

論文 Flexibility 法による RC 構造物の地震応答解析

Chea Chhun hong^{*1}・中野 友裕^{*2}・田辺 忠顕^{*3}

要旨: 構造物が非線形領域に入るような激震時の RC 構造物の挙動を推定することを目的として、実存する構造物を対象とした地震応答解析を行った。解析には有限要素解析において一般に用いられる剛性法ではなく、厳密な力の釣合いを基礎とする Flexibility 法を用いることとした。その結果、Flexibility 法による自由度低減により、RC 大構造物の全体系非線形解析の適用可能性が示された。

キーワード: Flexibility 法, 非線形動的解析, ファイバーモデル, Takeda モデル

1. はじめに¹⁾

兵庫県南部地震における橋梁構造物の多大な損傷の原因として、従来設計で想定していた地震力をはるかにこえた地震動を生じていたことが指摘されている。そのような指摘を鑑み、構造物に要求される耐震性能を判定するための非線形動的解析などの活用が求められるようになり、より一層の精度向上と、適用範囲の広い合理的な解析手法の確立が課題となっている。

そのような検討の必要性に関わらず、実際の設計や解析における鉄筋コンクリート（以下 RC）橋脚などの RC 構造物の解析においては、構造全体系に亘っての解析手法が確立されていないのが現状である。その理由のひとつに、非線形領域の RC 構造物の挙動を剛性法に基づく有限要素解析により計算しようとした場合、要素分割を細かくし自由度を大幅に上げなければ、精度のよい安定した解を得ることが、しばしば困難となることが挙げられる。そのため、非線形領域での RC 橋脚の全体形での解析は、不可能ではないにせよ、非常に時間と手間がかかり、構造物の大型化・複雑化が進む現代の潮流に対して限界を示しつつある状況にある。すなわち、RC 橋脚のより合理的な耐震設計手法を確立するた

めには、動的な繰返し荷重下における現象をシミュレートするための、新たな解析手法の構築が不可欠なのである。

本研究は、以上のような背景に基づき、厳密な力の釣合いに基づいた Flexibility 法を用いて、非線形領域にまで拡張した自由度低減の提案を行い、さらに非線形領域における橋梁全体システムの解析可能性を実証し、post-peak 領域における Flexibility 法の有用性を考察・検討するものである。

2. Flexibility 法を用いた動的アルゴリズム

2.1 Flexibility 法の収斂アルゴリズム

本研究で用いる Flexibility 法の収斂手法は、構造物レベル・要素レベル・断面レベルの3段階を必要とする。本稿では、動的収斂手法における構造レベルの収斂方法と、その過程に用いられる要素・断面レベルの収斂方法の概略についてのみ述べる。詳細な手順は文献²⁾に示されているので参照されたい。

2.2 動的収斂アルゴリズム

対象とする構造物の質量マトリクスを $[M]$ 、減衰マトリクスを $[C]$ 、接線剛性マトリクスを

^{*1}名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

^{*2}名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

^{*3}名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

$[K(t)]$ とし、加速度・速度・変位の各ベクトルを $\{a\}$, $\{v\}$, $\{d\}$ と表す。増分変位を Δx と表すと、線形解として次式が得られる³⁾。

$$\{\Delta x\} = [\bar{K}]^{-1} \{\Delta P\} \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} [\bar{K}] &= [K(t)] + \frac{1}{2\beta\Delta t}[C] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M] \\ \{\Delta P\} &= -[M]\{\dot{a}_0\} + [M]\left\{\frac{1}{\beta\Delta t}\{v_p\} + \frac{1}{2\beta}\{a_p\}\right\} \\ &\quad + [C]\left\{\frac{1}{2\beta}\{v_p\} + \left(\frac{1}{4\beta} - 1\right)\{a_p\}\Delta t\right\} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式において、 Δt は時間増分、 a_0 は地表加速度、添字 p は前 step の値であることを表す。この式により $\{\Delta x\}$ が計算されると、 $\{\Delta v\}$ 、 $\{\Delta a\}$ が求まる。

新しく計算された変位・速度・加速度に対して、動的な不平衡力 R が次式により求まる。

$$\{R\} = \{f_n\} - [M]\{\ddot{a}_n^i\} - [C]\{\dot{v}_n^i\} - \{P_R^i\} \quad (3)$$

(3)式の n は新 step の値であることを示し、 i は当該 time-step 内での iteration counter である。 $\{P_R\}$ は力の釣合いに基づいた Flexibility 法のアロリズムにより求まる。要素内の各断面における力 D_R を要素長に亘り積分し、要素内力 Q を求める。この Q から $\{P_R\}$ が求まるわけであるが、この過程では厳密な力の釣合いが維持されている(図-2,3)。

(3)式の $\{R\}$ が収束条件を満たさない場合、(1)式の $\{\Delta P\} = \{R\}$ として再度計算を行う。この繰り返し計算により、各 time-step の応答を求めることができる(図-1)。なお、図-1～図-3 中の A～F の記号は、それぞれの図相互の対応を表している。

3. 解析対象構造物および解析方法

3.1 解析対象

今回の解析で対象とする橋梁構造物を図-4 に示す。この橋梁は高速道路高架橋として現在供用されており(名古屋高速道路 3 号大

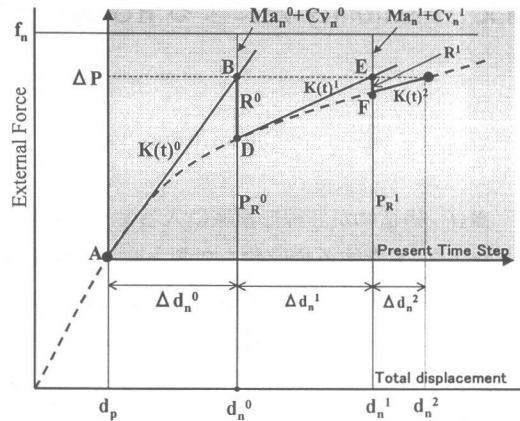


図-1 構造物レベルの動的収束アルゴリズム

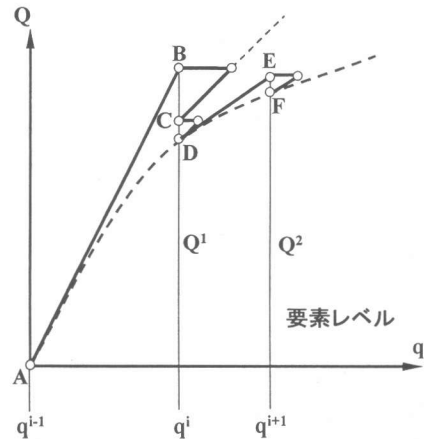


図-2 要素レベルの収束アルゴリズム

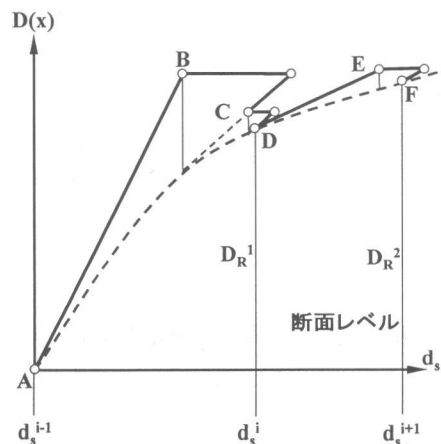


図-3 断面レベルの動的収束アルゴリズム

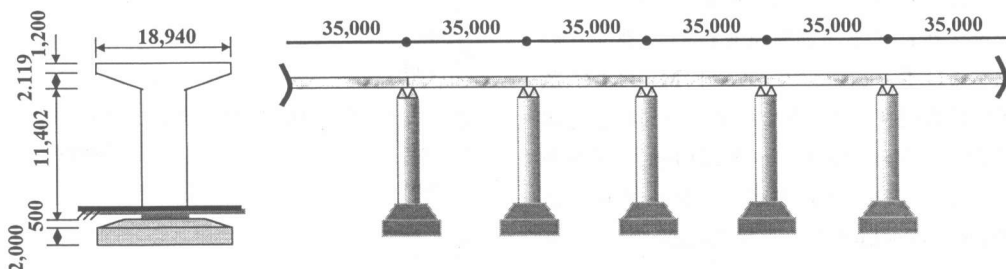


図-4 解析対象橋梁諸元（名古屋高速道路3号大高線）

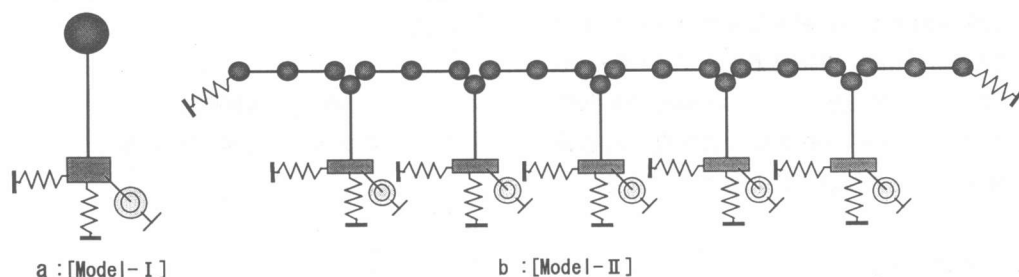


図-5 解析モデル

高線）,橋軸方向には 35.0m ピッチで橋脚が並んだ構造になっている。橋脚断面は 3.0m*3.0m である。なお,実際の橋脚には鋼板巻立がなされているが,その検討は本研究の域を越えているので,その影響は無視する。

3.2 解析モデルおよび材料特性

図-4の橋梁を2つにモデル化する。**[Model-I]** 橋脚1本を道路橋示方書⁴⁾に基づき算出した上部工重量と橋脚躯体重量を加えたものを橋脚天端に,フーチング重量を下端に設置する。杭基礎による地盤反力についても,道路橋示方書により算定した地盤ばねを設置することで考慮している(図-5a)。

[Model-II] 5橋脚6スパンを28節点にモデル化する。上部工は1スパンあたり2要素3節点,橋脚はそれぞれ1要素とする(図-5b)。なお主要定数を表-1に示す。

Flexibility 法による解析では,解析対象構造物の曲率に対するモーメントおよび断面剛性

表-1 解析に用いた主要定数

質量	上部工(全体)	814.0[ton]
	橋脚天端	157.0[ton]
	フーチング	220.0[ton]
履歴定数	(ϕ_{cr}, M_{cr})	$(0.0001[1/m], 20.0[MN*m])$
	(ϕ_y, M_y)	$(0.0006[1/m], 73.0[MN*m])$
地盤ばね	水平	41400 [MN/m]
	鉛直	400000 [MN/m]
	回転	753000 [MN*m]

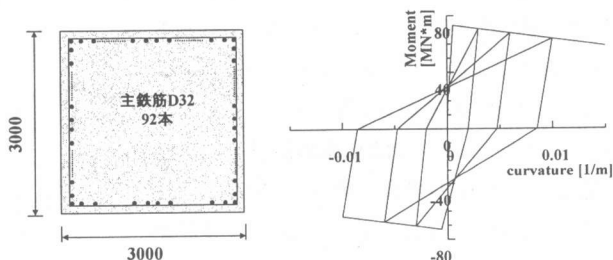


図-6 柱断面および解析に用いるM- ϕ 履歴曲線

EIが必要となる。これらはファイバーモデルから容易に得られるが,地震応答解析のような時間刻みでの収斂を必要とする場合に逐一ファイバーモデルによって計算するのは,実用的にも

適切な方法ではない.そこで本解析では,ファイバーモデルによる事前解析を行い,クラックの発生するひずみ ϕ_{cr} とモーメント M_{cr} および,断面降伏時のひずみ ϕ_y とモーメント M_y とを求め,それらを Takeda モデル⁵⁾に適用して解析を行うこととする.ファイバーモデルの算定には,Darwin-Pecknold の1軸構成則(コンクリート)および Menegotto-Pinto モデル(鉄筋)を用いる.それらにより最終的に得られる履歴曲線を柱断面とともに図-6 に示す.Takeda モデルでは,軟化勾配は規定されていないが,post-peak 領域での Flexibility 法の有効性を判断するために,ファイバーモデルにより得られる軟化剛性を降伏後の履歴に用いることとする.

3.3 入力地震動

入力地震波は図-7 に示す2種類を用いることとする.これらは1995年の兵庫県南部地震において(a)神戸大学で観測された地震波,(b)神戸海洋気象台で観測された地震波である.最大加速度はそれぞれ270gal,818galである.

4 地震応答解析

4.1 pre-peak 領域の応答

神戸大学の地震波形を入力した解析結果を図-8,図-9,図-10 に示す.

まず,加速度応答であるが,図-8,図-9 により1本柱で解析したものよりも6スパンの解析結果のほうが短周期となっており,拘束による固有周期への影響がスペクトルより明らかにうかがえる.また,加速度応答が Model-II で大きくなっているが,このモデルでは全体の剛性と Mass との関係が1本柱の場合と比べて,加速度を大きくする関係にあることが分かる.次に変位応答の方は,最終的な残留変形はほぼ等しいが,震動中の振幅は拘束のある Model-II で約25%の減少が見られる.

図-11 に Model-II 中央橋脚の基部および中央部分の断面における履歴を示す.pre-peak であるが,履歴ループを描いている.

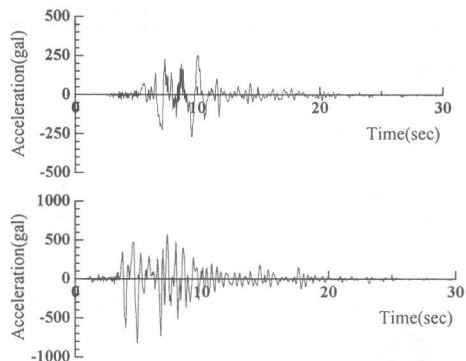


図-7 入力地震動

(上:神戸大学 / 下:神戸海洋気象台)

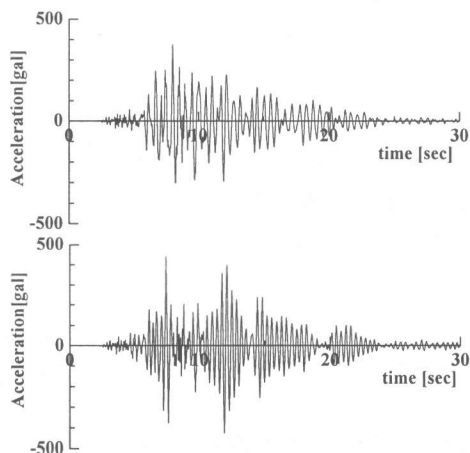


図-8 神戸大学波の加速度応答

(上: Model-I / 下: Model-II)

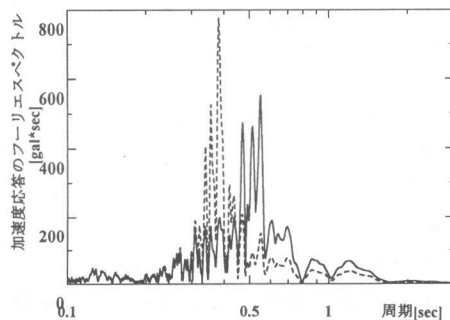


図-9 加速度応答のフーリエスペクトル

(実線: Model-I / 破線: Model-II)

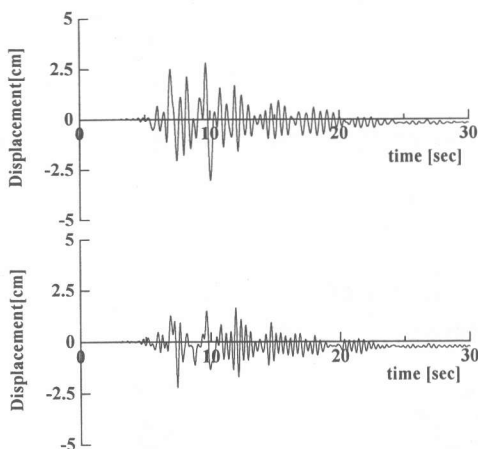


図-10 神戸大学波の変位応答
(上: Model-I / 下: Model-II)

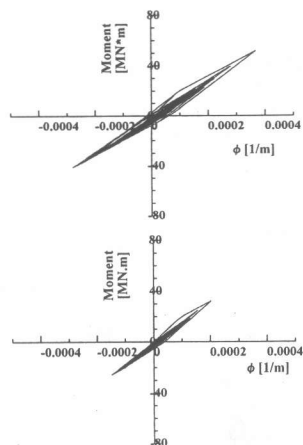


図-11 Model-II 中央橋脚の履歴
(上: 橋脚基部/下: 橋脚中央)

4.2 post-peak 領域の応答

次に、 $M-\phi$ 関係が post-peak の挙動を示す場合を解析する。地震動は神戸海洋気象台のものをを用いる。解析結果を図-12、図-13 に示す。

Model-I の解析の最大加速度応答は 741[gal] (4.79[sec]) で、最大変位応答は 33.04[cm] (7.23[sec]) である。一方 Model-II では、最大加速度応答は 1175.3[gal] (8.13[sec]) で、最大変位応答は 21.55[cm] (5.18[sec]) である。

まず、Model-I では、構造物が軟化領域に入り、大きな残留変形を生じたと考えることができるが、具体的に3つの断面についてモーメント-曲率履歴を描いたものが図-14 である。それによると、橋脚基部におけるモーメント-曲率関係は明らかに大きな残留変形を描いているものの、その上の断面ではすべて pre-peak の中で履歴を描いている。すなわち、大きな残留変形を発生させたのは、橋脚基部の局所的な破壊によるもの

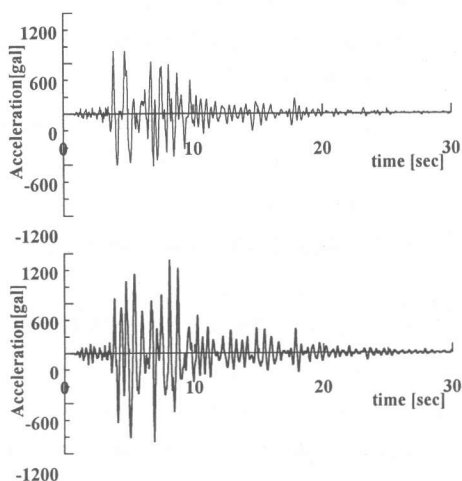


図-12 神戸海洋気象台の加速度応答波形
(上: Model-I / 下: Model-II)

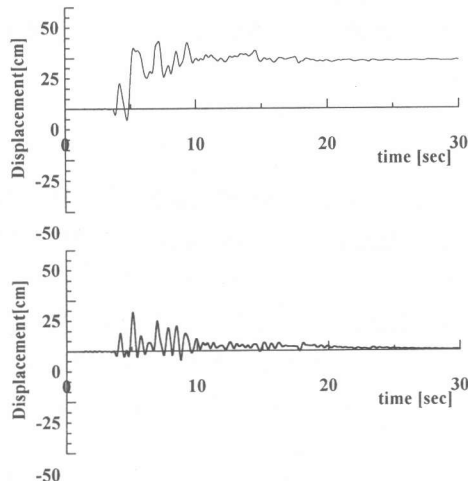


図-13 神戸海洋気象台の変位応答波形
(上: Model-I / 下: Model-II)

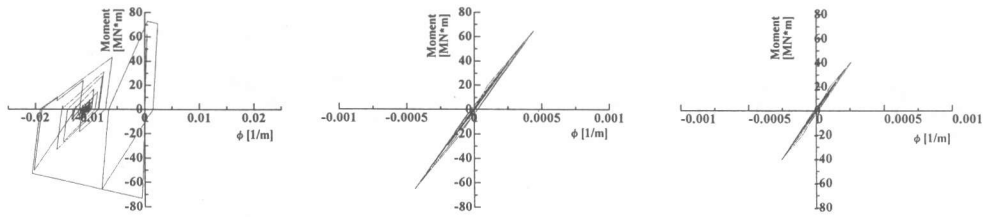


図-14 Model-I の各断面の履歴

(左：橋脚基部/ 中：橋脚基部の2m上/ 右：橋脚中央)

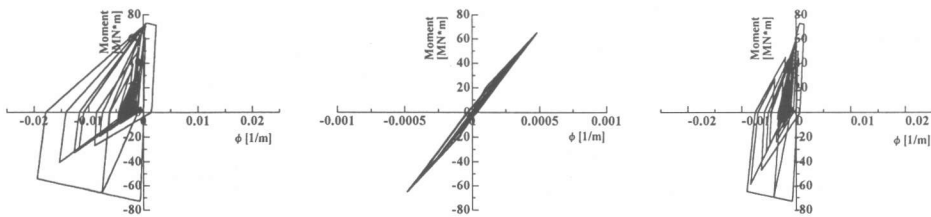


図-15 Model-II の各断面の履歴

(左：中央橋脚基部/ 中：中央橋脚基部の2m上/ 右：右から2本目の橋脚基部)

であり、その他の断面において顕著な損傷が発生していないことが解析的に明らかになった。

一方 Model-II では、最終的な残留変形がほとんど生じていない。これは橋脚天端拘束によると考えられるが、代表的な断面の履歴を見てみると(図-15)、応答中は大きな曲率を発生しているが、最終的な残留曲率はほぼ0である。Model-I における残留曲率と比較すると、この残留曲率の差が、残留変位の違いにつながったと考えられる。

5. 結論

構造物の全体系非線形動的解析の可能性を示すことを目的として Flexibility 法を用いた解析を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) Flexibility 法による解析は、少ない自由度で解析可能であることから、多径間橋梁のような全体システム解析に非常に有効であると考えられる。
- 2) Flexibility 法は、局所化に対しても柱が1要素のままでは解析可能であるため、高い安定性を示し、動的問題のような複雑な力学

問題の解析に有利であると思われる。

- 3) Flexibility 法は、力が格点のみに作用する構造物に対して、柱を1要素とすることができ、それによる自由度縮約の効果(解析時間など)についての検討が必要である。

参考文献

- 1) 中野友裕：“RC 橋脚の地震時挙動の実測と Flexibility 法を用いた非線形動的解析”，名古屋大学修士論文，2000
- 2) E.Spacone et al：Mixed Formulation of Nonlinear Beam Finite Element, Computers & Sciences Vol.58,pp.71-83,1996
- 3) 柴田明徳：最新耐震構造解析,pp.97-108,森北出版,1981
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説,日本道路協会,1996
- 5) Toshikazu Takeda, Mete A.Sozen and N.Norby Nielsen:” Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes”, Journal of the STRUCTURAL DIVISION Proceeding of the ASCE, pp.2557-2572, 1970