繰り返しによる耐力低下を考慮した鉄筋コンクリート部材の非線形履歴モデルを用いた地震応答解析

（財）鉄道総合技術研究所　○野上　雄太，室野　剛隆，佐藤　勉

１．はじめに

鉄筋コンクリート（RC）部材が繰り返し作用を受け，変形がある程度進む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り返しの影響が大きい．地震応答解析でポストピークにおける繰り返し作用による耐力低下の挙動を把握することは RC 構造物の耐震性を検討する上で重要である．応答解析でよく使用される非線形モデルには，Clough モデルや Takeda モデルなどがあるが，これらの多くのモデルは繰り返しによる耐力低下は考慮されていない．繰り返しによる耐力低下を考慮したモデルとしては，例えば Park ら[1)]や梅村ら[2)]などが挙げられ，なかでも，梅村らは繰り返しによる耐力低下を簡便な形で考慮した非線形履歴モデルを提案している．ところが，載荷試験の再現に止まっており，地震応答解析による検討には至っていない．

本研究では，既往の交番載荷試験の結果に基づき，梅村らのモデルを改良した非線形履歴モデルを提案し，地震動の繰り返し特性が RC 部材のポストピークの挙動に与える影響を検討する．

２．非線形履歴モデル

図 1 に繰り返しによる耐力低下を考慮した非線形履歴モデルの基本的な考え方を示す．前回ループの同方向の指向点 dp よりも Δx だけ先を目指した点を新しい指向点 dn とすることで，繰り返しによる剛性低下を考慮し，見かけの耐力低下を表現するモデルである．指向点の移動量 Δx は，前回ループの折り返し点 dmax，dmin に関係が深いと考え，（１）式のように表現する．ここで，χ は剛性低下係数と呼ばれ，繰り返しによって耐力低下する度合いを示すパラメータである．

$$d_n = d_p + \Delta x = d_p + \left(d_{\max} - d_{\min}\right) \cdot \chi \qquad (1)$$

梅村らは，この剛性低下係数を変位レベルによらず一定値を用いているが，本研究では，例えば図 2 に示す正負交番載荷試験の履歴曲線に見られるように，最大耐力を示す前後で繰り返しによって耐力低下する度合いが異なることを直接的に表現するため，最大耐力点を境界に χ_{I}，χ_{II} と別々の剛性低下係数を設定する．

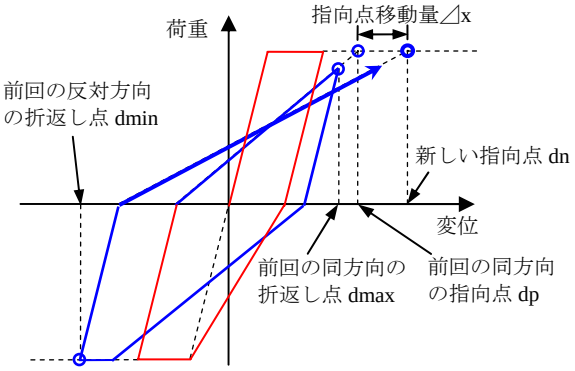


図 1　繰り返しによる剛性低下の考え方

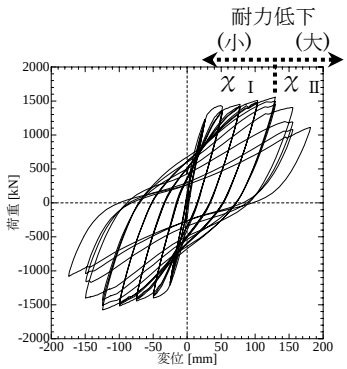


図 2　剛性低下係数の考え方

３．剛性低下係数の定式化

本モデルをより一般的に用いるためには 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[3)]から χ_{I}，χ_{II} を整理し，χ の定式化を試みた．実験から整理した χ_{I}，χ_{II} の概要を表 1 に示す．χ_{I} は平均値 0.02，変動係数 0.17 となり，多少ばらつくものの絶対値は小さく，耐力低下の度合いが非常に小さいことから平均値を用いることとした．一方，χ_{II} は耐力低下の影響が大きい領域のため，耐力低下に影響をおよぼすと考えられる部材パラメータ（帯鉄筋比 pw，引張鉄筋比 pt，軸力比 n_0）を用いて回帰分析を行なった．得られた回帰式（（２）式参照）から推定した χ_{II} を用いて実験をシミュレーションした結果を図 3 に示す．どの載荷パターンにおいても，おおむね実験結果を再現できていると考えられる．

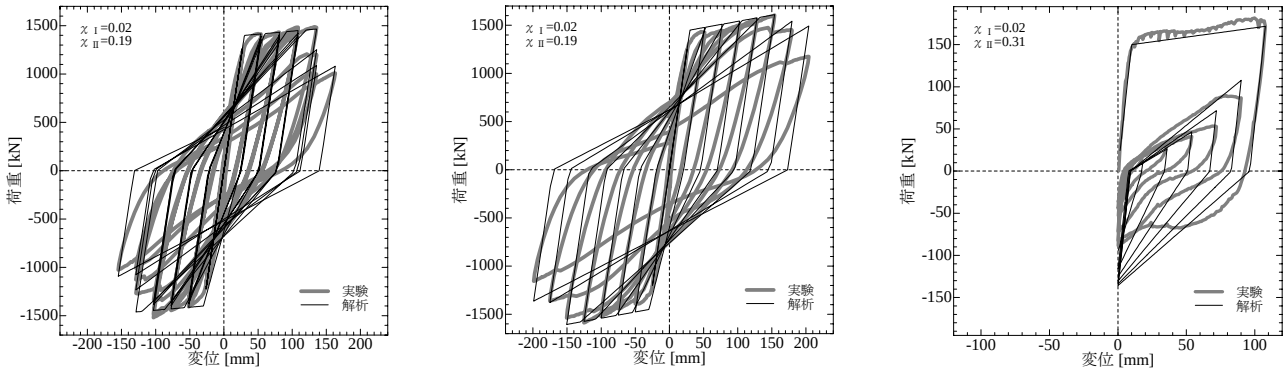
キーワード　非線形履歴モデル，繰り返し，ポストピーク，耐力低下
連絡先　　〒185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38　（財）鉄道総合技術研究所 耐震構造　TEL042-573-7394

$$\chi_{II} = 0.382 - 0.157\,pw - 0.057\,pt - 0.213 n_0 \qquad (2)$$

（補正決定係数 0.76）

表 1　χ_I, χ_{II}の整理結果

	χ_I	χ_{II}
平均値	0.02	0.19
変動係数	0.17	0.25

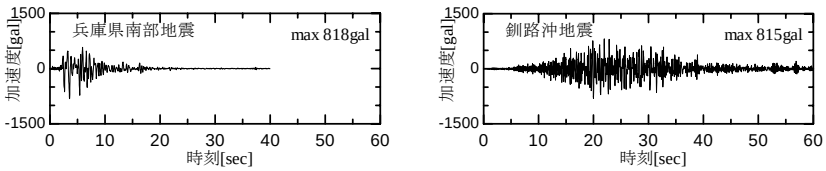


(a) 3 回繰り返し漸増載荷 [3)]　(b) 1 回繰り返し漸増載荷 [3)]　(c) 1 回繰り返し漸減載荷 [4)]

図 3　推定したχ_{II}を用いた載荷実験のシミュレーション

4．1 自由度系応答解析

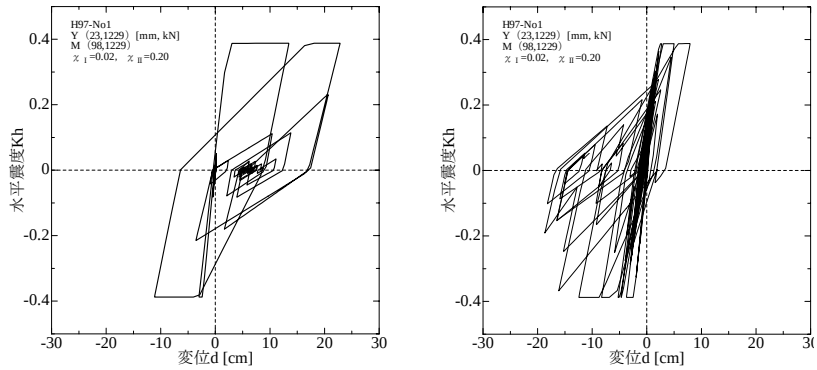
提案したモデルを用いて，繰り返し特性の異なる地震波を入力した 1 自由度系の地震応答解析を実施した．入力した地震波は継続時間の短い 1995 年兵庫県南部地震(JMA)および継続時間の長い 1993 年釧路沖地震(JMA)である（図 4 参照）．



(a) 兵庫県南部地震　(b) 釧路沖地震

図 4　入力地震動

解析結果を図 5 に示す．繰り返し回数の少ない兵庫県南部地震では，数波のパルス的な波により最大応答が決定し，その後は繰り返しにより剛性が低下するものの変形の進行は見られない．一方，釧路沖地震では，同じレベルの波列が数十秒続くので，多くの繰り返しによって見かけの耐力が低下して変形が進行していることが分かる．



(a) 兵庫県南部地震　(b) 釧路沖地震

図 5　1 自由度系応答解析結果

このように，地震動の繰り返し特性によって RC 部材のポストピークの挙動は大きく異なることから，耐震性の検討には繰り返しの影響を考慮する必要があると考えられる．

5．まとめ

鉄筋コンクリート部材が繰り返し載荷を受けた時の剛性低下を考慮した非線形履歴モデルを提案した．繰り返しによる耐力低下の度合いを示す剛性低下係数χの定式化にはさらなる検討が必要なものの，部材パラメータ（帯鉄筋比，引張鉄筋比，軸力比）を用いて，おおむね実験結果を再現できることを確認した．

提案モデルによる 1 自由度系地震応答解析の結果，地震動の繰り返し特性によって RC 部材のポストピークの挙動に及ぼす影響が異なることが分かり，耐震性の検討には繰り返しの影響を考慮すべきであることが示された．

参考文献

1)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.
2)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
3)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
4)武村浩志,川島一彦：載荷履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響,構造工学論文集,Vol.43A,pp.849-858,1997