

# 論文 円形断面 R C 橋脚の動的耐震照査法に関する研究

中野 友裕\*<sup>1</sup>・田邊 忠顕\*<sup>2</sup>

**要旨**：本論文は、動的荷重を受ける R C 橋脚の応答曲率を用いて終局状態を照査する動的耐震照査法を提案するものである。提案する手法は、現状の設計法における終局変位を求める過程で得られる終局曲率に着目したものであり、水平 2 方向同時入力をも考慮できる方法である。本稿では、本手法と既往の設計法との関係について論じた上で、提案する手法に基づいて円形断面を有する R C 橋脚の水平 2 方向同時入力に対する耐震安全性の評価を行った。

**キーワード**：動的耐震照査法，終局曲率曲面，復元力特性，Flexibility 法

## 1. はじめに

近年、橋梁構造物の耐震設計においては、地震時保有水平耐力法が主流となっている。道路橋示方書<sup>1)</sup>によれば、構造物の塑性域の地震時保有水平耐力や変形性能、エネルギー吸収を考慮することで照査を行うとしているが、地震力の取り扱いについては、橋軸方向・橋軸直交方向を独立に評価するため、各々が規定を満たせば橋脚の耐震性能は満足されていることになる。しかし地震時には、水平 2 方向は同時に作用し、上下動の影響も加わることから、これら 3 方向同時入力を受けた場合の損傷は一層大きくなるであろうことは想像に難くない。これらを鑑みるに、3 方向地震力を受ける場合の耐震照査法を構築することは、非常に重要である。

最近の研究により、水平 2 方向と上下動同時入力時の挙動や橋梁全体系の地震時挙動などが明らかにされつつあるが<sup>2)</sup>、これらの成果を設計において反映させるには、3 方向地震力を考慮した耐震照査が不可欠である。森下らは、鋼製橋脚に対し、応答ひずみを用いて終局状態を照査する動的耐震照査法を提案している<sup>3)</sup>。それによれば、断面の平均軸ひずみ履歴が限界ひずみに達した時点で崩壊したとみなされる。鋼製橋脚の場合は座屈が問題となるため、平均軸

ひずみで対応することになるわけだが、R C 橋脚にこの考え方を適用する場合には、断面の 2 方向曲率と終局曲率を考慮することが必要となる。本稿では、円形断面 R C 橋脚に対して動的耐震照査法を適用する方法を提案し、従来の耐震設計法との関係を明らかにした上で、地震応答解析に基づく照査例を示した。なお、参考として軸力変動の影響が照査に与える影響についても検討を行っている。

## 2. 動的耐震照査法の概要

### 2.1 R C 橋脚に対する動的耐震照査法

動的耐震照査法とは、地震時などの繰返し履歴を受ける構造物に対し、時刻歴上で動的に耐震性能照査を行う方法である<sup>3)</sup>。R C 橋脚において構造部材内で曲率が最も大きくなっている領域について曲率時刻歴に着目すると、終局曲率に達した時点で終局状態に達したとみなすことを照査基準としている。図-1 に本照査法の概念図を示す。図中の×印において、部材断面が終局状態に達したと判定される。なお、道路橋示方書では、終局曲率  $\phi_u$  は一意に定まっているが、上下動の影響を考慮した場合には  $\phi_u$  は軸力に応じて異なってくることから、時刻歴で変化することになる。

\*1 大分工業高等専門学校助手 都市システム工学科 博(工) (正会員)

\*2 名古屋大学名誉教授 J C I 中部支部技術支援機構専務理事 工博 (正会員)

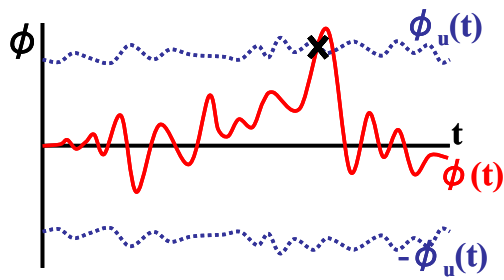


図-1 動的耐震照査法の考え方

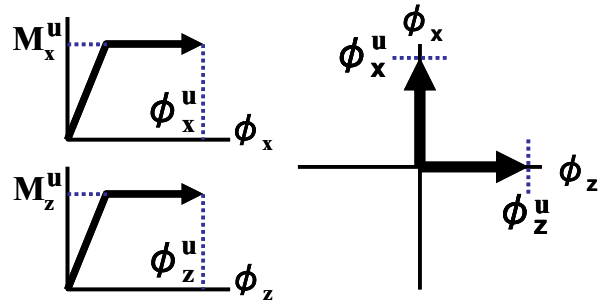


図-2 道路橋示方書による終局曲率の規定

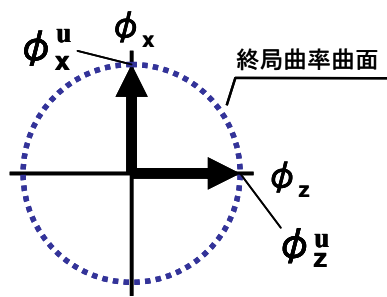


図-3 終局曲率曲面

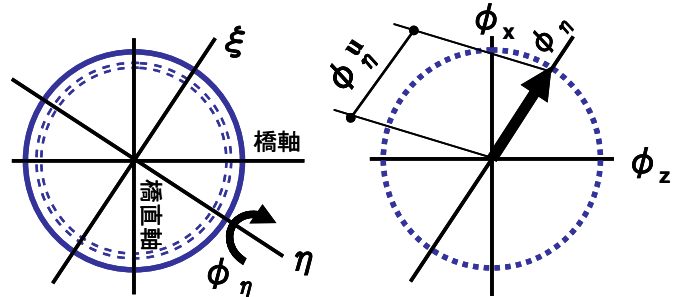


図-4 任意軸まわりの終局曲率

## 2.2 橋軸・橋軸直交軸まわり同時載荷における終局ひずみ

道路橋示方書に規定されている終局曲率は、考えている単一の軸（一般には橋軸または橋軸直交軸）まわりに断面曲率を増加させていったときに、圧縮側の最外縁鉄筋位置におけるコアコンクリートが終局ひずみ  $\epsilon_{cu}$  に達する時点の曲率とされている。この規定は1方向載荷をもとにしたものであるため、各々の軸まわりについて同時に表すと、図-2のようになる。

次に2方向同時に曲率が生じている場合を考える。この場合、x軸まわり、z軸まわりの曲率比率を一定にした状態で増加させた場合の終局曲率  $\phi_x^u$ 、 $\phi_z^u$  の組み合わせは、円形断面の場合、図-3のようになり、図-2に示した2つの M-φ 関係はこの図の中に内包されることになる。これらの点で規定される面（以下、終局曲率曲面）を用いると、2つの軸まわりの曲率の比が定まることにより、任意の曲率組合せに対する終局曲率の値が決定される。橋軸・橋軸直交軸まわりの2方向同時に曲率が生じている場合、一般には橋軸・橋軸直交軸まわりに分解されて

評価されることになるが、この現象について見方を変えれば、図-4のような単一軸（η軸）まわりの曲率が生じていると考えることができる。すなわち、η軸まわりを基準軸とすれば、道路橋示方書の単一軸まわりの規定をそのまま用いることができることになる。例えば、図-4のような軸を考えてやれば、η軸まわりの M-φ 関係は容易に求まる。この場合、η軸まわりの終局曲率  $\phi_\eta^u$  は、原点から終局曲率曲面と  $\phi_\eta$  軸の交点までの距離で表される。従って、終局曲率曲面上の任意位置の点は、1方向水平力をモデル化したものと同一と考えればよいことになる。

円形断面の場合、軸力が同一であれば終局曲率曲面は円形になる。従って、 $\phi_x$ - $\phi_z$  履歴における各時刻の原点からの距離が終局曲率内に収まっているかを判定することで、時刻歴照査が可能となる。なお、軸力変動の影響を考慮に入れる照査については後述する。

## 3. 照査に用いる動的応答解析の概要

### 3.1 対象としたRC橋脚

動的地震応答時における本照査法の適用性の

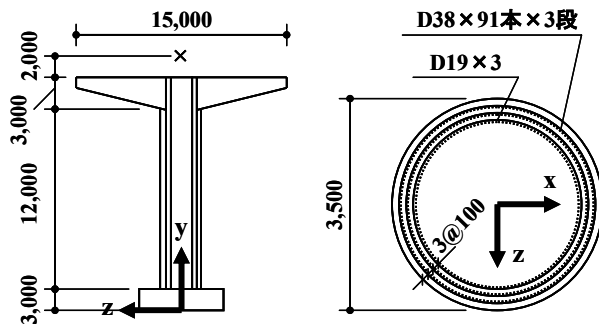


図-5 照査の対象とするRC橋脚

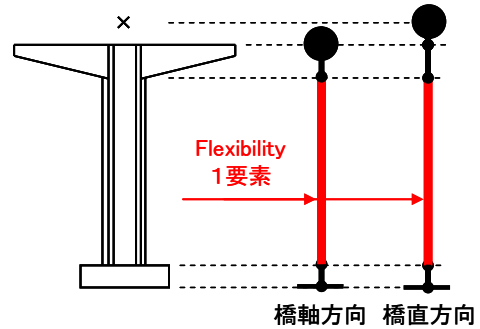


図-6 橋脚と上部工のモデル化

表-1 材料諸元

コンクリート		鉄筋		
圧縮強度[MPa]	44.553		主鉄筋	帯鉄筋
圧縮強度時のひずみ	0.00299		SD390	SD295
終局ひずみ	0.00358	降伏点[MPa]	390	295
軟化域剛性[MPa]	14957	直径[mm]	38	19

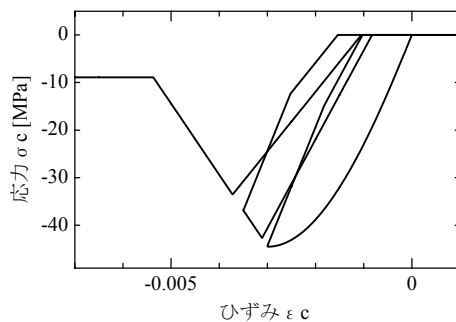


図-7 コンクリートの構成則

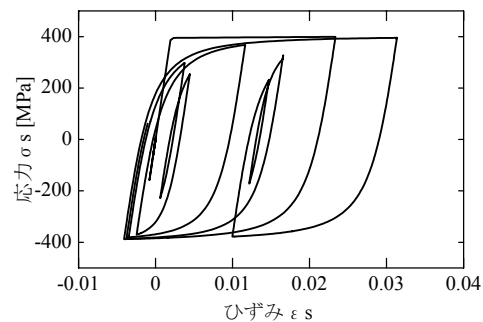


図-8 鉄筋の構成則

検討を、図-5に示すRC橋脚を用いて行った。断面の材料定数は、表-1に示すとおりである。なお、上部工の質量は600[ton]である。

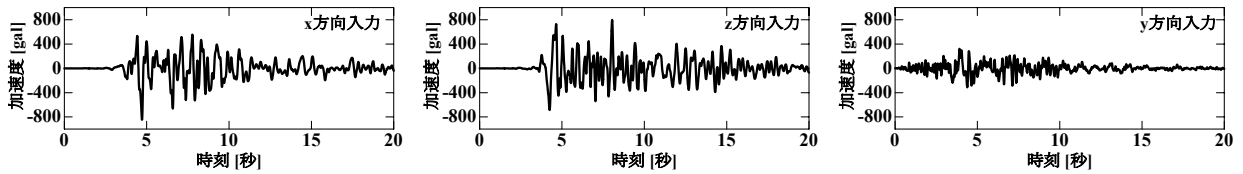
### 3.2 解析条件

時刻歴応答解析に用いる数値解法としてはNewmark  $\beta$ 法 ( $\beta=1/4$ )を採用した。解析に用いるモデルを図-6に示す。橋脚基部は十分に硬い地盤に支持されているとして固定としている。減衰定数としては、上部工0.03、RC橋脚0.05としている。ただし非線形域に入る橋脚躯体部分は道路橋示方書に従い0.02を採用した。これらの構造要素の減衰定数を用いて各次の減衰定数を算出し、Wilson-Penzienの方法<sup>4)</sup>により減衰マトリクスを作成した。

非線形解析に用いる手法としては、要素内の

力の分布をもとにして剛性マトリクスを求めるFlexibility法<sup>5)</sup>を用いることにして、橋脚躯体を1要素にモデル化している。Flexibility法を用いることで各時刻ステップにおけるM- $\phi$ 関係が要素内断面履歴として得られる。その際に用いるFiber-Modelにおいては、各材料の包絡線に道路橋示方書の式を用いるが、内部履歴にはコンクリートにDarwin-Pecknoldモデル<sup>6)</sup>、鉄筋にMenegotto-Pintoモデル<sup>7)</sup>を採用した(図-7、図-8)。

地震入力として、兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台の観測波形NS、EW成分を、標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅調整し、図-5におけるx,z方向に入力する。上下動はUD成分を振幅調整せずにy



a) x 方向入力波形

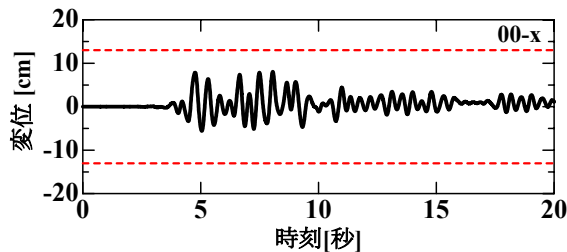
b) z 方向入力波形

c) y 方向入力波形

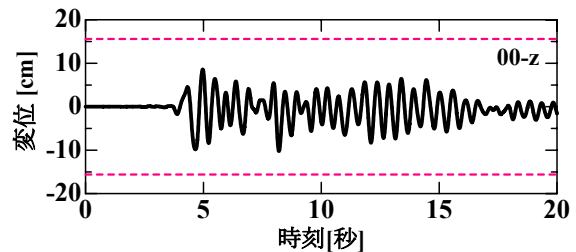
図-9 入力地震波形

表-2 道路橋示方書に基づく照査結果

	橋軸方向	橋軸直交方向
タイプ I	【破壊モード】 曲げ 【地震時保有水平耐力】 $P_a = 11537 \text{ [kN]} > k_{hc}W = 4396 \text{ [kN]}$ OK 【残留変位】 $\delta r = 0 \text{ [mm]} < \delta ra = 150 \text{ [mm]}$ OK	【破壊モード】 曲げ 【地震時保有水平耐力】 $P_a = 10180 \text{ [kN]} > k_{hc}W = 4518 \text{ [kN]}$ OK 【残留変位】 $\delta r = 0 \text{ [mm]} < \delta ra = 170 \text{ [mm]}$ OK
タイプ II	【破壊モード】 曲げ 【地震時保有水平耐力】 $P_a = 11624 \text{ [kN]} > k_{hc}W = 9304 \text{ [kN]}$ OK 【残留変位】 $\delta r = 16 \text{ [mm]} < \delta ra = 150 \text{ [mm]}$ OK	【破壊モード】 曲げ 【地震時保有水平耐力】 $P_a = 10257 \text{ [kN]} > k_{hc}W = 9935 \text{ [kN]}$ OK 【残留変位】 $\delta r = 34 \text{ [mm]} < \delta ra = 170 \text{ [mm]}$ OK



a) x 方向変位応答



b) z 方向変位応答

図-10 2方向独立に入力した場合の変位応答

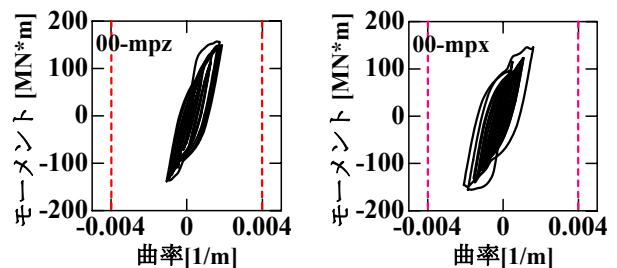
方向から入力する。なお、入力波形を図-9に示す。

#### 4. 動的応答解析結果と照査の例

##### 4.1 2方向独立に入力した場合の照査結果

図-5に示した橋脚について、道路橋示方書に基づいて行った照査の結果を表-2に示す。橋軸方向の終局変位は130mm、橋軸直交方向の終局変位は156mmであり、対応する基部の終局曲率は0.00399[1/m]である。

このような特性を有する橋脚に、3章で示した地震波をx方向、z方向独立に入力した場合の変位応答を、図-10に示す。図中の点線は、

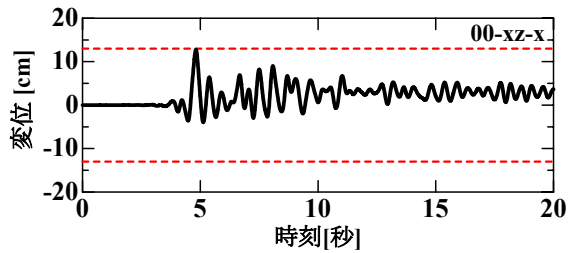


a)  $M_z - \phi_z$  関係

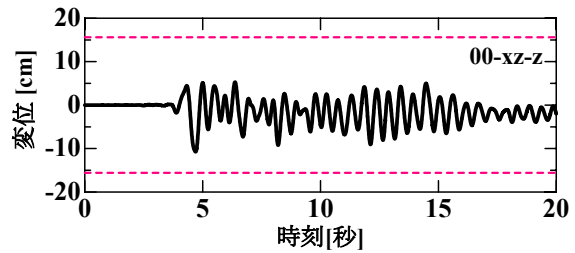
b)  $M_x - \phi_x$  関係

図-11 2方向独立に入力した場合のM- $\phi$ 関係

それぞれの方向の終局変位である。同図より、両方向とも変位応答は終局変位に達しないことが分かる。この現象を橋脚基部のM- $\phi$ 関係で表したものが、図-11である。図中の点線は、設

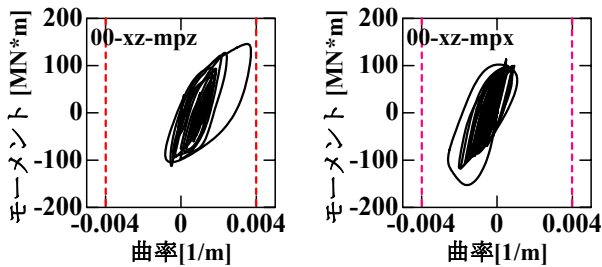


a) x 方向変位応答



b) z 方向変位応答

図-12 2方向同時に入力した場合の変位応答



a) Mz-φz 関係

b) Mx-φx 関係

図-13 2方向同時に入力した場合のM-φ関係

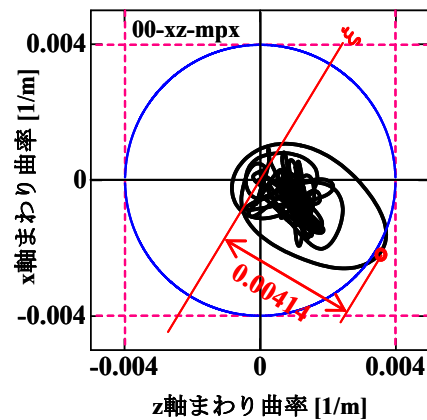


図-14 2方向曲率履歴

計上の終局曲率を表している。変位応答が終局変位に収まっていることに対応して、基部の応答曲率も終局曲率には達していないことが示されている。

#### 4.2 2方向同時に入力した場合の照査結果

次に、同一の構造物に2方向同時入力した場合の変位応答を、図-12に示す。この場合、各方向独立した入力よりも変位応答は大きく生じているものの、両方向とも終局変位内に収まっている。図-13には、同時入力時の基部曲率履歴を示すが、これも同様に橋軸まわり・橋軸直交軸まわりともに終局曲率には達していない。

しかし、2方向同時入力の場合には、それぞれの曲率が連成して橋脚挙動を支配していることから、これら2方向の曲率を同時に考える必要がある。そこで図-3で考えた、 $\phi_x$ - $\phi_z$ を軸にとって描くと、図-14のように2方向曲率履歴が得られる。円形断面であるため、終局曲率曲面は2章で示したように円となるが、この終局曲面を曲率履歴が越えている部分がある。この状態は、同図中の $\xi$ 軸まわりに0.00414[1/m]の曲率が発生していることを示しており、終局

曲率を越えていることになる。

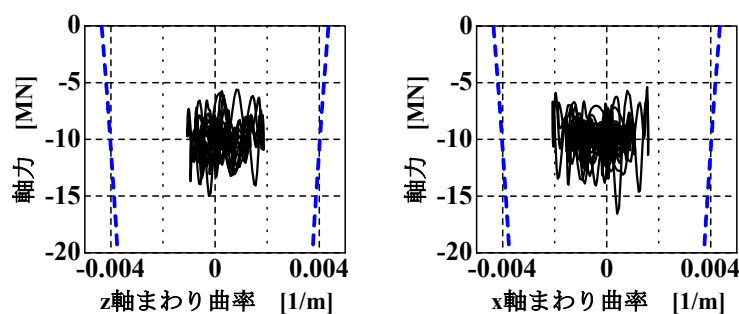
結局、2方向に同時入力を受けた場合には、最大曲率の発生する方向が重要になることから2方向独立の照査や、2方向同時入力の結果を橋軸まわり・橋軸直交軸まわりの曲率だけで評価する方法では十分ではないことが分かる。

#### 4.3 軸力変動の影響に関する検討

地震動の水平動-上下動相関は必ずしも明確ではないため、実際の設計において上下動の影響を考慮に入れることは難しいと考えられるが、実際には軸力変動が生じることにより、終局時の断面ひずみ状態は変化する。そこで今回の動的応答解析において得られた曲率履歴と軸力の関係について考察を加えることとする。

図-15に2方向独立照査の場合の軸力と各軸まわりの曲率をプロットしたものを示す。図中の点線は、対応する軸力に対する終局曲率の値を示している。

同図から、軸力は17~5[MN]の間で変動していることになるが、その間での終局曲率の変化



a) z 軸まわり                      b) x 軸まわり

図-15 軸力-曲率履歴(2方向独立照査)

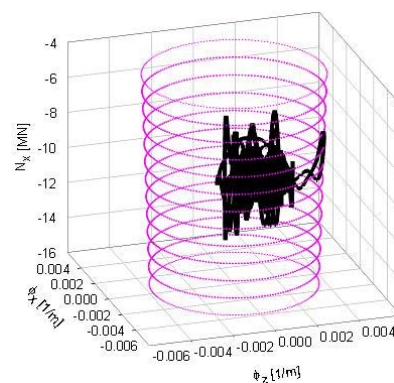


図-16 軸力-曲率履歴(2方向同時照査)

は 0.00035[1/m]程度である。この図からは、軸力変動による終局曲率の変化を考慮しても、曲率履歴は終局曲率に達していないことが示されている。

次に、2方向同時入力の場合を示すと、図-16 のようになる。この場合、円周により形作られるものが終局曲率曲面ということになるが、同図により、軸力変動を考慮に入れた終局曲面を用いても越えていることが分かる。

これらの軸力変動による終局曲率の変化を設計において考慮すべきか否かは議論の余地があるが、軸力変動がもたらす終局曲面の変化を認識することは重要であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、円形断面を有するRC橋脚を対象として、時刻歴応答上での橋脚基部曲率履歴に着目し、終局ひずみとの比較により終局状態を判定する手法を提案・検討した。検討は現在の耐震設計に基づく2方向独立照査との比較により行った。地震動は一波のみの限定された条件ではあるが、得られた知見をまとめると次のようである。

- 1) 水平2方向の地震入力を独立して行った場合と同時にを行った場合では、応答値に差が生じるため、2方向独立入力の結果をもって2方向同時入力の場合の判定を行うことは適切ではない。
- 2) 2方向同時入力を受ける場合の耐震照査に

は、橋軸・橋軸直交軸まわりに発生する曲率のみでの判定では十分とは言えず、2方向曲率相関を考慮した終局曲率曲面との関係を把握する必要がある。

- 3) 軸力変動が終局曲率曲面の大きさに与える影響はそれほど大きくないが、軸力変動により終局曲率が小さくなる可能性を念頭に置く必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，日本道路協会，2002
- 2) たとえば 中野友裕，田邊忠顕：地震時におけるRC橋脚への3次元効果に関する数値解析的研究，土木学会論文集 No.739/V-60，pp.165-179，2003.8
- 3) 森下邦宏，宇佐美勉，阪野崇人，葛西昭：鋼製橋脚の動的耐震評価法に関する検討，土木学会論文集 No.710/I-60，pp.181-190，2002.7
- 4) Wilson, E. L. and Penzien, J.: Evaluation of Orthogonal Damping Matrices, *International J. for numerical methods in engineering*, Vol. 4, pp.5-10, 1972
- 5) 中野友裕，田邊忠顕：コンクリート構造物の数値解析への Flexibility 法の適用に関する研究，土木学会論文集，Vol.725，2003.2
- 6) Darwin, D. and Pecknold, D. A. : Analysis of Cyclic Loading of Plane R/C Structures, *Computers and Structures*, Vol.7, pp.137-147, 1977
- 7) CEB : *RC ELEMENTS UNDER CYCLIC LOADING*, Thomas Telford, pp.58-69, 1996