

繰返しによる耐力低下を考慮した RC 部材の履歴モデルの開発

野上 雄太* 室野 剛隆* 佐藤 勉*

Nonlinear Hysteresis Model of RC Members Considering Strength Degradation by Cyclic Loading

Yuta NOGAMI Yoshitaka MURONO Tsutomu SATO

It is well known that the strength of RC columns is degraded by cyclic loading, particularly in the post-peak region. It is important, therefore, to take into account the strength degradation caused by cyclic loading, in order to examine the seismic capacity of RC structures by using dynamic response analysis. In this study, first, we have developed a nonlinear dynamic hysteresis model which can take into account the strength degradation caused by cyclic loading. Second, we have attempted to evaluate the effects of cyclic characteristics of earthquake on the strength degradation in the post-peak region by using this model. Consequently, we have clarified that the post-peak behavior of RC structures varies depending on cyclic characteristics of the ground motion.

キーワード：非線形履歴モデル，繰返し，耐力低下

1. はじめに

曲げ破壊する鉄筋コンクリート (RC) 部材は、繰返し作用を受け、変形がある程度進行すると耐力低下を起こすことが知られており、特にポストピークでは繰返しの影響が大きい。既往の研究では、例えば、星隈ら²⁾は様々な载荷パターンに対する RC 部材の静的交番载荷試験に基づいて、繰返し回数が RC 部材の変形性能に与える影響が大きいことを指摘している。よって、繰返し特性の異なる地震動に対して、RC 部材のポストピーク領域における繰返し作用による耐力低下の挙動を把握することは、RC 構造物の地震時の安全性を検討する上で非常に重要である。

一方、RC 構造物の地震応答解析のための様々な非線形履歴モデルも開発されており、クラフモデル³⁾や武田モデル⁴⁾が一般的にはよく用いられている。しかし、これらのいずれのモデルも、繰返しによる耐力低下が考慮されていない。近年になり、繰返しによる耐力低下を考慮できる非線形モデル^(例えば5) 6) 7)もいくつか提案されつつあるが、モデルが非常に複雑であったり、静的交番载荷試験の適用性は検討されているものの、地震応答解析の実用には至っていないのが現状である。

そこで、本研究では、既往の正負交番载荷試験に基づき、梅村ら⁵⁾の概念を取り入れて、地震応答解析のための繰返しによる耐力低下を考慮した非線形履歴モデルを

提案することを目的とする。また、提案モデルを用いた試計算として、地震応答解析を実施し、地震動の繰返し特性が RC 構造物に与える影響を把握したので報告する。

2. 非線形履歴モデルの提案

2.1 耐力低下の考え方

図1に繰返しによる耐力低下の基本的な考え方を示す。この図は、説明を簡単にするためにバイリニア型を例にとり示しているが、トリリニア型等の骨格曲線にも適用が可能である。このモデルは、着目する载荷 (図中①) の指向点 d_n が、前回ループまでの同方向の指向点 d_p よりも Δd だけ先を目指すことで、繰返しによる剛性低下が考慮され、同一変位 d_p に着目すると擬似的に見かけの耐力が低下することを表現できるモデルである。指向点の移動量 Δd は、前回ループの折り返し点の変位 d_{\max} , d_{\min} に関係が深いと考え、(1)式のように表現される。

$$d_n = d_p + \Delta d = d_p + (d_{\max} - d_{\min}) \cdot \chi \quad (1)$$

ここで、 d_n : 着目する载荷の指向点
 d_p : 前回ループまでの指向点
 Δd : 指向点の移動量
 d_{\max} : 同方向の折返し点
 d_{\min} : 反対方向の折返し点
 χ : 剛性低下係数

ここで、 χ は剛性低下係数と呼ばれ、繰返しによって耐力低下する度合いを表すパラメータである。つまり、 χ

* 構造物技術研究部 (耐震構造)

特集：構造物の耐震技術

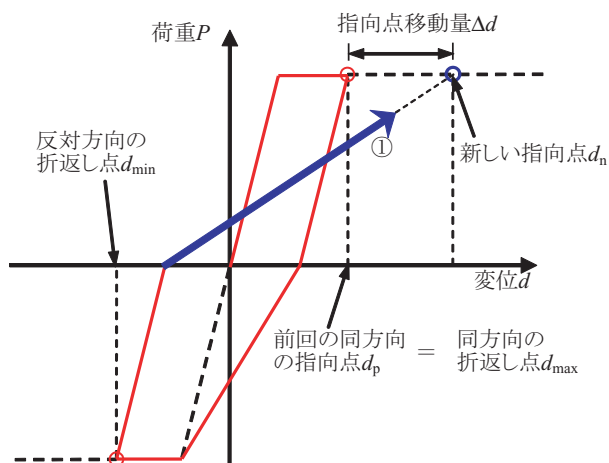


図1 繰返しによる耐力低下の考え方

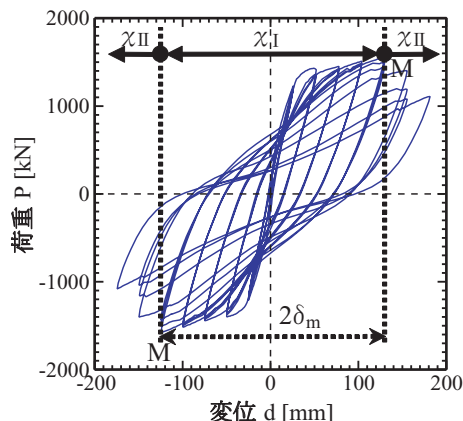


図2 剛性低下係数χの区別

の値が大きければ指向点が大きく移動し、耐力が大きく低下することを意味している。

田所ら⁸⁾は、RC柱の振動台実験に基づき、RC柱の正側と負側の応答変位の幅、つまり、両振幅の変位が、耐震標準で規定される最大耐力点（M点）の2倍の変位（ $2\delta_m$ ）を超えると、部材の損傷が進展し、崩壊に至る可能性があること指摘している。また、図2に示す既往の正負交番荷試験の履歴曲線に、このことを当てはめてみても、両振幅の変位が $2\delta_m$ を超えると繰返しによって大きく耐力低下して損傷が進展している。よって、耐力低下する度合いが両振幅の変位 $2\delta_m$ を境界にして異なることとし、これを直接的に表現するため、 $2\delta_m$ の前後で χ_I 、 χ_{II} の別々の剛性低下係数を設定した。

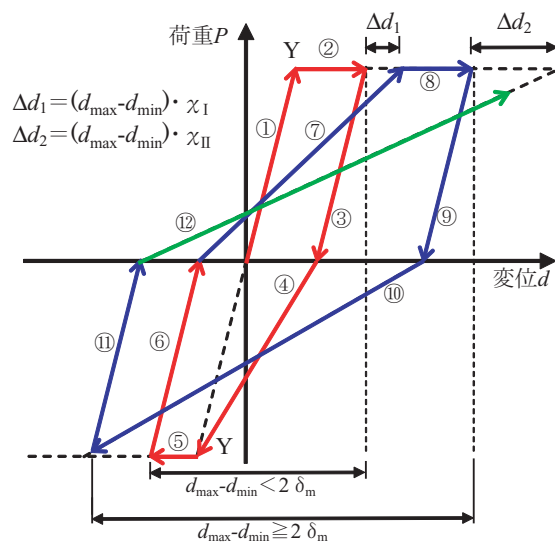


図3 履歴法則

2.2 履歴法則

2.1節では、繰返しによる耐力低下の基本的な考え方を示したが、ここでは、提案モデルの詳細な履歴法則について記述する。図3に履歴曲線の例を示す。

- ① 原点Oと降伏点Yとの間を移動する場合は、繰返しによる耐力低下が生じないと考え、弾性域上を移動する。
- ② Y点以降の荷重は第2勾配の骨格曲線上を進む。
- ③ 骨格曲線上で除荷されると、荷重0点まで除荷勾配で移動する。なお、荷重0点までに再荷重された場合は、同じ直線上を戻り、除荷点を超えると骨格曲線上を移動する。
- ④ 進行方向で降伏を経験していない場合は、降伏点を目指す。
- ⑤ Y点に達したら骨格曲線上を移動する。
- ⑥ ③と同様。

- ⑦ 降伏点を経験しており、かつ、前回ループ（①～⑥）の両振幅が $2\delta_m$ より小さい場合、 χ_I を用いて(1)式によって算出した指向点 d_n を目指す直線上を移動する。
- ⑧ 骨格曲線上を移動する。
- ⑨ ③と同様。
- ⑩ ⑦と同様。
- ⑪ ③と同様。
- ⑫ 前回のループ（⑦～⑪）で折り返し点の幅（両振幅）が $2\delta_m$ を超えているので、 χ_{II} を用いて(1)式によって算出した指向点 d_n を目指す直線上を移動する。

ここで、⑦、⑩、⑫の荷重は、いずれも前回の同方向の荷重で最大経験変位を超えている。着目する荷重において、前回の同方向の荷重変位が小さく、最大経験変位を超えていない場合は、損傷が大きく進展しないと考える。指向点は移動させないこととした。

表1 実験データ概要

試験体 No.	断面幅 b (mm)	断面高 h (mm)	有効高 d (mm)	せん断スパン La (mm)	せん断スパン比 La/d	①引張鉄筋 (最外縁の軸方向鉄筋) ②側方鉄筋 (片側あたり)	帯鉄筋 (鉄筋径@間隔 (mm) ×組数)	軸圧縮応力 σ_0 (N/mm ²)	引張鉄筋比 p_t (%)	帯鉄筋比 p_w (%)	コンクリート強度 f'_c (N/mm ²)	載荷繰返し回数 ^{*1)}						
H95-1	900	900	821	3300	4.0	①SD345 D32-10 本 ②SD345 D32-5 本	SD345 D13@100 × 1	3.87	1.07	0.28	30.0	3回/1 δ_y						
H95-2							SD345 D13@100 × 1.5			0.42	28.0							
H95-3							SD345 D16@100 × 1.5			0.66	31.4							
H96-11						900	900		821	3300	4.0		①SD390 D32-8 本 SD390 D29-1 本 ②SD390 D29-5 本	SD345 D13@100 × 1.5	3.87	0.95	0.42	29.2
H96-12														SD345 D13@100 × 1.5			0.42	30.3
H97-1														①SD345 D32-10 本 ②SD345 D32-5 本			SD345 D16@100 × 1.5	1.07
H97-2													SD345 D16@100 × 2			0.88	28.2	
H97-3													SD345 D19@100 × 2			1.27	29.2	
H97-4													SD345 D16@100 × 2			0.88	30.9	
H97-5						SD345 D16@100 × 1.5	0.97		0.66	30.7								
H97-6						SD345 D16@100 × 1.5	3.87		0.66	31.8								
T97-1						800	800		728	3000	4.1		①SD345 D25-9 本 ②SD345 D25-7 本	SD345 D13@80 × 2	3.68	0.78	0.78	30.0
T97-2	SD345 D13@80 × 2	0.00	0.78	32.6														
T97-3	SD345 D10@80 × 2	3.68	0.45	24.3														

*1) n 回/m δ_y ; m δ_y の載荷につき n 回繰り返す載荷パターンを示す。

2.3 剛性低下係数 χ の設定

繰返しによる耐力低下の度合いはRC部材の諸元（帯鉄筋比 p_w や引張鉄筋比 p_t など）によって異なることが指摘されている⁹⁾。提案モデルでは、耐力低下の度合いは剛性低下係数 χ で表現されるため、耐力低下に影響を及ぼすRC部材のパラメータを用いて剛性低下係数 χ を定式化する必要がある。そこで、既往の正負交番載荷試験結果を整理して剛性低下係数 χ の定式化を試みた。

2.3.1 既往の交番載荷試験データ

χ の定式化に用いたデータは、過去に鉄道総研で実施した正負交番載荷試験結果である。表1に使用した実験データの概要¹⁰⁾を示す。これらの実験は、鉄道RCラーメン高架橋の柱部材の実大モデルで実施され、それぞれ軸圧縮応力度（0～3.87 N/mm²）、引張鉄筋比（0.78～1.07%）、帯鉄筋比（0.28～1.27%）、載荷パターン等をパラメータとした合計14体ある。すべての供試体は破壊形態が曲げ破壊型となっている。

2.3.2 データの整理

表1に示した各試験の履歴曲線（荷重-変位関係）から、前回と同方向の指向点 d_p 、着目している載荷の新しい指向点 d_n 、同方向の折り返し点 d_{max} 、反対方向の折り返し点 d_{min} を読み取り、(1)式に代入して χ を算出した。この作業を繰返しの回数毎に行なった。なお、1つの供試体に対して繰返し回数と同数の χ_I 、 χ_{II} の値が得られるが、それらの平均値を用いることとした。実験データから算出した $\chi_{I,exp}$ 、 $\chi_{II,exp}$ を表2に示す。表2より、 $\chi_{I,exp}$ は、 $\chi_{II,exp}$ と比較すると1桁小さい数値となっており、繰返しによる耐力低下の影響は小さく、平均値は0.02である。また、変動係数は20%であり、供試体によるばらつきも比較的小さい。一方、 $\chi_{II,exp}$ の変動係数は

表2 $\chi_{I,exp}$ 、 $\chi_{II,exp}$ の整理結果

試験体 No.	$\chi_{I,exp}$	$\chi_{II,exp}$
H95-1	0.01	0.40
H95-2	0.02	0.37
H95-3	0.01	0.26
H96-11	0.02	0.30
H96-12	0.02	0.30
H97-1	0.02	0.18
H97-2	0.02	0.13
H97-3	0.02	0.14
H97-4	0.02	0.14
H97-5	0.02	0.20
H97-6	0.02	0.24
T97-1	0.02	0.18
T97-2	0.02	0.14
T97-3	0.02	0.26
平均	0.02	0.23
変動係数	0.199	0.386

は40%程度となっており、供試体の諸元によってばらついていることが分かる。

このことから、 $\chi_{I,exp}$ については、繰返しによる耐力低下の影響が少ない領域であること、供試体によらず概ね一定値であることを考慮して平均値0.02を用いることとした。 $\chi_{II,exp}$ については、耐力低下の影響が大きい領域であり、供試体によってばらつきが大きいことから、供試体の諸元を用いて回帰分析することとした。

2.3.3 剛性低下係数 χ の定式化

2.3.2で整理した $\chi_{II,exp}$ と繰返しによる耐力低下に影響を及ぼすと考えられる部材パラメータとの関係を整理した。図4に、帯鉄筋比 p_w のみをパラメータとしている供試体（引張鉄筋比 $p_t=1.07\%$ 、軸圧縮応力 $\sigma_0=3.87$

特集：構造物の耐震技術

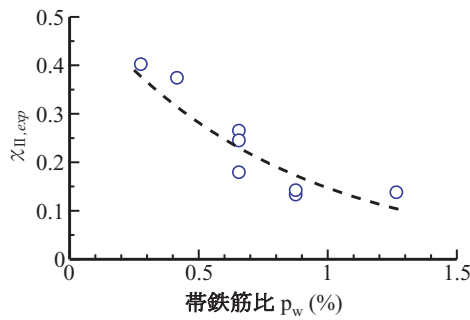


図4 $\chi_{II,exp}$ と帯鉄筋比 p_w との関係

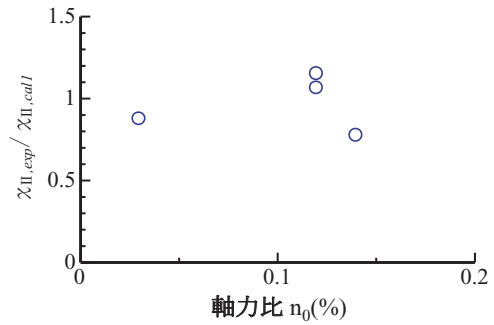


図6 $\chi_{II,exp} / \chi_{II,cal}$ と軸力比 n_0 との関係

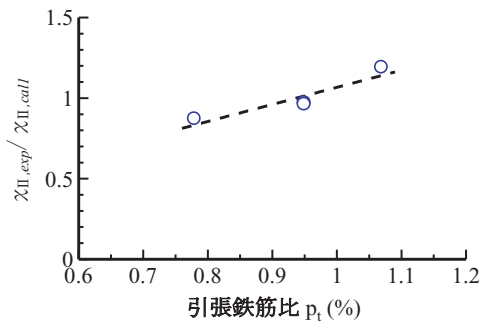


図5 $\chi_{II,exp} / \chi_{II,cal}$ と引張鉄筋比 p_t との関係

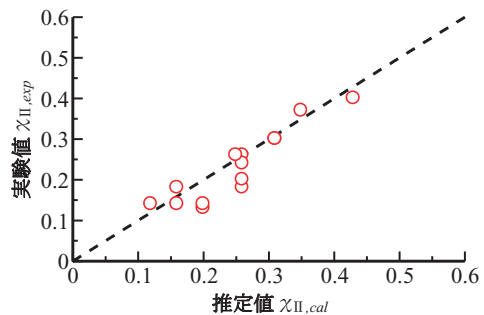


図7 χ_{II} の実験値と推定値の比較

N/mm²) を用いた $\chi_{II,exp}$ と帯鉄筋比 p_w (%) との関係を示す。図4より、帯鉄筋比 p_w が増加するとともに、 $\chi_{II,exp}$ が指数関数的に減少していることが分かる。これは、帯鉄筋量が多いと、繰返しによる損傷、つまり耐力低下が起きにくいことを意味しており、帯鉄筋が軸方向鉄筋および内部コンクリートを拘束することで繰返しによる損傷を抑制し、変形性能が向上するというRC部材の力学的特性と調和的な結果である。 $\chi_{II,exp}$ と帯鉄筋比 p_w の関係によく合う関数として指数関数を選定し、最小二乗法を適用して回帰式(2)式を導いた。

$$\chi_{,cal1} = 0.54 \cdot e^{-1.3p_w} \quad (2)$$

ここで、 p_w : 帯鉄筋比 (%)

次に、引張鉄筋比 p_t と $\chi_{II,exp} / \chi_{II,cal1}$ の関係を図5に、軸力比 n_0 と $\chi_{II,exp} / \chi_{II,cal1}$ の関係を図6に示す。図5の引張鉄筋比 p_t との関係を見ると、引張鉄筋比 p_t の増加とともに $\chi_{II,exp} / \chi_{II,cal1}$ が大きくなる傾向にあることが分かる。一般に、同じ帯鉄筋量で、軸方向鉄筋が多い柱は、軸方向鉄筋の座屈に対する拘束が弱く、その結果、最大耐力以降の耐力低下が顕著になるため χ_{II} が大きくなるものと考えられる。引張鉄筋比 p_t と $\chi_{II,exp} / \chi_{II,cal1}$ との関係は線形であると仮定し、最小二乗法によって(3)式が得られた。

$$\chi_{,exp} / \chi_{,cal1} = 1.06 \cdot p_t \quad (3)$$

ここで、 p_t : 引張鉄筋比 (%)

図6を見ると、軸力比 n_0 と $\chi_{II,exp} / \chi_{II,cal1}$ との間には今回の軸力比の範囲では明瞭な相関が見られないことが分かる。よって、 χ_{II} の定式化には n_0 をパラメータとして取り入れないこととしたが、軸力比 n_0 が χ_{II} に与える影響は今後検討の余地があると考えられる。

以上より、 χ_{II} は帯鉄筋比 p_w および引張鉄筋比 p_t と関係が深いと考えて、(3)式に(2)式を代入して展開し、(4)式を得た。表1に示した全14供試体に対して、(4)式を適用して推定した $\chi_{II,cal}$ と載荷試験から得られた $\chi_{II,exp}$ を比較したものを図7に示す。図7より、提案した(4)式は、若干大きく評価しているケースがあるものの実験値を概ね良く推定できていることが確認できる(変動係数は17%)。なお、この式の適用範囲は、表1に示した部材パラメータの範囲である。

$$\chi_{,cal} = 0.57 \cdot p_t \cdot e^{-1.3p_w} \quad (4)$$

ここで、 p_t : 引張鉄筋比 (%)

p_w : 帯鉄筋比 (%)

3. モデルの検証

2章で提案したモデルを検証するために、表1に示す静的な正負交番載荷試験のシミュレーションを行なった。シミュレーションに用いた骨格曲線は、交番載荷試験の履歴曲線の包絡線および耐震標準を参考にして設定した。例として、1回繰返し漸増載荷(H97-6供試体)と3回繰返し漸増載荷(H97-1供試体)に対するシミュレ

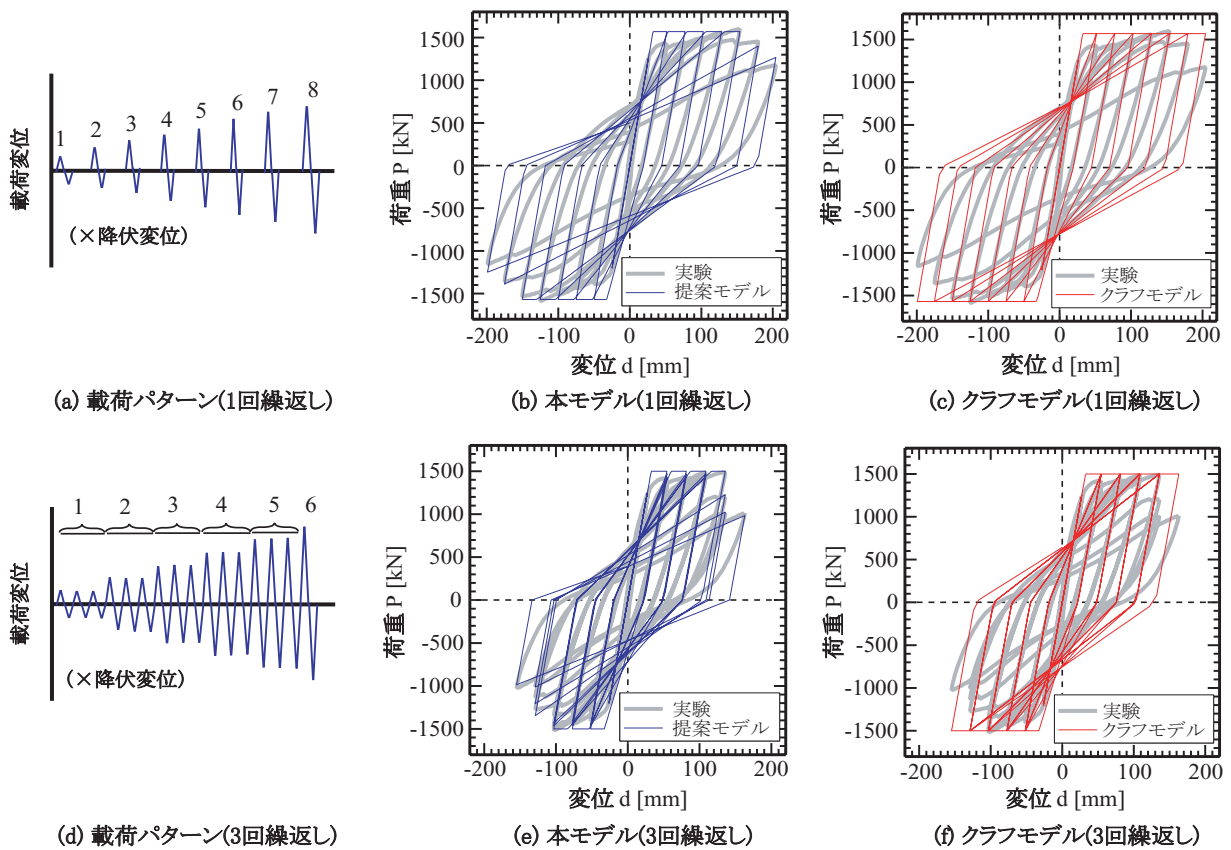


図8 静的交番荷重試験のシミュレーション結果

シミュレーション結果を図8に示す。図中の左列は荷重パターン、中列は提案モデルのシミュレーション結果、右列は従来からよく用いられている耐力低下を考慮しないクラフモデルのシミュレーション結果を示している。荷重パターンの縦軸は降伏変位の整数倍の荷重変位、横軸は荷重ステップを表している。履歴曲線の縦軸は荷重 P (kN)、横軸は変位 d (mm) を示しており、実験値 (太線) とシミュレーション結果 (細線) を重ねて描いている。

図8(c)(f)のクラフモデルでシミュレーションした履歴曲線を見ると、繰返しの影響が少ない最大耐力点までは実験をよく再現できているのに対し、繰り返すたびに耐力が低下する最大耐力点以降の挙動は全く再現できていない。一方、図8(b)(e)の提案モデルの履歴曲線を見ると、最大耐力点以降において、繰返しによる耐力低下を表現できており、荷重パターン (繰返し回数) によらず概ね実験結果を再現できていることが分かる。

なお、表1のその他の供試体に対するシミュレーションは紙面の都合上省略するが、同様にして実験を概ね再現できることを確認している。以上より、静的な正負交番荷重試験における本提案モデルの妥当性は確認されたと考えられる。

4. 地震応答解析

橋脚を1自由度系でモデル化し、履歴特性に提案モデルを用いて、繰返し特性の異なる地震波を入力した1自由度系地震応答解析を実施した。解析に用いた入力地震波は、耐震設計標準¹⁾のL2地震動スペクトルⅠおよびスペクトルⅡであり、両者とも最大加速度を800galに振幅調整している。構造物の諸元は、固有周期0.8秒、降伏震度0.4、 $\chi_I = 0.02$ 、 $\chi_{II} = 0.15$ と設定した。解析結果を図9に示す。図9(a)のL2地震スペクトルⅠを入力した結果を見ると、同じレベルの波列が数十秒続くため、多くの繰返しによって耐力が低下して、変形が進行していることが分かる。一方、図9(b)の繰返し回数の少ないスペクトルⅡ地震では、数波のパルス的な波によって最大応答変位が決定している。最大応答を示した後は、繰返しによって剛性が低下するものの、変形の進行は見られない。このように、地震動の繰返し特性によってRC構造物の挙動は大きく異なる。よって、繰返しの影響を大きく受ける領域を含むRC構造物の耐震性を検討する上で、応答値の算定に対しても、設計照査に用いる限界値に対しても、地震動の繰返しの影響を考慮することが重要かつ合理的であると考えられる。

特集：構造物の耐震技術

5. まとめ

本論文は、RC部材に対して繰返しによって耐力低下する挙動を把握することを目的として、地震応答解析のための繰返しによる耐力低下を表現できる非線形履歴モデルを提案した。モデルの概要は以下のとおりである。

- 履歴曲線の折り返し点 (d_{max} , d_{min}) および剛性低下係数 χ を用いて指向点の移動量を定めることで、繰返しによる耐力低下を表現できる。
- 剛性低下係数 χ は、正負両側の振幅変位を基準として、耐震標準に定められた最大耐力点 (M点) 変位の2倍 ($2\delta_m$) を境界に χ_I , χ_{II} を用いて使い分け、耐力低下する度合いを区別する。
- 繰返しによる耐力低下の度合いを示すパラメータ χ_{II} は、帯鉄筋比 p_w , 引張鉄筋比 p_t と密接に関係しており、両者を用いることで概ね耐力低下の度合いを評価できる。
- 静的な正負交番載荷試験の結果を概ね再現できることが確認できた。

また、提案モデルを用いた地震応答解析を行なった結果、RC構造物の地震時挙動は、地震動特性によって大きく異なることから、RC構造物の耐力低下域を含む応答値の算定または安全性限界の検討を行なう上では、本提案モデルのような繰返しによる耐力低下を考慮できる非線形履歴モデルを用いる必要があることが分かった。

本モデルに対する今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- 剛性低下係数 χ は、限られた試験結果から定めている。そのため、他の静的載荷試験や振動実験の結果を用いて適用範囲を確認する必要があると考えられる。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999
- 2) 星隈順一，運上茂樹，川島一彦，長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法，構造工学論文集，

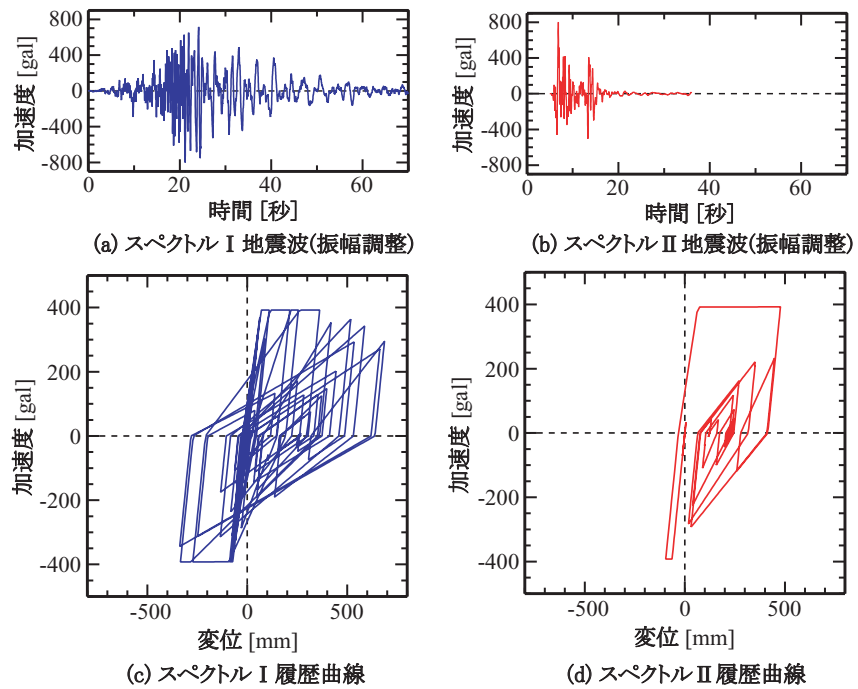


図9 1自由度系地震応答解析結果

Vol.44A, pp.877-888, 1998

- 3) Clough, R. W. and Johnston, S. B. : Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements, Proceedings of Japan Earthquake Engineering Symposium, 1966
- 4) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nilsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceedings of ASCE, Structural Division, pp.2557-2573, 1970
- 5) 梅村恒，市之瀬敏勝，大橋一仁，前川純一：耐力低下を考慮したRC部材の復元力特性モデルの開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.2, pp.1147-1152, 2002
- 6) Park Y.J., Reinhorn A.M., Kunnath S.K. : Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings , Proc. of 9th WCEE, Japan, Vol.VII, pp.211-216, Aug. 1988.
- 7) 運上茂樹：繰返しによる劣化の影響を考慮した鉄筋コンクリート部材の非線形履歴モデルに関する一検討，土木学会第52回年次学術講演会，I-B135, pp.270-271, 1997
- 8) 田所敏弥，谷村幸裕，室野剛隆：地震動の繰返しを受けるラーメン高架橋柱の崩壊限界の評価法，鉄道総研報告，Vol.22, No.3, pp.11-16, 2008
- 9) 瀧口将志，渡辺忠朋，谷村幸裕：RC部材の繰返し載荷による曲げ耐力低下に関する実験的研究，土木学会第56回年次学術講演会，V -371, pp.742-743, 2001
- 10) 瀧口将志，渡辺忠朋，佐藤勉：RC部材の変形性能の評価，鉄道総研報告，Vol.13, No.4, pp.9-14, 1999