能2とは，地震による損傷が限定的なものにとどまり，構造物としての機能の回復が速やかに行い得る性能を意味し，現在の道示においても，重要度の高いB種の橋のレベル2地震動に対する耐震性能として設定されている．

そこで，本研究では，道示で設計された多径間連続高架橋のRC橋脚に対して，道示で示されているM- ϕ モデルとファイバーモデルにより非線形動的解析を実施し，1方向地震力，2方向地震力での解析結果の違いや，解析モデルの違いによる照査方法の適用性，2軸曲げの影響等，道路橋RC橋脚の耐震性能評価手法について考察する．

2. 対象高架橋および解析手法

本研究で解析対象とした高架橋の橋梁一般図を図-1に、概要を表-1に示す。解析対象は、5 径間連続鋼箱桁橋で、逆T式橋台（杭基礎）、張出式鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎）より構成される。解析対象とした高架橋の形状や橋脚の配筋量、ゴム支承特性は、道示に基づいて設計計算を行い決定した。

a) ファイバーモデル

塑性化すると思われるすべての橋脚柱の塑性ヒンジ部は図-2に示すようにファイバーモデルでモデル化し、桁部、橋台堅壁部、橋脚梁部、柱の一般部、フーチングは弾性梁要素としてモデル化した。塑性ヒンジ長は道示の考え方により算出した。杭基礎は地盤特性を考慮した連成バネでモデル化し、地盤変形の影響も考慮した。

ファイバー要素には、コンクリートおよび鉄筋の材料非線形履歴モデルを考慮する。コンクリートおよび鉄筋の材料構成則は、図-3に示すような東京大学コンクリート研究室で開発された鉄筋コンクリートの構成則⁹⁾である COM3 モデルを用いる。減衰モデルは、Rayleigh 型粘性減衰マトリックスにより評価する。支承特性とし

b) M-φモデル

その他の部材のモデル化や減衰モデル、支承モデルはファイバーモデルと同様とした。

3. 入力地震動加速度

		テストブリッジ橋
橋種		5径間連続鋼桁橋
橋長		45+55+65+55+45=265m
地盤種別		Ⅲ種地盤
支承形式		水平反力分散ゴム支承
下部工	橋脚形式	矩形橋脚
	基礎形式	場所打ち杭φ1500
	使用材料	コンクリート $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 鉄筋 SD345 (柱主鉄筋D35)

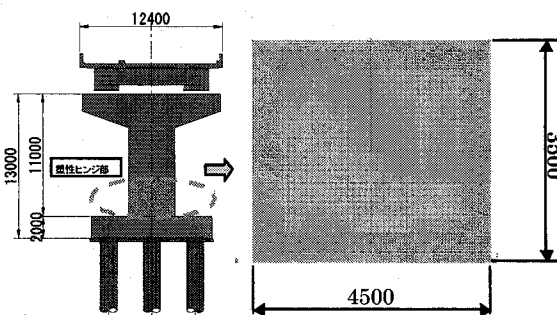
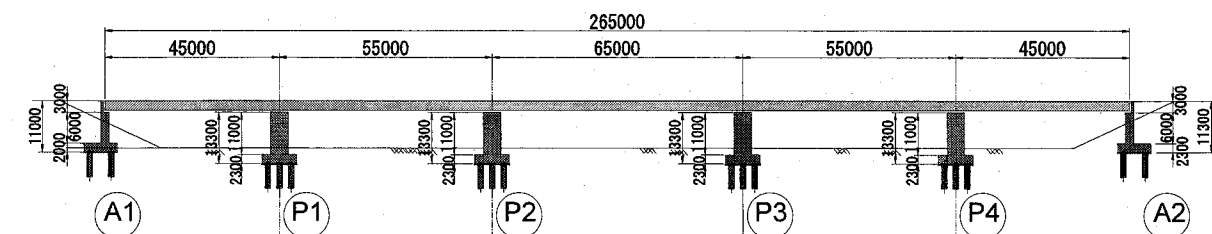
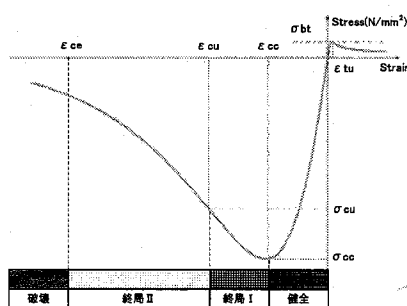


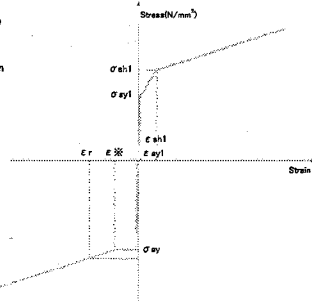
図-2 橋脚断面図 (ファイバーモデル)



图一-1 解析对象桥梁一般



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

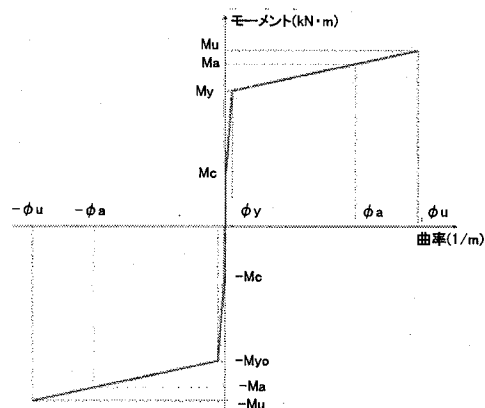


図-4 M-の要素に用いる履歴モデル

本研究で用いた地震動加速度の概要を表-2に示す。また、便宜的に各地震動加速度を表中に示す通り1地震動~24地震動と称することとする。卓越周期は、それほど顕著に表れていないものについても表記した。

1地震動~4地震動は、これまでの国内の主要な強震記録と各地の断層パラメータを用い推定した^{11),12)}工学的基盤面の地震動加速度に対して、解析対象地点の地盤条件を考慮した地震応答解析¹³⁾を行うことにより求めた地表面相当の入力地震動加速度である。地盤条件としては、名古屋市内の比較的軟弱な地盤で、道示の地盤種別におけるⅢ種地盤に相当する地盤条件とした。5~12地震動については、近年発生した大規模地震道に関するK-NET¹⁴⁾の地表面加速度データを使用した。13~24については、道示のⅢ種地盤に関する模擬地震動を使用した。1~12地震動は基盤面での断層方向とその直角方向の成分から地表面の加速度を算出したため、水平2方向を同時入力して解析を行った。道示の模擬地震動による解析は、橋軸、直角の2方向に対してそれぞれ実施した。

4. 解析結果および考察

(1) 断面損傷指標について

a) ファイバーモデル

ファイバーモデルにおける断面損傷指標としては、式(1)で示されている弾性剛性残存率にて照査を行う。

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\epsilon'_{\max}}{\epsilon_{\text{peak}}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\epsilon'_{\max}}{\epsilon_{\text{peak}}} \right) \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、K；弾性剛性残存率、 $\epsilon'_{\max}$ ；過去受けた圧縮ひずみの最大値、 ϵ_{peak} ；圧縮強度に対応したひずみ。

耐震性能評価手法として弾性剛性残存率を用いる場合は、部材断面内において、各要素におけるコンクリートの弾性剛性残存率を平均化した平均弾性剛性残存率が0.500の時に部材の終局変位に相当すると定義する。よって、RC部材の平均弾性剛性残存率が0.5以上であれば、RC部材の耐震性能が保たれていることを意味する。

RC橋脚をファイバーモデルでモデル化する際には、図-5で示すとおり、鉄筋の影響を受ける外側はセル要素をある程度細かくし、コアコンクリート部は比較的粗く分割している。弾性剛性残存率の平均値を算出する際には、外側鉄筋位置の重心位置におけるセル要素の平均値を用いた。

b) M-φモデル

M-φモデルにおける断面損傷指標としては、応答塑性率にて照査を行う。

応答塑性率とは、応答曲率と降伏曲率の比として定義され、許容塑性率（終局曲率と降伏曲率との比）と比較して照査を行う。道示においては、終局曲率に対して地震動の種類や橋の重要度、支承条件により安全率を考慮した許容曲率（ ϕ_a ）が設定されるが、本研究ではファイバーモデルの損傷指標である平均弾性剛性残存率と比較するために、安全率は考慮しないこととした。

(2) 断面損傷指標の違いに関する考察

道路橋RC橋脚に対して耐震性能照査を行う際の、ファイバーモデルとM-φモデルの断面損傷指標の違いを考察するために、13~24地震動である道示の模擬地震動に対して1方向ずつ解析を行った結果をP2橋脚基部に着目して表-3~4に示す。

解析結果に基づく断面損傷指標結果を考察すると、M-φモデルではすべての地震動に対して許容値内となるが、ファイバーモデルで照査すると耐震性能を満足しない地震波がある結果となった。

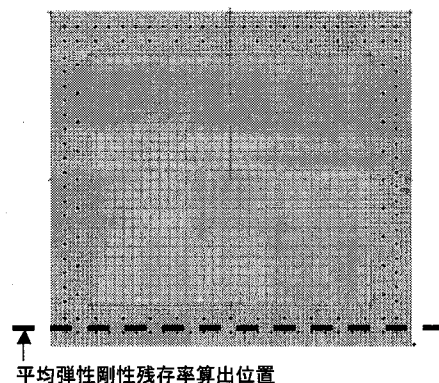


図-5 RC橋脚のファイバーモデル

表-2 地震動加速度の概要

地震名	発生日	地点番号	震央までの距離	最大加速度 (gal)			卓越周期 (sec)	
				橋軸	直角	合成	橋軸	直角
1. 想定東海地震				368	368	521	0.39	0.39
2. 想定東南海地震				503	503	712	0.44	0.44
3. 東海・東南海複合地震				511	511	722	0.39	0.39
4. 兵庫県南部地震	1995/1/17			511	406	652	0.88	0.69
5. 鳥取県西部地震	2000/10/6	DKY004	38km	817	528	973	0.22	0.17
6. 三陸沖地震	2003/5/26	MYG011	59km	1112	1103	1566	0.14	0.29
7. 十勝沖地震	2003/9/26	HKD086	120km	739	785	1078	1.41	1.32
8. 新潟県中越地震	2004/10/23	NIG021	21km	850	1716	1915	0.23	0.22
9. 福岡県西方沖地震	2005/3/20	NGS001	72km	356	232	425	0.35	0.23
10. 宮城県沖地震	2005/8/16	MYG004	127km	382	514	640	0.14	0.16
11. 能登半島地震	2007/3/25	ISK006	7km	849	717	1111	0.17	0.17
12. 新潟県中越沖地震	2007/7/16	NIG018	21km	514	667	842	2.17	2.33
13. タイプI-Ⅲ-1(橋軸)				433	-	433	1.76	-
14. タイプI-Ⅲ-2(橋軸)				424	-	424	1.62	-
15. タイプI-Ⅲ-3(橋軸)				439	-	439	2.14	-
16. タイプII-Ⅲ-1(橋軸)				591	-	591	2.00	-
17. タイプII-Ⅲ-2(橋軸)				557	-	557	1.67	-
18. タイプII-Ⅲ-3(橋軸)				619	-	619	1.67	-
19. タイプI-Ⅲ-1(直角)				-	433	433	-	1.76
20. タイプI-Ⅲ-2(直角)				-	424	424	-	1.62
21. タイプI-Ⅲ-3(直角)				-	439	439	-	2.14
22. タイプII-Ⅲ-1(直角)				-	591	591	-	2.00
23. タイプII-Ⅲ-2(直角)				-	557	557	-	1.67
24. タイプII-Ⅲ-3(直角)				-	619	619	-	1.67

※観測地点は、K-NET観測地点番号

そこで、解析結果が異なる道示Ⅱ-Ⅲ-1地震動作用時における両モデルのP2橋脚柱基部のM-φ履歴図を図-6に示す。この結果より、応答曲げモーメントは両方向ともにファイバーモデルの方が若干大きくなっており、応答曲率については、両方向ともM-φモデルの方が若干大きくなっている。

ファイバーモデルとM-φモデルによる解析結果を考察すると、M-φモデルの変形性能が大きく、ファイバーモデルによる解析よりも安全な結果が得られている。その原因の一つとしてコンクリートの横拘束効果に関する評価方法の相違が考えられる。M-φモデルの骨格曲線は、道示に示されている横拘束効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ曲線より設定しているため、変形性能が非常に大きく、ファイバーモデルに比べて応答局率が大きくなっている。また、横拘束効果で終局時のひずみも大きくなるのでエネルギー吸収性能も増加し、応答値が小さくなると考えられる。

ファイバーモデルによるコンクリートの応力-ひずみ曲線に対する横拘束効果は、コンシにおいて軸方向力が小さい一般の柱に対しては安全側の評価になることを勘案して無視することと示されており、本研究における解析においても横拘束効果は無視していた。

一般的に、軸方向力が大きい部材については、横拘束効果は無視すると部材の性能を過小に評価することとなるので、横拘束効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ曲線を用いることが望ましい。本研究対象のようなスパン長が50m以上なる連続高架橋のRC橋脚は、一般的に大断面であり軸方向力も大きくなることから、横拘束効果による影響を考慮した方が望ましい。本解析結果の相違を見ても、横拘束効果を無視することで部材を過小評価していると考えられる。そこで、横拘束筋で囲まれたコンクリートの応力-ひずみ曲線は、図-7に示すような横拘束高架を考慮したモデルで解析を実施した。なお、かぶりコンクリートはこれまでのCOM3モデルとしている。

解析結果について、横拘束効果に着目した弾性剛性残存率比較表を表-5に、各モデルの断面力比較表を表-6に示す。

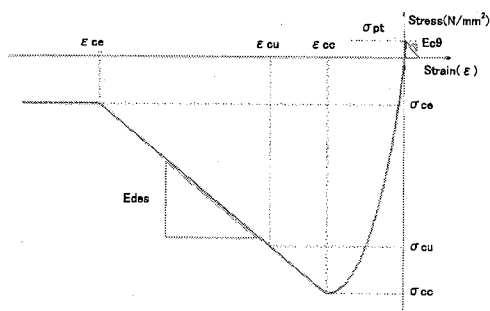


図-7 横拘束効果を考慮したコンクリートの材料構成則

解析結果より、ファイバーモデルにおける弾性剛性残存率について、タイプⅡ地震動においても耐震性能の照

表-3 ファイバーモデルによる平均弾性剛性残存率 (P2橋脚柱基部)

		平均最大ひずみ	平均弾性剛性残存率	許容値	判定
橋軸方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	701	93%	50%	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	951	88%	50%	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	982	87%	50%	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	2299	57%	50%	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	1503	75%	50%	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	2126	61%	50%	OK
直角方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	871	89%	50%	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	1263	81%	50%	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	1376	78%	50%	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	5812	17%	50%	NG
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	2632	51%	50%	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	3907	31%	50%	NG

表-4 M-φモデルによる応答塑性率 (P2橋脚柱基部)

		応答曲率 (1/m)	応答塑性率	許容塑性率	判定
橋軸方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	4.05E-03	5.508	25.858	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	4.83E-03	6.560	25.858	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	5.98E-03	8.127	25.858	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	1.63E-02	22.109	25.858	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	1.24E-02	16.778	25.858	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	1.57E-02	21.274	25.858	OK
直角方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	4.70E-03	7.363	24.851	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	8.04E-03	12.593	24.851	OK
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	6.86E-03	10.742	24.851	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	1.47E-02	22.870	24.851	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	1.19E-02	18.586	24.851	OK
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	1.41E-02	22.083	24.851	OK

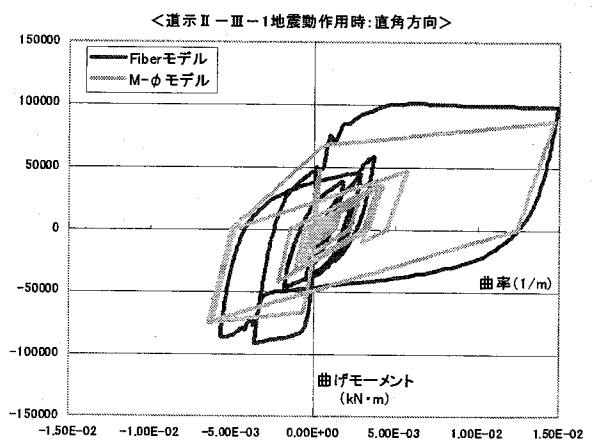
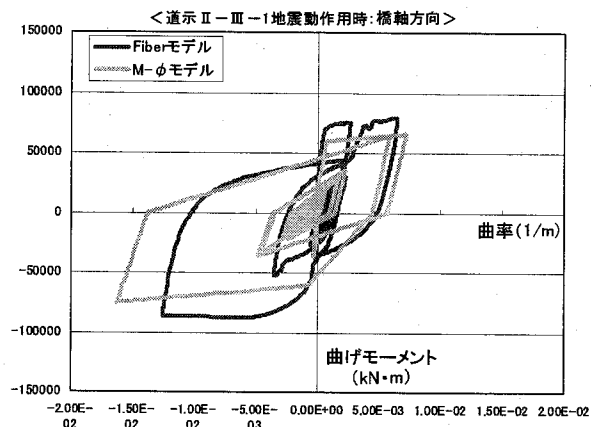


図-6 M-φ履歴図(道示Ⅱ-Ⅲ-1作用時、P2橋脚柱基部)

査を満足する結果となり、M-φモデルと同様の結果となった。断面力についても横拘束効果を考慮した場合のほうがM-φモデルに近づき、解析モデルとして概ね妥当であると考えられる。

以上より、道路橋RC橋脚に対してファイバーモデルによる耐震性能照査を行う際には、横拘束効果を適切に考慮した上で解析を実施することで、これまでの照査手法であるM-φモデルと概ね整合性を確保できる傾向であることが確認できた。

(3) 2方向地震力作用時の耐震性能評価

1～12地震動を3次元ファイバーモデルで2方向同時に作用させた場合とM-φモデルで1方向ずつ解析した結果を表-7に示す。解析結果より、1方向ずつ解析した結果よりも2方向で同時に作用させた場合応答値が大きいこと、ファイバーモデルにおいては横拘束効果を考慮した応答値が小さくなることが確認できた。

ここでは、応答値が大きい4, 7, 12地震動の耐震性能照査結果を考察する。3モデルにおける耐震性能照査結果一覧表を表-8に示すが、十勝沖地震作用時には、M-φモデルによる解析時では安全性が確保されているが、ファイバーモデルでは横拘束効果を考慮した解析でも許容値を満足しない危険側の結果となった。

そこで、十勝沖地震作用時のファイバーモデル2（横

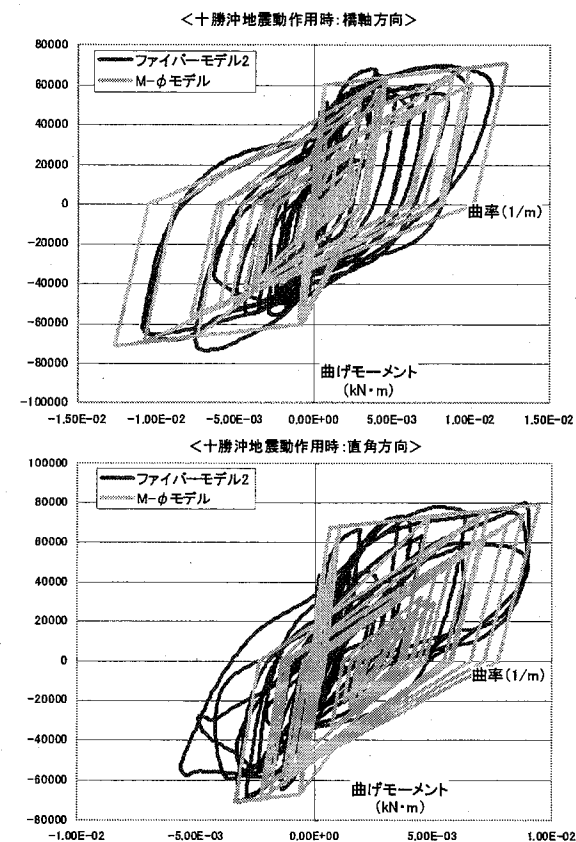


図-8 M-φ履歴図（十勝沖地震作用時、P2橋脚柱基部）

拘束効果考慮）とM-φモデルにおける橋脚基部の曲げモーメントと曲率の関係に関する履歴図を図-8に示す。この履歴図を見ると、橋軸方向、直角方向ともに解析モデルにより履歴に差異はなく、最大応答値もほぼ同じとなっている。これらの結果では地震作用時の挙動は

表-5 弾性剛性残存率比較表
(P2橋脚柱基部)

		ファイバーモデル1 (横拘束効果無視)	ファイバーモデル2 (横拘束効果考慮)
橋軸方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	93%	97%
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	88%	97%
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	87%	94%
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	57%	79%
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	75%	88%
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	61%	82%
直角方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	89%	96%
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	81%	90%
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	78%	91%
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	17%	57%
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	51%	76%
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	31%	65%

表-6 各モデルの作用断面力比較表（1）
(P2橋脚柱基部)

		作用曲げモーメント(kN・m)			作用曲率(1/m)		
		ファイバーモデル1	ファイバーモデル2	M-φモデル	ファイバーモデル1	ファイバーモデル2	M-φモデル
橋軸方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	72395	69345	63331	2.18E-03	3.66E-03	4.05E-03
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	77313	71363	84047	3.39E-03	3.85E-03	4.83E-03
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	75250	73211	85115	2.59E-03	4.32E-03	5.98E-03
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	86022	83195	74645	1.26E-02	1.37E-02	1.63E-02
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	85211	81618	71011	9.05E-03	9.86E-03	1.24E-02
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	85265	82659	74078	1.12E-02	1.24E-02	1.57E-02
直角方向	道示Ⅰ-Ⅲ-1	83465	79874	72770	2.53E-03	3.36E-03	4.70E-03
	道示Ⅰ-Ⅲ-2	92777	89347	77299	4.83E-03	6.30E-03	8.04E-03
	道示Ⅰ-Ⅲ-3	92479	88102	75696	3.92E-03	5.20E-03	6.86E-03
	道示Ⅱ-Ⅲ-1	88070	97079	88283	1.49E-02	1.50E-02	1.47E-02
	道示Ⅱ-Ⅲ-2	97366	93692	82487	1.05E-02	1.08E-02	1.19E-02
	道示Ⅱ-Ⅲ-3	97680	95397	85497	1.31E-02	1.33E-02	1.41E-02

表-7 各モデルの作用断面力比較表（2）
(P2橋脚柱基部)

		作用曲げモーメント(kN・m)			作用曲率(1/m)		
		ファイバーモデル1	ファイバーモデル2	M-φモデル	ファイバーモデル1	ファイバーモデル2	M-φモデル
橋軸方向	1.想定東海地震	38331	-37402	-36698	1.88E-04	3.27E-04	3.10E-04
	2.想定東南海地震	-57858	-54920	-56626	9.71E-04	1.51E-03	6.68E-04
	3.東海・東南海複合地震	-58364	-55393	-57335	1.01E-03	1.54E-03	6.81E-04
	4.兵庫県南部地震	-88368	-83882	-82044	2.48E-03	3.49E-03	2.87E-03
	5.鳥取県西部地震	35127	34728	30934	1.12E-04	1.10E-04	2.06E-04
	6.三陸沖地震	32986	31425	29521	1.83E-04	2.41E-04	1.81E-04
	7.十勝沖地震	-77180	-73456	-71285	1.13E-02	1.14E-02	1.27E-02
	8.新潟県中越地震	40658	39393	37726	1.84E-04	2.24E-04	3.28E-04
	9.福岡県西方沖地震	-15350	-15238	-14217	4.47E-05	4.03E-05	3.98E-05
	10.宮城県沖地震	19823	19794	19197	5.78E-05	5.36E-05	5.37E-05
	11.能登半島地震	45734	44256	41549	2.23E-04	2.90E-04	3.97E-04
	12.新潟県中越沖地震	-51405	-49004	-57498	2.23E-03	2.41E-03	3.39E-03
直角方向	1.想定東海地震	54376	53671	51289	2.38E-04	4.00E-04	4.10E-04
	2.想定東南海地震	75320	65105	67397	1.14E-03	1.56E-03	7.41E-04
	3.東海・東南海複合地震	75641	65097	67454	1.18E-03	1.58E-03	7.83E-04
	4.兵庫県南部地震	78860	69618	71084	2.64E-03	3.12E-03	3.45E-03
	5.鳥取県西部地震	16805	16487	15926	4.01E-05	3.80E-05	3.41E-05
	6.三陸沖地震	48644	46306	42088	2.06E-04	2.81E-04	2.80E-04
	7.十勝沖地震	82509	79932	78236	8.70E-03	8.05E-03	9.47E-03
	8.新潟県中越地震	44846	43954	35101	1.48E-04	1.86E-04	1.81E-04
	9.福岡県西方沖地震	-10015	-9903	-9663	2.24E-05	2.04E-05	2.07E-05
	10.宮城県沖地震	-18653	-18543	-17519	4.21E-05	3.69E-05	3.75E-05
	11.能登半島地震	33816	33857	32402	9.24E-05	1.09E-04	1.43E-04
	12.新潟県中越沖地震	87500	82558	75100	4.88E-03	5.46E-03	6.42E-03

表-8 耐震性能照査結果一覧表
(P2橋脚柱基部)

		4.兵庫県南部地震		7.十勝沖地震		12.新潟県中越沖地震		許容値
		橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向	
ファイバーモデル1		75%	77%	8%	7%	82%	58%	50%以上
ファイバーモデル2		92%	92%	36%	36%	93%	88%	50%以上
M-φモデル		3.621	4.680	17.195	12.866	4.608	8.717	25以下

ほぼ同じであると思われる。

しかし、3次元ファイバーモデルで耐震性能が確保できていない結果となったのは、橋脚の地震時の断面性状を2次元モデルよりもより正確に判定しているからと思われる。十勝沖地震作用時の橋脚基部の損傷状況図を図-9に示すが、地震が2方向で作用したことで、端部にひずみが集中し、終局ひずみを大きくこえるひずみが発生し、破壊しているのがわかる。実際に地震動は2方向より作用するので、この断面のようなひずみ分布になることが予想されるので、この断面性状を評価する弾性剛性残存率により評価の方が実損傷を明確に評価していると考えられる。

5. まとめ

道示で設計された多径間連続高架橋のRC橋脚に対して、M-φモデルとファイバーモデルにより非線形動的解析を実施し、1方向地震力、2方向地震力での解析結果の違いや、解析モデルの違いによる照査方法の適用性について検証した。

その結果、本対象高架橋の解析モデルにおいては以下の結論が得られた。

- 1) 道示の1方向地震動に対して解析モデルの検証を行い、本研究対象高架橋のような柱に作用する軸力が大きくなる道路橋RC橋脚においては、横拘束効果を考慮したファイバーモデルにより解析を行うと、2次元M-φモデルと3次元ファイバーモデルで耐震性能照査はほぼ同じ結果を得ることができた。
- 2) 2方向地震力による解析モデルと耐震性能照査について検証を行った結果、3次元ファイバーモデルによる耐震性能照査結果の方が危険側の結果となる場合があった。これは、弾性剛性残存率が断面の3次元性状を評価して算出されるためであると考えられる。
- 3) 今後の耐震設計において、2方向地震力による2軸曲げの影響を考慮する必要がある場合は、3次元的なRC部材の断面損傷状況を評価する弾性剛性残存率による照査も考慮した耐震設計を行うことが望ましいと考えられる。

謝辞：防災科学技術研究所 K-NET の記録を使わせて頂きました。関係諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ～Ⅴ
- 2) 西田秀明，運上茂樹：水平2方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱の応答挙動に対するファイバーモデル解析の適用性，第8回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関

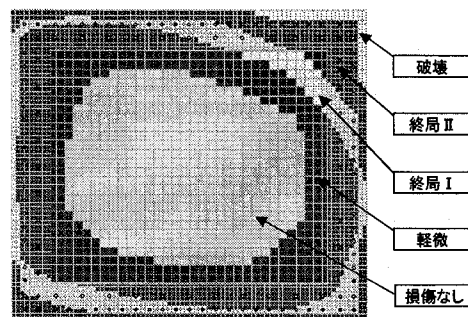


図-9 ファイバーモデル2における橋脚ひずみ分布図
(十勝沖地震作用時，P2橋脚柱基部)

するシンポジウム講演論文集，pp299-304，2005

- 3) 早川涼二，川島一彦，渡邊学歩：2方向地震力を受けるRC橋脚の耐震性に関する研究，土木学会論文集，NO. 759/Ⅰ-67，pp79-89，2004
- 4) 萩本英典，川島一彦，渡邊学歩，永田聖二：ファイバー要素解析に基づく2方向地震力を同時に受けるRC単柱式橋脚の耐震性，第8回地震時保有水平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，pp305-312，2005
- 5) 高梨和光，青戸拡起：3次元動的解析手法を用いた耐震性能照査方法に関する考察，第8回地震時保有水平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，pp83-90，2005
- 6) 土屋智史，前川宏一：多方向入力を受けるRC棒部材断面の耐震性能評価，土木学会論文集，NO. 718/V-57，pp45-57，2002
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]，2002年
- 8) 藤田康平ほか：十勝沖地震で被災した鉄筋コンクリート橋脚の地震時応答解析による被害分析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，NO. 3，2007
- 9) 岡村甫，前川宏一，鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5
- 10) 日本道路協会：道路橋支保便覧，2004.4
- 11) 杉戸真太ほか：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集 No. 493/III-27，pp. 49-58，1994.6
- 12) 古本吉倫ほか：非定常スペクトル重ね合わせによる強震動予測法の再検討，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，I-B，pp. 550-551，1998.10.
- 13) 古本吉倫ほか：兵庫県南部地震により被災したコンクリート橋脚地点における強震動シミュレーション，平成11年度自然災害総合研究班中部地区シンポジウム発表論文集，pp. 35-44，1999.12
- 14) 防災科学技術研究所 K-NET ホームページ：
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>