

論文

[2068] RC 曲げ破壊部材の繰り返し載荷時のヒンジ領域歪蓄積予測モデル

西村 徹*1・野村設郎*2・衣笠秀行*3・野口 聡*1

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材は、繰り返し載荷を受ける場合、単調載荷時とは異なる破壊性状を示し、さらにその性状は載荷履歴の違いにより様々に変化する。筆者らはRC曲げ破壊部材の繰り返し疲労実験を行い、損傷の集中する部材端部の変形挙動（歪蓄積）を詳細に計測し、その結果を基にヒンジ領域の歪蓄積が原因となって発生する繰り返し載荷時特有の破壊モードの提案を行った [1]。これは、耐力低下の開始をヒンジ領域の歪蓄積により定量的に評価できるとするものであり、本論はこれに基づき、載荷履歴とその繰り返し回数によりヒンジ領域の歪蓄積を予測し部材の変形能力の定量化を試みるものである。

2. 繰り返し疲労実験

2.1 実験概要

試験体の形状及び配筋詳細を図1に示す。試験体は片持ち形式の梁部材であり、シアスパン比 2.5、部材断面 $b \times D = 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 、引張鉄筋比 $P_t = 0.96\%$ 、せん断補強筋 $6\phi - \text{Ø}37.5$ ($P_w = 0.75\%$) とした。使用した鉄筋の材料特性を表1に、各試験体のコンクリート圧縮強度を図7中に示す。部材の変位計取付位置を図2に示す。また、破壊の集中するヒンジ領域の挙動を把握する目的で部材端部に変位計を取り付けた (図3)。端部から梁成 $D (=20\text{cm})$ の領域をヒンジ領域と仮定し、変位計の計測値から図4に示す方法でヒンジ領域の梁軸方向の歪 (軸方向歪 ϵ_A) 及び、これと直交方向の歪 (横方向歪 ϵ_L) を算出した。

ただし、軸方向歪は端部より15cmの区間の歪であり梁成 D の区間の歪ではない。しかし、計測の結果、損傷の大部分が端部から15cmの区間に集中しており、この区間で得られた歪でヒンジ領域の軸方向歪を代表させることとした。載荷は図5に示すような装置

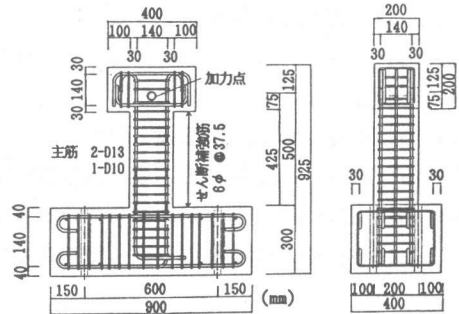


図1 試験体形状及び配筋 (mm)

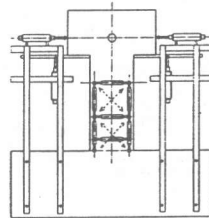


図2 変位計配置図

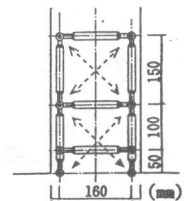


図3 端部変位計配置図

表1 鉄筋材料特性

	降伏強度 (ksf/cm^2)	最大強度 (ksf/cm^2)	ヤング係数 (10^4ksf/cm^2)
6φ	4390	5030	2.13
D10	4340	5870	2.08
D13	4150	5830	2.11

ヒンジ領域
 横方向歪 $\epsilon_L = \{ \epsilon(X2) + \epsilon(X1) \} / 2$
 軸方向歪 $\epsilon_A = \{ \epsilon(Y1) + \epsilon(Y2) \} / 2$
 $\epsilon(X1)$: 区間 $X1$ の歪 $\epsilon = \Delta L / L_0$
 ΔL : 伸び量 L_0 : 初期長さ

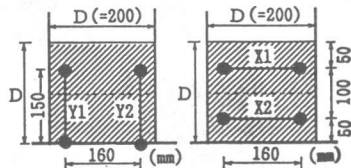


図4 軸方向歪、横方向歪算出法

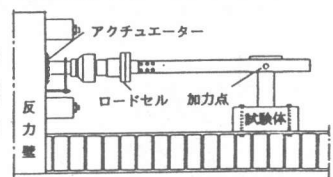


図5 加力装置

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 東京理科大学教授 理工学部建築学科、工博 (正会員)
 *3 東京理科大学講師 理工学部建築学科、工博 (正会員)

を使用し、軸方向力は加えず水平力のみを試験体に変位制御で与えた。載荷装置と試験体の接続にはボルト (25φ) を用い、試験体加力点の回転を拘束しないようにした。載荷履歴は、その違いによる損傷を比較、検討する目的で表2に示す8種類とした。なお、履歴1を除く載荷では、部材を降伏させるために1, 2サイクルにおいて降伏変位の0.5倍及び1.0倍の振幅 ($\pm 4/1000\text{rad.}$, $\pm 8/1000\text{rad.}$) の載荷を与える。

2.2 実験結果

荷重Pと変形角Rを図6のように定義し、実験より得られた荷重-変形角関係を図7に示す。単調載荷時(履歴1)には、耐力をほぼ一定に保ち200/1000rad.まで達している。しかし、繰り返し載荷時にはこれより小さな変位で耐力低下を生じており、そのときの変位は載荷履歴の違いにより異なっている。

図8に単調載荷時のヒンジ領域の軸方向歪及び横方向歪と変形角との関係を、図9, 10に繰り返し載荷時の軸方向歪及び横方向歪とサイクル数との関係を示す。繰り返し載荷時の各サイクルの歪は、荷重が0で変位が負(片側載荷では変位が小さい方)のときのものとした。単調載荷時には横方向歪はほとんど蓄積されず、軸方向歪のみが蓄積される(図8)のに対して、繰り返し載荷時にはサイクル数が増すにつれ横方向歪が増加している(図10)。このように横方向歪の蓄積は繰り返し載荷時に特に顕著であり、

表2 載荷履歴一覧

履歴	載荷履歴概略図	履歴	載荷履歴概略図
単調	1 R:変形角 	6	漸増
片側定位置	2 R 	7	片側漸増
	3 R 		
	4 R 		
片側定位置	5 R 	8	漸増

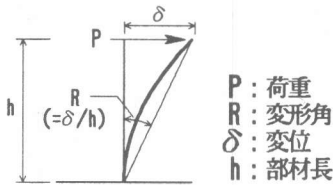


図6 荷重P、変形角R概念図

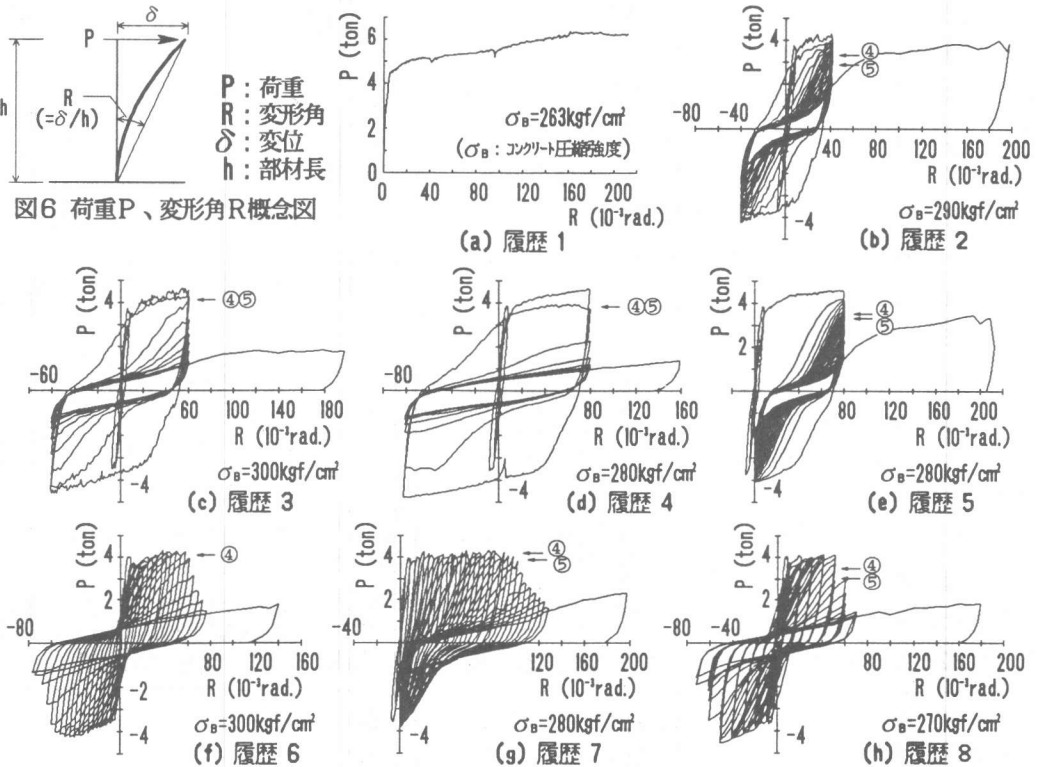


図7 荷重-変形角関係

これが繰り返し荷重を受けた試験体が単調荷重とは異なる破壊性状を示す重要な要因であると考えられる。図7, 9中の④⑤印は、横方向歪がそれぞれ0.04, 0.05に達するサイクルを示すものである。図7より変位振幅の小さい定変位型荷重(履歴2, 5)では耐力低下の開始点が不明瞭であり判断が困難であるが、横方向歪0.04, 0.05という値は部材の耐力低下の開始点とほぼ一致しているといえる。このように、繰り返し荷重時には軸方向歪と共に横方向歪が蓄積され、横方向歪がある値に達すると耐力低下を開始する。従って、ヒンジ領域の歪蓄積、特に横方向歪の増加をモデル化することにより部材の疲労損傷を定量的に把握できると考えられる。

3. 歪蓄積予測モデル

横方向歪は、主筋の降伏に伴う残留歪によって生じる軸方向歪がヒンジ領域のせん断剛性を低下させることにより発生すると考えられる。

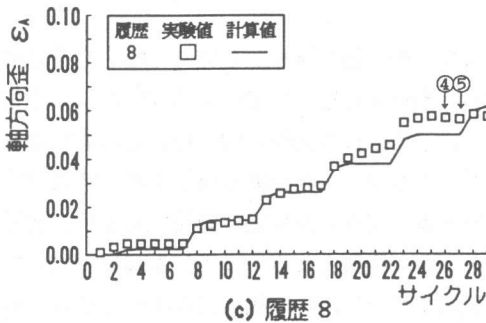
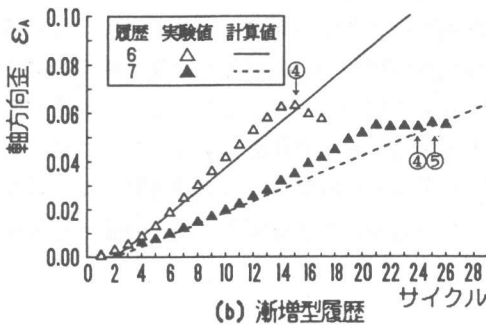
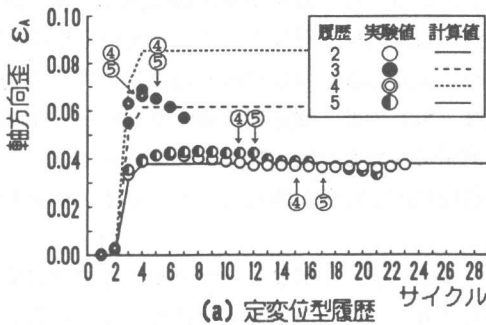


図9 軸方向歪-サイクル関係

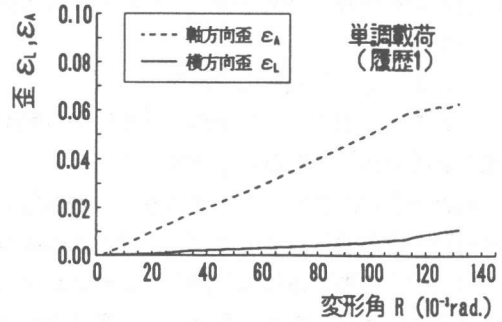


図8 軸方向歪、横方向歪-変形角関係

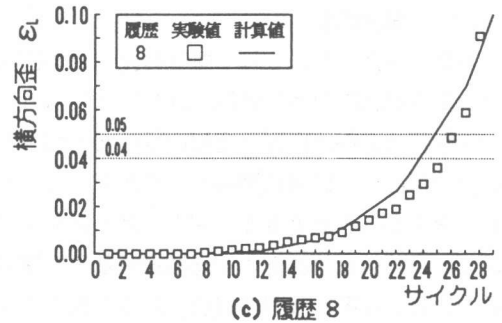
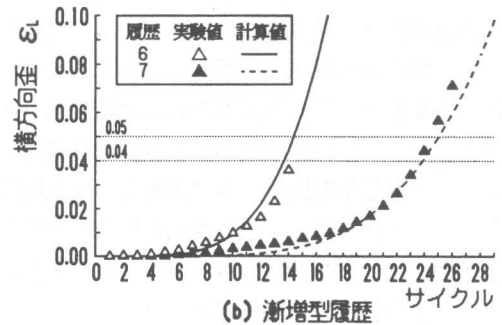
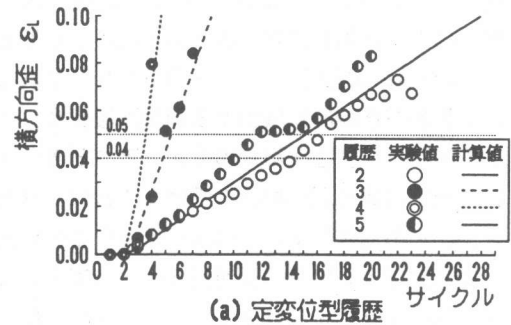


図10 横方向歪-サイクル関係

このことから、以下で提案する歪蓄積予測モデルは、主筋の降伏から耐力低下に至るまでの歪蓄積を対象としたものである。また、荷重履歴を表す指標として、図11に示す全振幅、全塑性振幅を用いることにする。全振幅は、各サイクルで部材が経験した変位の最大値と最小値の差であり、全塑性振幅は全振幅から降伏時全振幅(16/1000 rad.と仮定)を減じたものである。

3.1 ヒンジ領域の歪蓄積

ここでは、図9, 10で得られたヒンジ領域の歪蓄積の特性を荷重履歴との関連から考察する。

軸方向歪は耐力低下点に達するまで増加し、耐力低下後は停滞、減少に転じる傾向にある。軸方向歪の耐力低下点までの増加には、次のような特性がある。定変位型履歴2~5(図9(a))では、軸方向歪はある値に漸近する傾向がみられる。この場合全塑性振幅が大きいほど軸方向歪の漸近値は大きくなる。履歴4は、漸近値に到達する前に耐力低下点に達したため、この特性に適合しなかったものと思われる。履歴8(図9(c))のように軸方向歪が漸近値に達した後、振幅を増加した場合には、軸方向歪はさらに増加し、新たな漸近値に近づく。このときの全塑性振幅の増分は20/1000rad.で一定であり、これに伴い軸方向歪の漸近値もほぼ一定量で上昇している。振幅が連続的に増加する漸増型履歴6, 7(図9(b))では、軸方向歪はほぼ直線状に増加しており、全塑性振幅の増分が一定のときには軸方向歪の増分も一定となっている。以上より、軸方向歪は繰り返し荷重を受けることにより全塑性振幅に応じた値に漸近し、その漸近値は全塑性振幅を増加させることにより上昇するといえる。

横方向歪は、定変位型履歴2~5(図10(a))では、直線状に増加し、サイクル毎の横方向歪の増分がほぼ一定である。また、その全塑性振幅が大きいほどその増分も大きくなっている。漸増型履歴6, 7(図10(b))では、全塑性振幅が増すにつれ横方向歪の増分も増加している。これらのことは履歴8(図10(c))でも見られ、全塑性振幅が一定の部分では横方向歪の増分は一定であり、全塑性振幅が増すと横方向歪の増分も大きくなっている。このように、横方向歪はサイクル毎の増分が全塑性振幅により決定されると考えることができる。また、これは言い替えると定変位型履歴2, 5と履歴8の定変位型荷重の部分にみられるように、軸方向歪が一定となっている部分では、横方向歪の増分も一定となっているとみることもでき、横方向歪と軸方向歪の間に何らかの関係が存在することが推察される。

3.2 歪蓄積予測モデル

(1) 軸方向歪

前節で考察したように、軸方向歪は全塑性振幅で決まる漸近値を持ち、全塑性振幅を変化させない定変位型荷重時には繰り返しにより徐々に増加し、漸近値に近づいていく傾向にある。定変位型荷重時の軸方向歪と全塑性振幅との関係を図12に示す。軸方向歪は同一振幅での繰り返し荷重時には、2回目以降のサイクルでほぼ一定値を保っており、2回の繰り返しで漸近値に達すると考えることができる。図12より定変位型荷重時では2回目以降の軸方向歪である漸近値及び1回目の値はそれぞれ全塑性振幅と比例関係にあることが推察される。また、振幅を増加した場合には、履歴8(図9(c))にみられるように、振幅の増分に応じて軸方向歪の漸近値が上昇する。定変位型荷重のみでなく一般の荷重をも扱うため、次のようなモデル化を行った。ここで

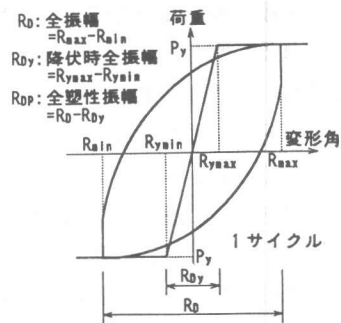


図11 全塑性振幅概念図

図13のような荷履歴を考える。軸方向歪を考える上で図13(a)に示す荷を同図(b)に示す複数の定変位型荷に分解し、これらの定変位型荷により生じる軸方向歪を足し合わせる事により任意の荷時の軸方向歪が計算されるとした(式(1))。このとき、分解された各定変位型荷により生じる軸方向歪は、その荷の全塑性振幅とサイクル数により決定されるものとした(式(2))。各定変位型荷の全塑性振幅は図13に示すように全塑性振幅の増分値をとる。

$$\epsilon_A = \epsilon_{A1} + \epsilon_{A2} + \epsilon_{A3} + \dots + \epsilon_{AM} = \sum_{i=1}^M \epsilon_{Ai} \quad (1)$$

$$\epsilon_{Ai} = f(iR_{DP}, iN) \quad (2)$$

ここに、 ϵ_A :軸方向歪、 ϵ_{Ai} :分解された*i*番目の定変位型荷による軸方向歪、*M*:分解された定変位型荷の個数、 iR_{DP} :分解された*i*番目の定変位型荷の全塑性振幅、 iN :分解された*i*番目の定変位型荷の繰り返し回数。

このように仮定したときの漸増型履歴6, 7及び履歴8の分解された全塑性振幅と軸方向歪の関係を定変位型履歴で得られたものと比較して図12に示す。ほぼ定変位型履歴の比例関係と同じ傾向にあり、全体として1回目及び2回目以降の漸近値は式(3)で表される。

$$\epsilon_{Ai} = \begin{cases} 0.4941 \cdot iR_{DP} & (iN=1) \\ 0.5904 \cdot iR_{DP} & (iN \geq 2) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)は、式(4)のように書き換えられる。

$$\epsilon_{Ai} = 0.5904 \cdot i_a \cdot iR_{DP} \quad (4)$$

ただし、 $iN=1$ のとき $i_a=0.837$ 、 $iN \geq 2$ のとき $i_a=1$ 。

式(4)は、 $iN=1$ のときに、軸方向歪が漸近値に達していないことを全塑性振幅を $i_a \cdot iR_{DP}$ とすることにより評価したものである。式(1)、式(4)により軸方向歪は式(5)で表される。

$$\epsilon_A = 0.5904 \cdot \sum_{i=1}^M i_a \cdot iR_{DP} = 0.5904 \cdot R_{DP}' \quad (5)$$

ここに、 R_{DP}' :等価全塑性振幅 ($= \sum_{i=1}^M i_a \cdot iR_{DP}$ ただし、 $iN=1$ のとき $i_a=0.837$ 、 $iN \geq 2$ のとき $i_a=1$)。

等価全塑性振幅は、各定変位型荷での繰り返し回数が1のときに軸方向歪が漸近値に達していないことを考慮した全塑性振幅である。

(2) 横方向歪

横方向歪は、前節の考察を基にサイクル毎の増分の累積として表されるものとしてモデル化を行った。こ

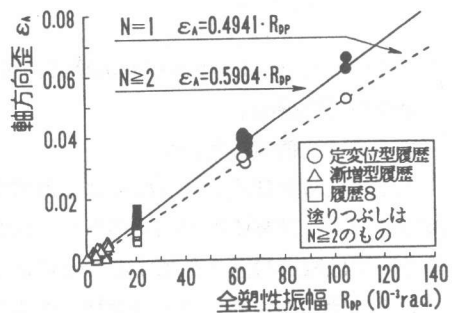


図12 軸方向歪-全塑性振幅関係

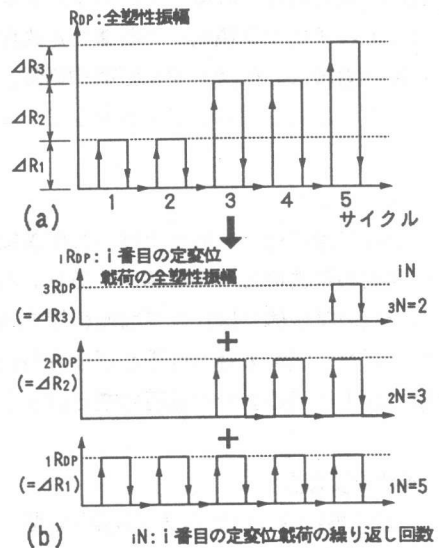


図13 荷履歴分解概念図

の横方向歪増分は、歪蓄積のメカニズムの面から考えると軸方向歪の蓄積と密接な関係にあることが推察されることから、軸方向歪の関数としてこれを表すこととした。横方向歪の蓄積モデルを式(6)、(7)に示す。

$$\varepsilon_L = \Delta\varepsilon_{L1} + \Delta\varepsilon_{L2} + \dots + \Delta\varepsilon_{LN} = \sum_{i=1}^N \Delta\varepsilon_{Li} \quad (6)$$

$$\Delta\varepsilon_{Li} = g(\varepsilon_{Ai}) \quad (7)$$

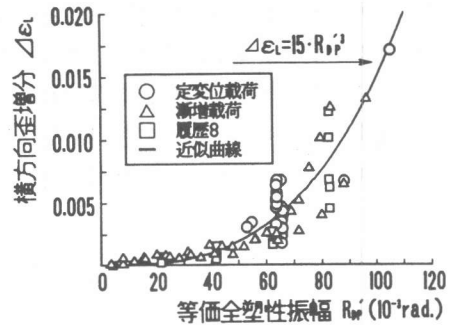


図14 横方向歪増分—等価全塑性振幅関係

ここに、 ε_L :横方向歪、 $\Delta\varepsilon_{Li}$: i サイクルの横方向歪増分、 ε_{Ai} : i サイクルの軸方向歪。

式(5)より軸方向歪が等価全塑性振幅の関数であることから、式(7)で得られる横方向歪増分も等価全塑性振幅の関数で表されることとなる。横方向歪増分と等価全塑性振幅との関係を図14に示す。この関係は荷履歴に関わらずある一定の曲線で表されており、この曲線を3次式と仮定して式(8)を得た。

$$\Delta\varepsilon_{Li} = g(R_{Dpi}) = 15 \cdot R_{Dpi}^3 \quad (8)$$

ここに、 $\Delta\varepsilon_{Li}$: i サイクルの横方向歪増分、 ε_{Ai} : i サイクルの軸方向歪、 R_{Dpi} : i サイクルの等価全塑性振幅。

3.3 歪蓄積解析結果

式(1)、(3)及び式(6)、(8)による軸方向歪と横方向歪の計算結果を図9、10に実験結果と比較して示す。計算値は実験で得られた歪蓄積の推移を的確に表しているといえる。このモデルは、軸方向歪は荷履歴を分解することにより得られた各定変位型荷毎の軸方向歪の和で表し、横方向歪はサイクル毎の増分の累積とするものである。そして、それらは全塑性振幅と繰り返し回数関数の関数で表現される。このモデルにより、本論で対象とした試験体については、荷履歴の違いによらずヒンジ領域の歪蓄積を定式化できるといえる。また、ヒンジ領域の軸方向歪及び横方向歪の蓄積は、部材のせん断補強筋量、シアスパン比の違いにより影響を受けると考えられることから、これらのパラメータを本モデルに取り入れることが今後の課題である。

4. まとめ

部材が繰り返し荷を受けると単調荷時にはみられない特有の破壊性状を示す。これはヒンジ領域の歪蓄積と密接な関係があり、本論で対象とした $b \times D = 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 、シアスパン比 2.5、 $P_w = 0.75\%$ の試験体ではヒンジ領域の横方向歪が0.04~0.05に達したときに耐力低下を開始する。また、ヒンジ領域の軸方向歪及び横方向歪は3節に示したように定式化され、これらの式を用いて耐力低下に至るまでの荷履歴と繰り返し回数を予測することが可能である。

《参考文献》

1) 衣笠秀行・野村設郎・太田雅昭・本間 茂: RC曲げ破壊部材の繰り返し疲労損傷特性、日本建築学会大会学術講演梗概集 1991.9、pp.253-254