

# 横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度～ひずみ関係の定式化

堺淳一<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>・庄司学<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 修(工) 東京工業大学大学院博士後期課程 (日本学術振興会特別研究員)  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻(同上)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻(同上)

RC 橋脚の非線形地震応答解析を行う場合には、帯鉄筋による横拘束効果を考慮した除荷・再載荷履歴を含むコンクリートの応力度～ひずみ関係の定式化が必要である。本研究では、横拘束されたコンクリートの除荷・再載荷過程における応力度～ひずみ関係を定式化することを目的として、横拘束されたコンクリートに対し、除荷・再載荷を含む4つの載荷履歴を用いて一軸圧縮載荷実験を行った。その結果、除荷・再載荷の履歴は、除荷する点のひずみ、除荷・再載荷の繰り返し回数、帯鉄筋比、コンクリート強度によらずモデル化できることが明らかになり、除荷・再載荷履歴のモデル化に必要なパラメータの推定式を提案し、除荷・再載荷履歴の定式化を行った。

**Key Words:** seismic design, seismic retrofit, bridge, lateral confinement, unloading and reloading, stress-strain relation

## 1. まえがき

平成7年の兵庫県南部地震による激甚な被害に基づき平成8年に改訂された道路橋示方書<sup>1)</sup>では、橋梁は地震時保有水平耐力法に基づき、その変形性能を考慮して設計することが規定された。鉄筋コンクリート橋脚(以下、RC 橋脚と略す)では、帯鉄筋を配置することによって変形性能を向上させることができるが、このためには帯鉄筋による拘束効果を適切に評価することが必要である。

帯鉄筋で横拘束されたコンクリートの応力度～ひずみ関係に関しては、現在までにも国内外で多数の研究があり、Park<sup>2)</sup>、Sheikh<sup>3)</sup>、六車<sup>4)</sup>、藤井<sup>5)</sup>、Mander<sup>6)</sup>、Saatcioglu<sup>7)</sup>、Hoshikuma<sup>8)</sup>によって、モデルが提案されている。これらはいずれも帯鉄筋比をいろいろと変化させた供試体に対する一軸圧縮からコンクリートの応力度～ひずみ関係を求めたものであり、いずれも単調載荷実験結果に基づいている。こうした検討結果は、RC 橋脚などの終局曲率の算定に有効に利用されてきているが、地震応答に対する履歴特性を求めめるためには、単に応力度～ひずみ関係の包絡線だけでなく、ここから除荷したり、その後再載荷した場合の履歴も必要となる。特に、RC 橋脚の非線形地震応答を解析する場合には、任意の荷重履歴に対する除荷・再載荷履

歴の定式化が必要である。

除荷・再載荷を含むコンクリートの応力度～ひずみ関係に関しては、1960年代から Ban<sup>11)</sup>、Sinha<sup>12)</sup>、Karsan<sup>13)</sup>が一軸圧縮載荷実験結果に基づいて、モデル化を試みているが、帯鉄筋による横拘束の重要性が広く知られるようになった1971年 San Fernando 地震以前の研究には、帯鉄筋による横拘束効果は見込まれていない。帯鉄筋による横拘束効果を考慮した除荷・再載荷の応力度～ひずみ関係には、Park<sup>14)</sup>、Ristic<sup>15)</sup>、谷川<sup>16)</sup>、Mander<sup>17)</sup>による研究がある。このうち Park<sup>14)</sup>らや Ristic<sup>15)</sup>らは、RC 橋脚の動的解析に用いるために既往のコンクリートの応力度～ひずみ関係モデルに基づいて、除荷・再載荷履歴を提案しているが、これは多くの研究者によって行われた実験をまとめたものであり、独自の試験結果に基づく提案ではない。谷川<sup>16)</sup>らは、帯鉄筋量を変化させた7体の角柱体を用いて、一軸圧縮状態で一定応力度繰り返し載荷実験、一定ひずみ繰り返し載荷実験を行っているが、正方形断面に対する実験だけであり、また除荷・再載荷履歴の定式化は行われていない。Mander<sup>17)</sup>らは、上述した一軸単調載荷の応力度～ひずみ関係を求める一環として、除荷、再載荷履歴の定式化を行い<sup>18)</sup>、円形断面および長方形断面供試体に対する実験から提案モデルの有効性を検討している<sup>19)</sup>。

表-1 実験に用いた供試体

供試体	コンクリート強度 $\sigma_{c0}$ (MPa)	帯鉄筋		載荷履歴
		間隔 $s$ (mm)	体積比 $\rho_s$ (%)	
A	23.0	100	0.67	タイプ I
				タイプ II
				タイプ II
				タイプ II
B	23.0	50	1.33	タイプ I
				タイプ II
				タイプ II
				タイプ II
C	23.0	25	2.67	タイプ I
				タイプ II
				タイプ II
				タイプ II
D	36.7	60	1.14	タイプ II
				タイプ II+III+IV
				タイプ II+III+IV
				タイプ II+III+IV
E	29.8	60	1.14	タイプ II
				タイプ II+III+IV
				タイプ II+III+IV
				タイプ III

Mander らの研究で興味深いのは、任意の除荷点 ( $\epsilon_{ul}$ ,  $\sigma_{ul}$ ) から除荷する場合には、応力度が 0 になる点 (以下、塑性点と呼ぶ) を除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  および除荷点応力度  $\sigma_{ul}$  の関数として与えられる割線弾性係数を用いて推定し、分数関数と  $n$  の累乗関数を組み合わせた関数で除荷履歴を提案していることである。したがって、同じ除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から除荷する場合にも、帯鉄筋比  $\rho_s$  やコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  が異なると除荷点応力度  $\sigma_{ul}$  が変化するため、推定される塑性点のひずみも変化する。

もう一つ Mander らの研究で興味深いのは、ある除荷点 ( $\epsilon_{ul}$ ,  $\sigma_{ul}$ ) から除荷したあとに、再載荷した場合には ( $\epsilon_{ul}$ ,  $0.92\sigma_{ul} + 0.08\sigma_{rl}$ ) の点を目指して、ひずみの増加とともに応力度が線形に増加するとしている点である。ここで、 $\sigma_{rl}$  は再載荷する点の応力度である。ただし、Mander らは、塑性点の推定に用いる割線弾性係数を与えた根拠や再載荷履歴の際に指向する点が ( $\epsilon_{ul}$ ,  $0.92\sigma_{ul} + 0.08\sigma_{rl}$ ) となる根拠については言及していない。また、Mander らは ( $\epsilon_{ul}$ ,  $0.92\sigma_{ul} + 0.08\sigma_{rl}$ ) から包絡線に達する過程には 2 次関数を与えているが、Dodd らはこの過程が 2 次関数ではうまく表現できないことを指摘し、3 次関数で表すことを提案している<sup>17)</sup>。Mander らの研究では帯鉄筋比が 2.00~7.08% とかなり大きい場合を対象としており、橋脚のように帯鉄筋比が低い場合に対する適用性は念頭に置かれていない。また、包絡線上の任意の点から除荷し、再び載荷して包絡線に戻る場合のみを対象としており、除荷・再載荷が繰り返す場合

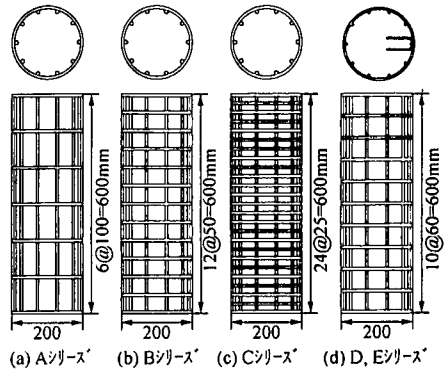


図-1 実験に用いた供試体の帯鉄筋の配置図

の検討は行われていない。

以上のように、コンクリートの応力度~ひずみ関係の包絡線に関しては、現在までも多くの研究が行われ実用的なモデルも提案されているが、除荷や再載荷履歴に対する研究は少なく、任意の繰り返し載荷のモデル化に用いることができる実用的な応力度~ひずみ関係モデルはまだ提案されていない。

このような点から、本研究では横拘束されたコンクリートの一軸圧縮載荷実験を行い、特に圧縮履歴特性に着目して除荷・再載荷過程におけるコンクリートの応力度~ひずみ関係を定式化したので、その結果を報告する。

## 2. 実験に用いた供試体と載荷方法

### (1) 実験供試体

供試体は、いずれも直径 200mm、高さ 600mm の円柱供試体であり、表-1 および図-1 に示すように帯鉄筋比  $\rho_s$  およびコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  を変化させて、A シリーズ~E シリーズの 5 種類の供試体を各 4 体ずつ、合計 20 体作製した。ここでコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  とは、本実験に際して行ったテストピースによるコンクリートの圧縮強度である。

A, B, C シリーズでは、帯鉄筋による拘束効果の影響を検討するために、コンクリート強度  $\sigma_{c0}$  を 23.0MPa 一定とし、帯鉄筋間隔  $s$  をそれぞれ 100mm (帯鉄筋比  $\rho_s = 0.67\%$ )、50mm (帯鉄筋比  $\rho_s = 1.33\%$ )、25mm (帯鉄筋比  $\rho_s = 2.67\%$ ) と変化させ、SD295、直径 6mm の異形棒鋼をフレア溶接により配置した。D および E シリーズでは、コンクリート強度  $\sigma_{c0}$  の影響を検討するために、帯鉄筋間隔  $s$  は 60mm (帯鉄筋比  $\rho_s = 1.14\%$ ) と一定として、SD295、直径 6mm の異形棒鋼を定着長 60mm の 90 度フックにより配置し、コンクリート強度  $\sigma_{c0}$  をそれぞれ 36.7MPa、29.8MPa と変化させた。

供試体には、図-1 に示すように A, B, C シリーズでは SD295、直径 10mm の異形棒鋼を、D, E シリーズで

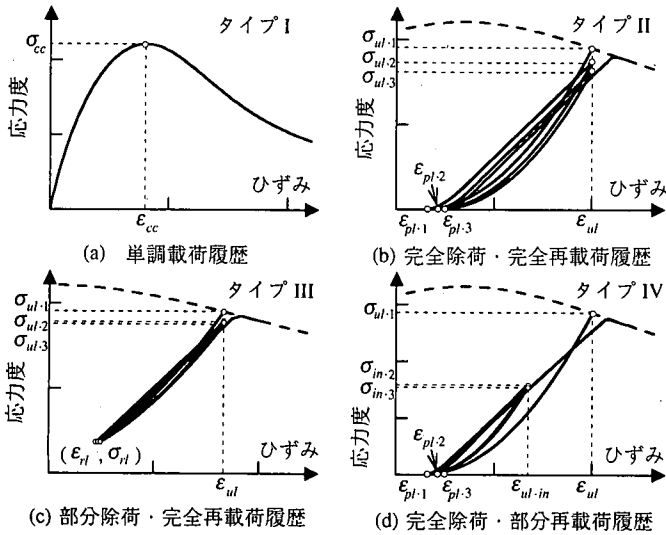


図-2 実験に用いた荷履歴

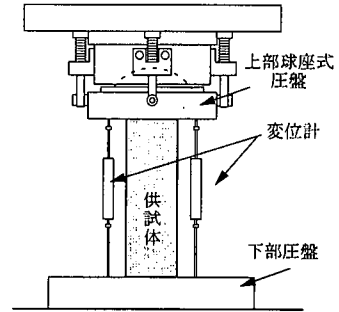


図-3 荷方法

は SD295、直径 6mm の異形棒鋼を軸方向鉄筋として配置した。ミルシートによれば軸方向鉄筋、帯鉄筋の降伏強度は 376~394MPa、引張強度は 544~557MPa、伸びは 20~23% である。

## (2) 荷履歴および荷方法

地震時に RC 橋脚に生じる作用荷重は、いくつかの特徴的な荷履歴で表すことが可能である。そこで、本実験では、図-2 に示す単調荷、完全除荷・完全再荷、部分除荷・完全再荷、完全除荷・部分再荷の 4 種類の荷履歴に基づき変位制御により荷重を作用させた。これは、任意の点から部分除荷、部分再荷した場合の履歴特性が与えられれば、ランダムな地震応答に対する応答解析に使用できると考えたためである。なお、ここでは一般のコンクリート理論に従い、引張領域は対象としていない。

### a) タイプ I 荷履歴

図-2 (a) に示すようにひずみを単調に増加させていく履歴である。これを単調荷履歴と呼ぶ。

### b) タイプ II 荷履歴

図-2 (b) に示すように応力度~ひずみ関係の包絡線から応力度が 0 になるまで除荷し、その後除荷を始めたひずみまで再荷する履歴である。以下、これを完全除荷・完全再荷履歴と呼ぶ。ここで、包絡線から初めて除荷し始める点のひずみを除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$ 、その時の応力度を 1 回目の除荷点応力度  $\sigma_{ul-1}$ 、除荷した後に応力度が 0 になった時のひずみを 1 回目の塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl-1}$  とそれぞれ定義する。 $\epsilon_{ul}$  まで再荷するとその時の応力度は  $\sigma_{ul-1}$  よりも小さい値となる。これを 2 回目の除荷点応力度  $\sigma_{ul-2}$  と呼ぶ。以下同様に  $n$  回繰り返した場合の  $n$  回

目の除荷点応力度  $\sigma_{ul-n}$ 、 $n$  回目の塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl-n}$  を定義する。

### c) タイプ III 荷履歴

タイプ II では完全除荷するのに対して、タイプ III では図-2 (c) に示すように除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から除荷を始め応力度が 0 になる前に再荷する。これを部分除荷・完全再荷履歴と呼ぶ。ここで、再荷する点のひずみを再荷点ひずみ  $\epsilon_{rl}$ 、その時の応力度を再荷点応力度  $\sigma_{rl}$  と呼ぶ。部分除荷・完全再荷を繰り返す場合には、同一の除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から除荷し、また、再荷点応力度  $\sigma_{rl}$  に達する度に再荷することとする。

また、部分除荷、完全再荷履歴では、どの程度部分除荷するかが重要なパラメータとなるため、これを表す指標として、再荷点応力度  $\sigma_{rl}$  と 1 回目除荷点応力度  $\sigma_{ul-1}$  をもとに部分除荷度  $\beta_{UL}$  を次式のように定義する。

$$\beta_{UL} = \frac{\sigma_{rl}}{\sigma_{ul-1}} \quad (1)$$

本実験では、 $0.1 \leq \beta_{UL} \leq 0.8$  を検討対象とすることとした。

### d) タイプ IV 荷履歴

図-2 (d) に示すように、まずある除荷点から応力度が 0 になるまで除荷し、そのあと再荷する過程で除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  に達する前に再び除荷する履歴である。これを、完全除荷・部分再荷履歴と呼ぶ。ここで、 $\epsilon_{ul}$  に達する前に再び除荷することを内部除荷と呼ぶ。この際の除荷点ひずみおよび除荷点応力度は包絡線からの除荷を含めると、2 回目の除荷に相当しており、それぞれ内部除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul-in}$ 、内部除荷点応力度  $\sigma_{in-2}$  と呼ぶ。タイプ IV の履歴は、この内部除荷点から応力度が 0 になる

まで除荷したあと、再び $\varepsilon_{ul-in}$ に達するまで載荷を繰り返すものである。ここで、包絡線から最初に完全除荷して応力度が0となる点は上述した1回目塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl-1}$ に相当する。その後、 $(\varepsilon_{ul-in}, \sigma_{in-2})$ まで再載荷して、ここから初めて内部除荷した後、応力度が再び0になる点は2回目塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl-2}$ となる。以下、同様に内部除荷を $n$ 回繰り返す場合の $n$ 回目の内部除荷に対して、内部除荷点応力度 $\sigma_{in-n+1}$ 、塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl-n+1}$ を定義する。

完全除荷・部分再載荷履歴では部分再載荷の程度が重要なパラメータとなるため、ここでは、次式のように部分再載荷度 $\gamma_{RL}$ を定義する。

$$\gamma_{RL} = \frac{\varepsilon_{ul-in} - \varepsilon_{pl-1}}{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl-1}} \quad (2)$$

本実験では、 $0.4 \leq \gamma_{RL} \leq 0.9$ を検討対象とすることとした。

実験には図-3に示す東京工業大学の5MN万能試験機を使用した。載荷速度は毎分0.5mmとした。ただし、供試体A-1のみ載荷速度を1mmとしている。当初は、従来の実験で用いられる事例の多い毎分1mmの載荷速度で実験を行う計画であったが、除荷、再載荷を含む載荷を行う場合には、除荷点ひずみをどのように決めるかが重要であり、載荷速度が大きいと除荷点ひずみの決定精度が低下するため、毎分0.5mmの載荷速度としたものである。荷重が偏心して作用しないように、供試体の上下端面と圧盤との空隙は石膏で埋めて両者を密着させた。

上記A~Eの5シリーズ供試体と載荷履歴の組合せは表-1に示す通りである。A~Cシリーズでは、単調載荷と完全除荷・完全再載荷履歴を対象とし、包絡線上から除荷する回数 $m$ やある除荷点ひずみにおいて完全除荷・完全再載荷を繰り返す回数 $n$ が応力度~ひずみ関係に与える影響を検討した。D、Eシリーズでは、完全除荷・完全再載荷履歴、部分除荷・完全再載荷履歴、完全除荷・部分再載荷履歴の応力度~ひずみ関係を検討するために、 $n$ や式(1)、(2)で定義した $\beta_{UL}$ 、 $\gamma_{RL}$ を変化させた。E-4は式(1)で定義した $\beta_{UL}=0.2$ として部分除荷、完全再載荷履歴を1回ずつ繰り返した。

なお、本実験では橋脚の耐震設計上は、0.03を超えるような大きなひずみ領域は一般には重要ではないことを考慮し、除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ は $0.0005 \leq \varepsilon_{ul} \leq 0.03$ の範囲で、次式のように与えることとした。

$$\varepsilon_{ul} \approx \frac{k}{4} \varepsilon_{cc} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon_{cc}$ は最大圧縮応力時のひずみ、 $m$ は上述した包絡線上から除荷する回数である。ただし、後述するようにCシリーズでは帯鉄筋比 $\rho_s$ が高いことからひず

みの増加とともに応力度が増加し続けるため、式(3)における $\varepsilon_{cc}$ はBシリーズと同じとした。

### (3) 計測

載荷時には、荷重、軸方向変位、帯鉄筋の周方向ひずみを計測した。供試体の応力度は作用荷重を初期断面積で割って、また供試体の軸方向ひずみは図-3に示すように供試体上下間で測定した変位を供試体の初期高さで割って、それぞれ算出した。実際には、供試体の両側で測定した相対変位には最大で0.5mmの差が生じた場合もあるが、ここではこれらの平均値から軸方向ひずみを求めた。また、上述したように供試体の上下端面と圧盤の空隙を石膏で埋めたが、これによりごくわずかな初期変位を生じる場合がある。しかし、これをひずみにするとせいぜい0.0004以下であり、ここでは、この影響を無視している。

荷重があるレベルに達すると、特定の領域に破壊が生じるようになる。したがって、供試体の軸方向ひずみを求める際には、どの区間の相対変位を測定するかが重要である。例えば、コンクリートが局所的に破壊した領域の長さをもとに軸方向ひずみを求める方法もあるが、破壊領域を実験前に判断することは困難である。仮にこれが可能だとしてもコンクリートの局所的な破壊が進行すれば、求められた応力度~ひずみ関係が不連続になる<sup>10)</sup>。このような点から、本実験では従来の研究に従い供試体に生じた変位を供試体の全高で割った値を軸方向ひずみとすることとした。

## 3. 完全除荷・完全再載荷した場合の応力度~ひずみ関係の特徴

### (1) 供試体の損傷状況

供試体を単調載荷していく(A-1, B-1, C-1)と、軸方向ひずみが0.003~0.007に達した段階で、コンクリート表面にひび割れが生じる。これは、最大圧縮応力度以降、応力度が減少するA-1, B-1供試体では最大圧縮応力度時のひずみ $\varepsilon_{cc}$ に、また、ひずみの増加につれて応力度が増加し続けるC-1供試体では軸方向ひずみの増加に伴う応力度の増加勾配が徐々に緩やかになるひずみにそれぞれ相当する。また、この段階に達すると、帯鉄筋のひずみは降伏ひずみを超える。さらに載荷すると、コンクリートが周方向にはらみ出すとともに軸方向鉄筋が徐々に座屈し始め、それに伴ってかぶりコンクリートが剥落する。帯鉄筋比 $\rho_s$ が0.67%の場合には、軸方向ひずみが0.01を超える段階に達するとコアコンクリートも徐々に剥落する。 $\rho_s=1.33\%$ 、 $2.67\%$ の場合には軸方向ひずみがそれぞれ0.015、0.02を超えるとコアコンクリート

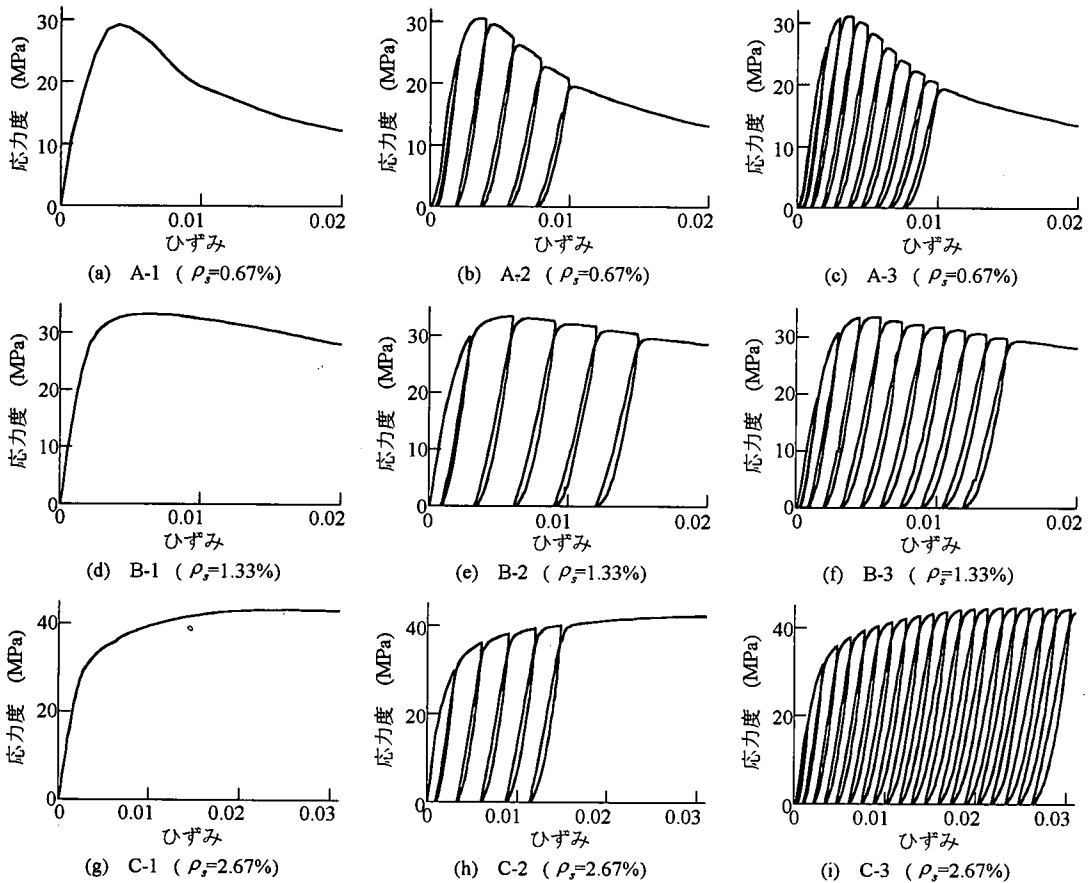


図4 単調荷重および完全除荷・完全再荷重を1回行った場合の応力度～ひずみ関係

が徐々に剥落し、最終的には帯鉄筋が破断する。これらの点は、既往の研究ですでに報告されているとおりである<sup>3),8),10)</sup>。

一方、完全除荷・完全再荷重を1回ずつ繰り返した場合 (A-2, B-2, C-2, A-3, B-3, C-3, D-1, E-1) にも、損傷の進展は上述の単調荷重した場合とそれほど変わらない。コンクリート表面にひび割れが発生していない段階では、除荷・再荷重してもこれによってひび割れが新たに発生することはない。また、供試体にひび割れ、かぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈などが生じた段階で除荷すると、コンクリートのかみ合わせが緩むためすでに圧壊していたコンクリート部分が剥落する場合もあるが、新たなひび割れの発生やすでに生じていたひび割れが進展することはない。この後、再荷重しても、除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  を超えるまでは供試体には外観上の変化は見られない。除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  を超えると、ひび割れの発生、コンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈など、新たな損傷が進む。

また、同じ除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から除荷・再荷重を複数回繰り返した場合 (A-4, B-4, C-4, D-2, D-3, D-4, E-2,

E-3) にも同様の傾向があり、同じ除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から完全除荷・完全再荷重を複数回繰り返しても、供試体の損傷に目立った変化はない。

## (2) 除荷回数 $m$ の影響

図4は、帯鉄筋比  $\rho_s$  を0.67, 1.33, 2.67%と変化させたA, B, Cシリーズの供試体に対して、単調荷重した場合 (A-1, B-1, C-1) と包絡線上のある点から完全除荷・完全再荷重した場合の応力度～ひずみ関係を示したものである。ここで、除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  は、式(3)において、 $m=2, 4, 6, 8, 10$  とし、計5回の除荷・再荷重を行った場合 (A-2, B-2, C-2),  $m=1, 2, \dots, 10$  とし、計10回の除荷・再荷重を行った場合 (A-3, B-3),  $m=1, 2, \dots, 20$  とし、計20回の除荷・再荷重を行った場合 (C-3) の3ケースがある。ただし、いずれの場合にも同一除荷点からの除荷・再荷重の回数は1回である。

帯鉄筋比  $\rho_s$  が0.67%, 1.33%と小さい場合には、単調荷重し、最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達した後、ひずみの増加とともに応力度は減少していく。帯鉄筋比  $\rho_s$  が2.67%と

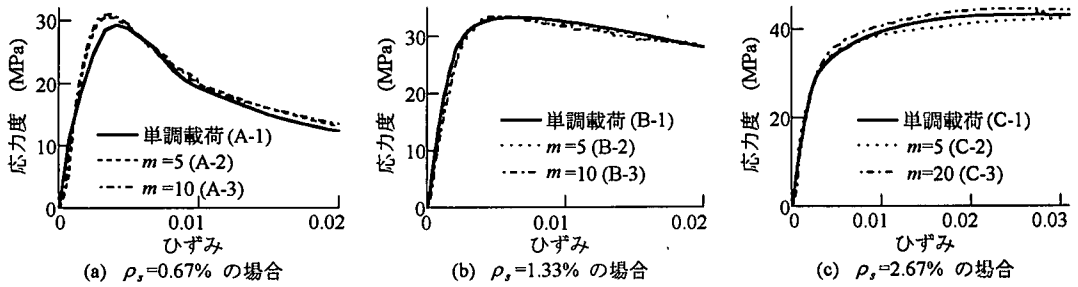


図-5 単調載荷した場合と完全除荷・完全再載荷した場合の応力度～ひずみ関係の包絡線の比較

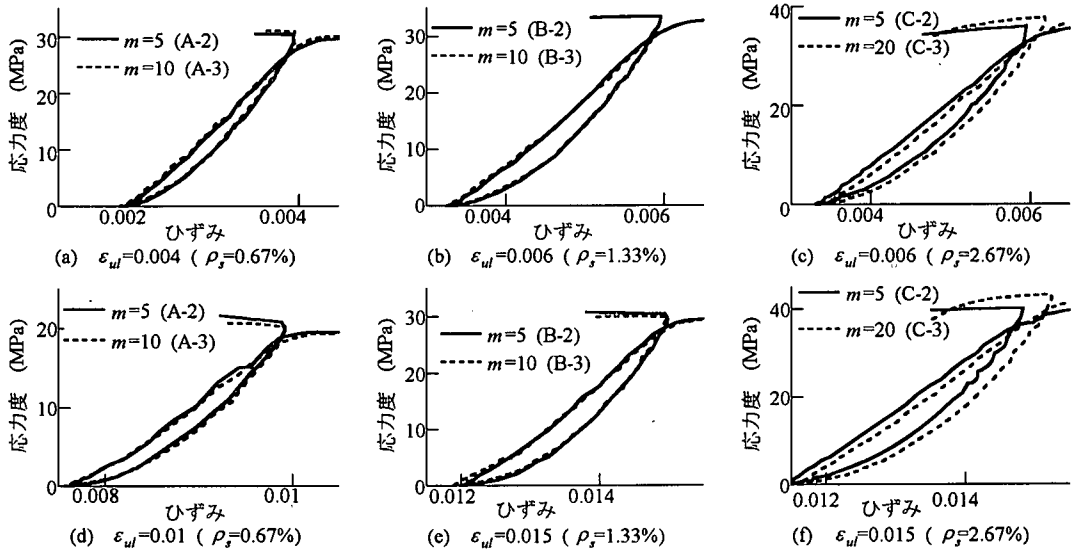


図-6 完全除荷・完全再載荷履歴に及ぼす除荷点ひずみ $\epsilon_{ul}$  および $m$ の影響

大きい場合にはひずみの増加とともに応力度は増加し続ける。

これに対して、包絡線上のある点から除荷する回数  $m=5$  とした A-2 の履歴を見ると、いずれの除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  で除荷した場合にも完全除荷した後再載荷して除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  に達した時の応力度  $\sigma_{ul,2}$  は初めて除荷した時の応力度  $\sigma_{ul,1}$  よりも小さいが、さらに再載荷を継続するとやがて単調載荷した場合の包絡線にもどることが分かる。このような特徴は、B-2 や C-2 でも同じであり、さらに  $m=10$  とした A-3、B-3、 $m=20$  とした C-3 でも同様である。このため、包絡線から除荷・再載荷途上の履歴は除いて、包絡線のみを単調載荷の場合と比較した結果が図-5 である。これによれば、除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  や包絡線からの除荷・再載荷を行う回数  $m$  に関わらず、応力度～ひずみ関係の包絡線はほとんど変わらないと見ることが出来る。

次に、除荷・再載荷過程の履歴がどのひずみ  $\epsilon_{ul}$  から除荷するか、また包絡線上から何回除荷、再載荷するかによってどのように変化するかを  $m=5, 10, 20$  の該当

するケースについて比較した結果が図-6 である。 $\rho_s=0.67\%$ 、 $1.33\%$  の場合には両者の履歴は非常によく一致している。 $\rho_s=2.67\%$  の場合には除荷点ひずみ自体が多少異なっているため、除荷の最初の段階から  $m=5$  の場合と  $m=20$  の場合の履歴には多少差が生じているが、全体的な傾向はよく一致している。したがって、上述した包絡線だけではなく、除荷・再載荷過程も含めて応力度～ひずみ関係は除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  や除荷・再載荷を行う回数  $m$  にほとんどよらないといえる。

### (3) 帯鉄筋比 $\rho_s$ およびコンクリート強度 $\sigma_{c0}$ の影響

帯鉄筋比  $\rho_s$  が増加すると、応力度～ひずみ関係において  $\sigma_{cc}$ 、 $\epsilon_{cc}$ 、 $E_{des}$  が大きくなることは既往の研究からも明らかにされているが、 $\rho_s$  が増加するとどのように除荷・再載荷履歴が異なるかを、 $\epsilon_{ul}=0.003, 0.006, 0.009$  とした場合を例に、 $\rho_s=0.67\%$  (A-3)、 $\rho_s=1.33\%$  (B-3)、 $\rho_s=2.67\%$  (C-3) の場合に対して比較した結果が図-7 である。 $\epsilon_{ul}=0.006$  を例にとると、おおむね同程度の  $\epsilon_{ul}$  で除荷しても、 $\rho_s$  を  $0.67\%$ 、 $1.33\%$ 、 $2.67\%$  と変

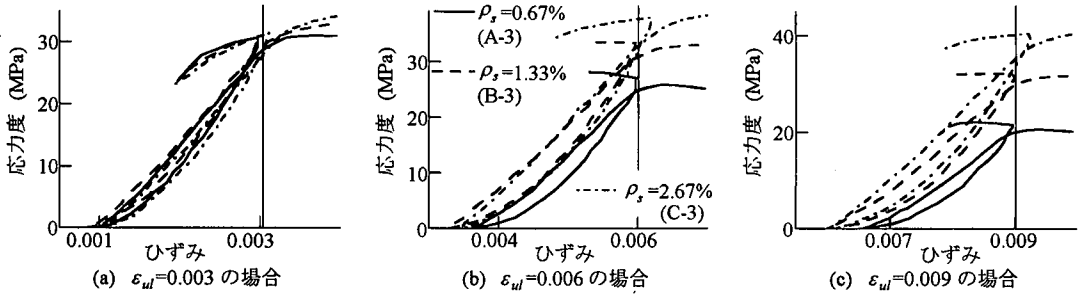


図-7 完全除荷・完全再載荷履歴に及ぼす帯鉄筋比  $\rho_s$  の影響

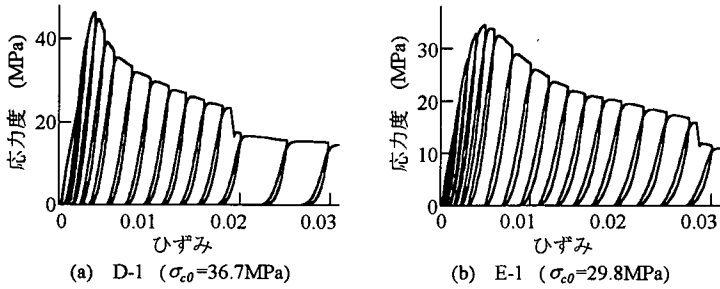


図-8 応力度～ひずみ関係に及ぼすコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  の影響

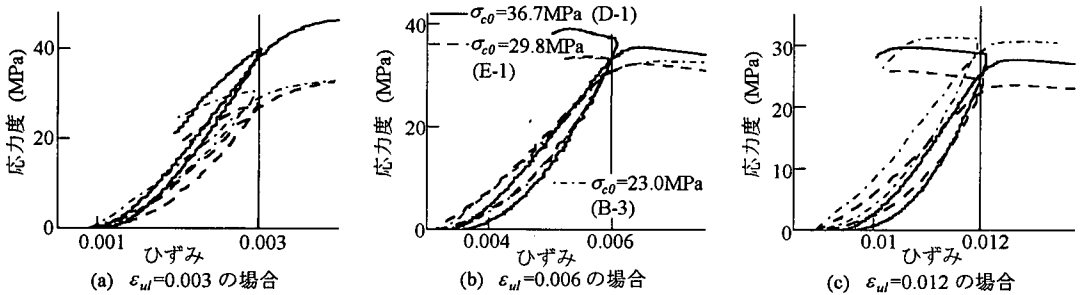


図-9 完全除荷・完全再載荷履歴に及ぼすコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  の影響

化させるにつれて  $\sigma_{ul-1}$  もそれぞれ 27.1MPa, 33.4MPa, 37.9MPa と異なるが、塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl-1}$  は 0.0032～0.0036 とあまり変化しない。

これに対して、 $\epsilon_{pl-1}$  から除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}=0.006$  まで再載荷した場合の  $\epsilon_{ul}$  における応力度  $\sigma_{ul-2}$  は、 $\rho_s$  を 0.67%, 1.33%, 2.67% と変化させるとそれぞれ 24.8MPa, 30.7MPa, 34.6MPa と増加する。

ここで、繰り返し除荷・再載荷を与えた場合に  $\epsilon_{ul}$  における応力度  $\sigma_{ul-n}$  が完全除荷・完全再載荷の繰り返しによってどの程度低下するかを評価するために、応力度低下率  $\beta_n$  を次式のように定義する。

$$\beta_n = \frac{\sigma_{ul-n+1}}{\sigma_{ul-n}} \quad (4)$$

$\beta_n$  を用いれば、例えば上述した  $\epsilon_{ul}=0.006$  で除荷した場合には、 $\rho_s$  が 0.67%, 1.33%, 2.67% と変化しても、 $\beta_1$

はそれぞれ 0.915, 0.919, 0.914 とほぼ同程度の値となる。

図-7 には  $\epsilon_{ul}=0.003, 0.009$  の場合も示しているが、 $\rho_s$  が 0.67%, 1.33%, 2.67% に相当する  $\epsilon_{pl-1}$  はそれぞれ 0.0008～0.001, 0.006～0.0066,  $\beta_1$  はそれぞれ 0.914～0.927, 0.922～0.933 であり、 $\epsilon_{ul}=0.006$  の場合と同様に  $\rho_s$  が変化しても  $\epsilon_{ul}$  が同じであれば  $\epsilon_{pl-1}$ ,  $\beta_1$  はおおむね同程度の値となる。

次にコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  が異なると完全除荷・完全再載荷を含む応力度～ひずみ関係がどのように変化するかを示した結果が図-8 である。この中から、 $\epsilon_{ul}=0.003, 0.006, 0.012$  とした場合を例に  $\sigma_{c0}=36.7\text{MPa}$  (D-1) の場合の履歴と  $\sigma_{c0}=29.8\text{MPa}$  (E-1) の場合の履歴を詳細に比較すると図-9 のようになる。図中には  $\sigma_{c0}=23.0\text{MPa}$  である B-3 も示している。B-3 の  $\rho_s$  は 1.33% と、D-1, E-1 ( $\rho_s=1.14\%$ ) に比べて大きいため、直接比較はできないがここでは参考のために示したものである。 $\epsilon_{ul} =$

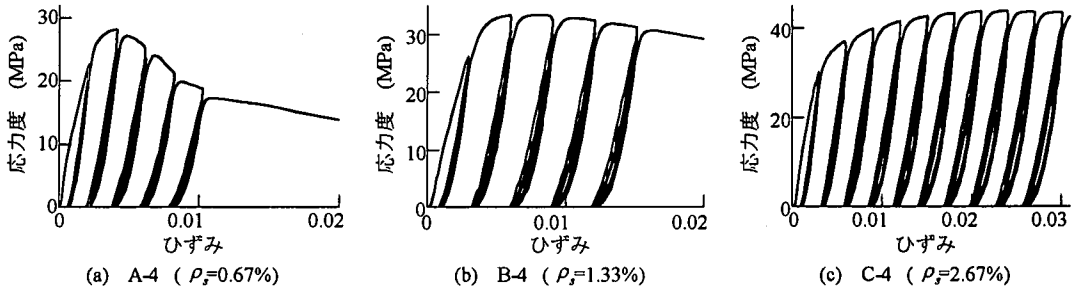


図-10 同一除荷点ひずみ $\epsilon_{ul}$ から完全除荷・完全再載荷を各3回繰り返した場合の応力度～ひずみ関係

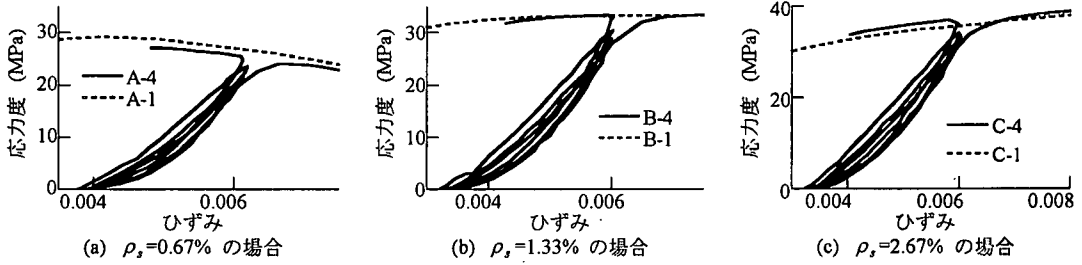


図-11 完全除荷・完全再載荷履歴に及ぼす $n$ の影響

0.003 の場合には、 $\sigma_{ul,1}$  は  $\sigma_{c0}=36.7\text{MPa}$  の場合には 40.7MPa、 $\sigma_{c0}=29.8\text{MPa}$  の場合には 27.9MPa と異なるが、 $\epsilon_{pl,1}$  はそれぞれ 0.0008、0.001 とほぼ同程度である。この点から  $\epsilon_{ul}=0.003$  まで再載荷した場合には、 $\sigma_{c0}$  が 36.7MPa、29.8MPa の場合の  $\sigma_{ul,2}$  はそれぞれ 38.7MPa、36.5MPa であり、式(4)より  $\beta_1$  を求めるとそれぞれ 0.951、0.95 とおおむね同程度の値となる。同様に  $\epsilon_{ul}=0.006$ 、0.012 の場合にも、 $\epsilon_{pl,1}$ 、 $\beta_1$  は  $\sigma_{c0}$  によってほとんど変わらない。さらに、 $\sigma_{c0}=23.0\text{MPa}$  の場合にも、 $\epsilon_{pl,1}$ 、 $\beta_1$  は他の 2 ケースの値とおおむね一致している。

以上より、 $\rho_s$  や  $\sigma_{c0}$  が異なっても、同じ除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から除荷する場合には、塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl,1}$  および再載荷過程での  $\beta_1$  はともにおおむね同程度の値となることができる。

#### (4) 同一除荷点からの除荷・再載荷の繰り返し回数 $n$ の影響

同一除荷点ひずみから複数回完全除荷・完全再載荷を繰り返した場合の例として、 $n=3$  まで繰り返した場合の結果を示すと図-10 のようになる。他の除荷点ひずみの場合も同様であるため、ここでは  $\epsilon_{ul}=0.006$  とした場合を例に完全除荷・完全再載荷を 3 回繰り返した場合の包絡線を単調載荷した場合の包絡線と比較すると図-11 のようになる。これより、図-5 に示した結果と同様に、 $n=3$  とした場合にも包絡線は単調載荷した場合の包絡線とよく一致することがわかる。なお、完全除荷・完全再載荷を繰り返すにつれて、塑性点ひずみは逐次  $\epsilon_{pl,n} > \epsilon_{pl,n-1}$  と大きくなり、再載荷後  $\epsilon_{ul}$  に達したとき

の応力度は  $\sigma_{ul,n} < \sigma_{ul,n-1}$  と小さくなるのが分かる。

以上は、同一除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から 3 回の完全除荷・完全再載荷を行った場合の結果であるが、完全除荷・完全再載荷の繰り返し回数をさらに増やした場合の応力度～ひずみ関係を示した結果が図-12 である。ここでは、完全除荷・完全再載荷、部分除荷・完全再載荷、完全除荷・部分再載荷を  $\epsilon_{ul}$  および繰り返し回数  $n$  をいろいろと変化させながら組み合わせて載荷した結果を示している。このうち  $\epsilon_{ul}=0.005$ 、0.008 として完全除荷・完全再載荷を 10 回繰り返した場合の履歴を 1 回だけ完全除荷・完全再載荷した場合の履歴と比較した結果が図-13 である。これより、繰り返し回数  $n$  が増加するにつれて除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  における応力度  $\sigma_{ul,n}$  は低下していくが、完全除荷・完全再載荷を繰り返した後に  $\epsilon_{ul}$  を超えてさらに再載荷していくと、 $n=1$ 、 $n=10$  ともにほぼ同じ包絡線にもどることが分かる。

以上より、同一の除荷点から複数回除荷・再載荷を繰り返しても、応力度～ひずみ関係の包絡線は単調載荷したり 1 回だけ除荷・再載荷した場合とほとんど変化しないといえることができる。

## 4. 完全除荷・完全再載荷履歴の定式化

### (1) 完全除荷・完全再載荷履歴のモデル化

図-4、図-8 に示した完全除荷・完全再載荷した場合の除荷・再載荷履歴をモデル化するためには、除荷点応力度  $\sigma_{ul,1}$  が異なることにより、その後の履歴が異なるという点を考慮しなければならない。そこで、除荷・再載荷



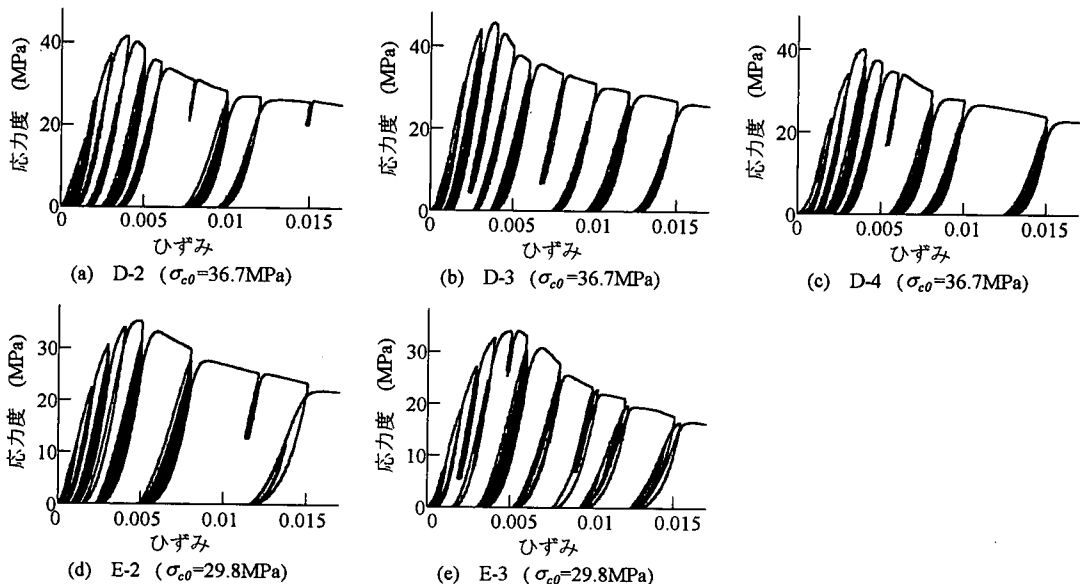


図-12 完全除荷・完全再載荷, 部分除荷・完全再載荷, 完全除荷・部分再載荷をいろいろと組み合わせて載荷した場合の応力度～ひずみ関係

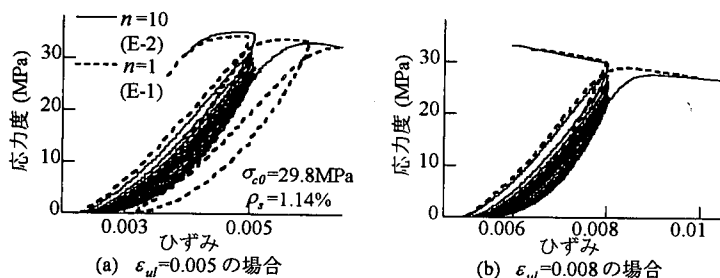


図-13 同一除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から完全除荷・完全再載荷を繰り返す回数  $n$  を 10 回とした場合と 1 回とした場合の比較

履歴を一般化するために、無次元化応力度  $\tilde{\sigma}$ 、無次元化ひずみ  $\tilde{\epsilon}$  を次式のように定義する。

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ul \cdot n}} \quad (5)$$

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\epsilon_c - \epsilon_{pl \cdot n}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl \cdot n}} \quad (6)$$

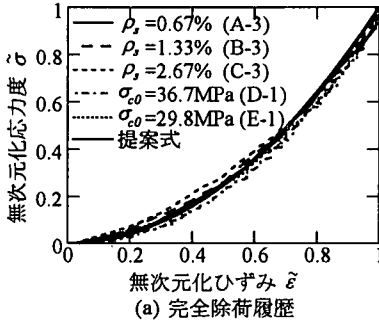
これより  $\tilde{\sigma} \sim \tilde{\epsilon}$  関係を図-7、図-9 に示した 5 体の供試体に対して  $\epsilon_{ul} = 0.006$  とした場合を例に示した結果 ( $n=1$  の場合) が図-14 である。図中には後述する提案式による計算値も比較のために示している。これによれば帯鉄筋比  $\rho_s$  およびコンクリート強度  $\sigma_{c0}$  が変化しても、無次元化した  $\tilde{\sigma} \sim \tilde{\epsilon}$  関係はほとんど変化しないことが分かる。これは、他の除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  で完全除荷・完全再載荷した場合にも同様であり、例えば完全除荷・完全再載荷を各除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  で 1 回ずつ行った E-1 を例として  $\epsilon_{ul}$  をいろいろ変化させた場合の  $\tilde{\sigma} \sim \tilde{\epsilon}$  関係

を示すと図-15 のようになる。ここでも、後述する提案式による計算値を比較のために示している。これより、 $\epsilon_{ul}$  が変化しても  $\tilde{\sigma} \sim \tilde{\epsilon}$  関係はほとんど変化しないことが分かる。

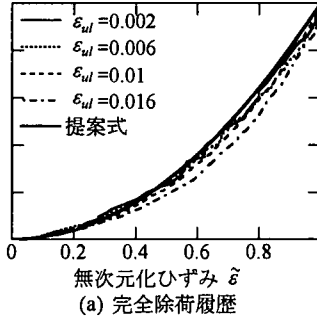
以上は完全除荷・完全再載荷を 1 回だけ行った場合 ( $n=1$ ) の結果であるが、これを  $n$  回繰り返した場合に  $\tilde{\sigma} \sim \tilde{\epsilon}$  関係がどのようになるかを図-13 に示した結果の中から  $\epsilon_{ul} = 0.005$  において完全除荷・完全再載荷を 10 回繰り返したケースに対して示した結果が図-16 である。

これより、同一除荷点ひずみにおいて完全除荷・完全再載荷を繰り返しても、 $\tilde{\sigma} \sim \tilde{\epsilon}$  関係はほとんど変化しない。

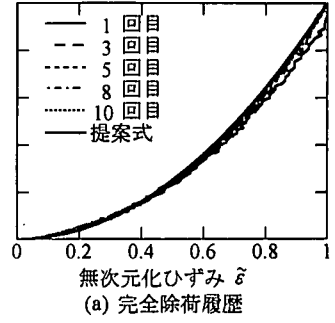
このように除荷・再載荷のいずれにおいても  $\tilde{\sigma} \sim \tilde{\epsilon}$  関係は  $\rho_s$ 、 $\sigma_{c0}$ 、 $\epsilon_{ul}$ 、 $n$  によってほとんど変化しないと見ることができる。このため、ここでは除荷履歴および再載荷履歴の応力度  $\sigma_c \sim$  ひずみ  $\epsilon_c$  関係を次のように近似する。



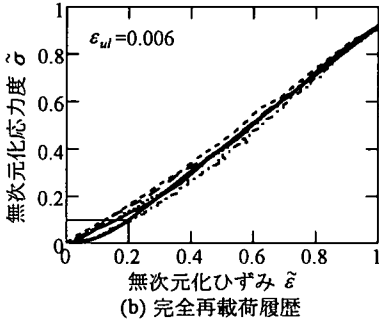
(a) 完全除荷履歴



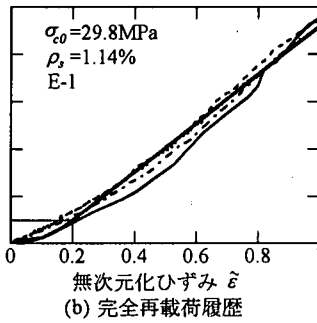
(a) 完全除荷履歴



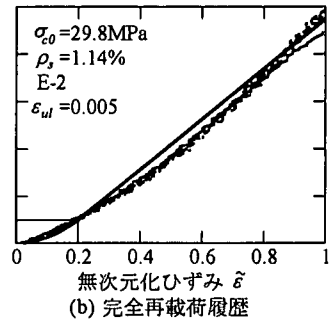
(a) 完全除荷履歴



(b) 完全再載荷履歴



(b) 完全再載荷履歴



(b) 完全再載荷履歴

図-14  $\sigma_{c0}$  および  $\rho_s$  を変化させた場合の  $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}$  関係

図-15  $\epsilon_{ul}$  を変化させた場合の  $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}$  関係

図-16 除荷、再載荷を繰り返す場合の  $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}$  関係

#### 除荷履歴

$$\sigma_c = \sigma_{ul,n} \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_{pl,n}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl,n}} \right)^2 \quad (7)$$

#### 再載荷履歴

$$\sigma_c = \begin{cases} 2.5\sigma_{ul,n} \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_{pl,n}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl,n}} \right)^2 & 0 \leq \bar{\epsilon} < 0.2 \\ E_{rl}(\epsilon_c - \epsilon_{ul}) + \sigma_{ul,n+1} & 0.2 \leq \bar{\epsilon} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $E_{rl}$  は  $0.2 \leq \bar{\epsilon} \leq 1$  における再載荷履歴の平均弾性係数であり、次式により与えられる。

$$E_{rl} = \frac{\sigma_{ul,n+1} - 0.1\sigma_{ul,n}}{0.8(\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl,n})} \quad (9)$$

図-14, 15, 16 中の実線は式(7)および式(8)によって求めた  $\sigma_c \sim \epsilon_c$  関係を  $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}$  関係として示した結果である。簡単のため 2 次関数と直線でモデル化したため、実験結果よりやや大きめの値となる場合もあるが、いずれも実験値との対応がよいことが分かる。

#### (2) 塑性点ひずみ $\epsilon_{pl,1}$ および応力度低下率 $\beta_1$ の推定法

以上より、完全除荷・完全再載荷する場合の履歴形状が求められたが、任意の除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から完全除荷した場合の履歴を定めるためには、塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl,1}$  および式(4)により定義した応力度低下率  $\beta_1$  を求めなければならない。

$\epsilon_{ul}$  と  $\epsilon_{pl,1}$  の関係に関しては、現在までもいろいろな研究が行われており、除荷時に向かうべきひずみ  $\epsilon_a$  を与えることにより、例えば滝口らはプレーンコンクリートを対象に<sup>18)</sup>、また Mander らは帯鉄筋で横拘束されたコンクリートにまで対象を広げて<sup>7)</sup>、 $\epsilon_{pl,1}$  を求めるようにしている。また、Maekawa らはプレーンコンクリートを対象に 2 次元 (平面) 応力状態を考慮し、最大応力度時のひずみ  $\epsilon_{cc}$  によって正規化した等価ひずみを用いて、等価最大全ひずみと等価塑性ひずみの関係には載荷速度に応じてある相関があることを指摘している<sup>19), 20)</sup>。ここでは、こうした研究を基本に  $\epsilon_{ul}$  と  $\epsilon_{pl,1}$  の関係を求めることとし、 $\epsilon_{ul}$  を変化させると  $\epsilon_{pl,1}$  はどのように変化するかを示した結果が図-17 である。ここでは、図-4, 図-8 に示した完全除荷・完全再載荷した場合の結果の他、図-10 に示した完全除荷・完全再載荷を 3 回繰り返した履歴の中から 1 回目の除荷・再載荷の結果、図-12 に示したいろいろな除荷・再載荷を組み合わせさせた供試体のうち 1 回目の完全除荷・完全再載荷の結果を示している。また、比較のため、後述する提案式による計算値と同時に Mander らによる提案モデル (以下、Mander モデルと呼ぶ)、Ristic らによる提案モデル (以下、Ristic モデルと呼ぶ) を  $\rho_s = 0.67\%$  の場合を対象に示している。ここで、Mander モデルでは、塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl,1}$  は  $\epsilon_{ul}$  と  $\sigma_{ul,1}$  の関数として与えられるため、個々の除荷点 ( $\epsilon_{ul,1}$ ,  $\sigma_{ul,1}$ ) に対して  $\epsilon_{pl,1}$  を求めた値を示している。

図-17 (a) によれば、本実験で対象とする  $0.0005 \leq \epsilon_{ul} \leq$

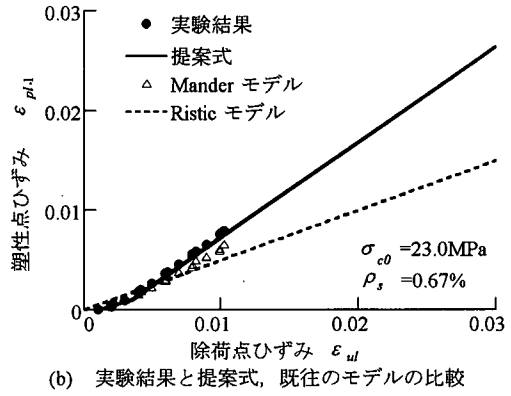
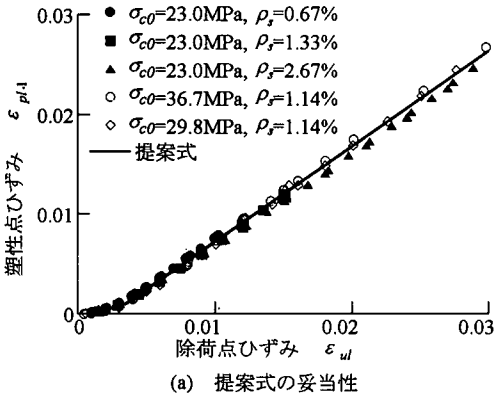


図-17  $\epsilon_{ul} \sim \epsilon_{pl,1}$  の関係

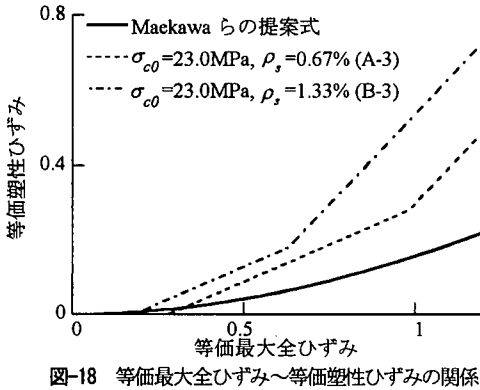


図-18 等価最大全ひずみ～等価塑性ひずみの関係

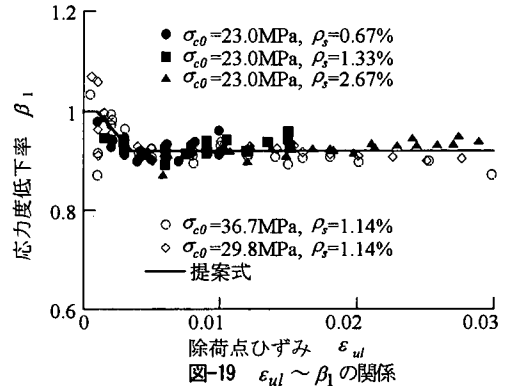


図-19  $\epsilon_{ul} \sim \beta_1$  の関係

0.03 の範囲では  $\epsilon_{ul}$  と  $\epsilon_{pl,1}$  はほぼ線形関係にある。ただし、 $\epsilon_{ul} \leq 0.001$  では  $\epsilon_{pl,1} \approx 0$  であり、また  $\epsilon_{ul} \approx 0.0035$  を境として、その前後で  $\epsilon_{ul} \sim \epsilon_{pl,1}$  関係の勾配が変化する。これは、 $\epsilon_{ul} \leq 0.001$  ではコンクリートにはひびわれなどの損傷がほとんど生じていないため弾性的な挙動を示すが、除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  が大きくなるとコンクリートが圧壊し、非弾性的な挙動を示すようになるためと考えられる。このような特性を表すため、図-17 に示した  $\epsilon_{ul} \sim \epsilon_{pl,1}$  の関係を以下のように与える。

$$\epsilon_{pl,1} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \epsilon_{ul} \leq 0.001 \\ 0.4(\epsilon_{ul} - 0.001) & 0.001 < \epsilon_{ul} < 0.0035 \\ 0.96(\epsilon_{ul} - 0.00245) & 0.0035 \leq \epsilon_{ul} \leq 0.03 \end{cases} \quad (10)$$

図-17 には式(10)による計算値も示しているが、これによれば式(10)は実験結果の特徴をよく表している。一方、Mander モデルでは、帯鉄筋比  $\rho_s$  が 0.67% と小さい場合には、 $0.005 \leq \epsilon_{ul} \leq 0.01$  の範囲で実験結果を小さめに評価する。これは、Mander モデルが帯鉄筋比  $\rho_s \geq 2\%$  と大きい場合を対象としたためであると考えられる。Ristic モデルでは、塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl}$  は除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  の 50% とされているため、 $\epsilon_{ul} \geq 0.005$  の範囲では実験結果を過小評価する。

なお、以上のような  $\epsilon_{ul}$  と  $\epsilon_{pl,1}$  の関係を A-3、B-3 を例として、Maekawa らがブレンコンクリートに対して求めた等価最大全ひずみ～等価塑性ひずみの関係に整理し直して、Maekawa らによる提案式と比較すると図-18 のようになる。Maekawa らの提案式ではコンクリートを 2 次元にモデル化しているため等価最大全ひずみと等価塑性ひずみを求めるためには、軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  の他にこれとは直角方向のコンクリートひずみ  $\epsilon_{c,t}$  を与える必要がある。上述したように、載荷実験では供試体の軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  が  $\epsilon_{cc}$  に達するときに帯鉄筋はほぼ降伏ひずみ ( $\approx 0.002$ ) に達するため、供試体には軸直角方向に  $\epsilon_{c,t1} = \epsilon_{c,t2} \approx 0.002$  のひずみが生じていると考えることができる。このような 3 次元状態を Maekawa らのように平面応力状態で与えることはできないが、ここでは、 $\epsilon_{c,t1}/\epsilon_{cc} = 0.5$  (A-3)、0.35 (B-3) と仮定して等価最大全ひずみ～等価塑性ひずみの関係を求めた結果を示している。これによれば、帯鉄筋比  $\rho_s$  が大きくなると Maekawa らの提案式に比べて本提案式は等価塑性ひずみを大きく与えている。これには、Maekawa らは、基本的に  $\epsilon_{cc}$  で正規化した  $\epsilon_{ul}/\epsilon_{cc} \sim \epsilon_{pl,1}/\epsilon_{cc}$  の間にある相関関係があると見なしているのに対して、本研究では  $\epsilon_{ul}$  と  $\epsilon_{pl,1}$  の間に式(10)の関係があるとしている点が異なること、ま

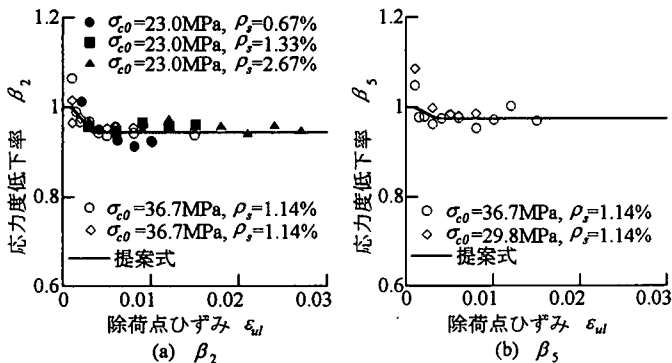


図-20  $\beta_n$  の  $\epsilon_{ul}$  依存性 ( $n=2, 5$  の場合)

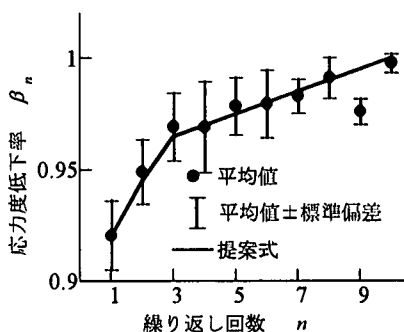


図-21 繰返し回数  $n$  に対する  $\beta_n$  の関係

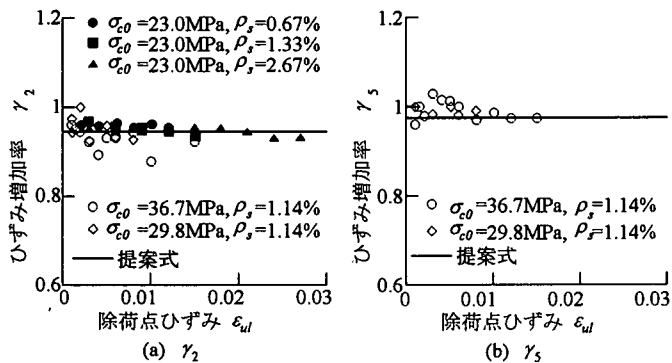


図-22  $\gamma_n$  の  $\epsilon_{ul}$  依存性 ( $n=2, 5$  の場合)

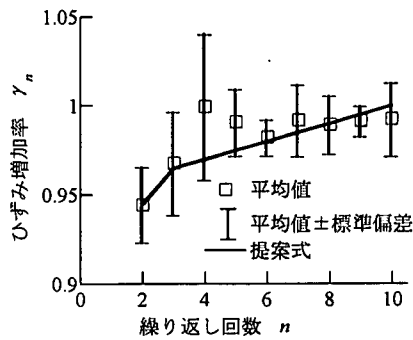


図-23 繰返し回数  $n$  に対する  $\gamma_n$  の関係

た Maekawa らは平面応力状態を仮定しているのに対し、本研究では 3 次元応力状態となっていることが原因と考えられる。前者に関しては、実橋脚における拘束されたコアコンクリートの応力状態に伴う重要な点であるが、これについては今後の検討にゆだねることとし、ここでは、Maekawa らによる提案式と本提案式には図-18 の違いがあることを指摘するにとどめる。

次に、式(4)で定義した  $\beta_1$  が  $\epsilon_{ul}$  によってどのように変化するかを上記と同じ完全除荷・完全再載荷履歴に対して求めた結果が図-19 である。これによれば、 $\epsilon_{ul} \geq 0.0035$  の範囲では  $\beta_1$  はおおむね 0.92 であるが、 $\epsilon_{ul} < 0.0035$  では、 $\epsilon_{ul}$  が小さくなるにつれて、 $\beta_1$  は 1 に近づいていく。ここでは、 $\epsilon_{ul} < 0.0035$  の範囲の変化を考慮に入れ、これを次式のようにモデル化する。

$$\beta_1 = \begin{cases} 1 & 0 \leq \epsilon_{ul} \leq 0.001 \\ 1 - 32(\epsilon_{ul} - 0.001) & 0.001 < \epsilon_{ul} < 0.0035 \\ 0.92 & 0.0035 \leq \epsilon_{ul} \leq 0.03 \end{cases} \quad (11)$$

### (3) 完全除荷・完全再載荷を繰返しした場合の影響

以上は、同一の除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から完全除荷・完全再載荷履歴を 1 回行った場合 ( $n=1$ ) に対する検討結果

であるが、これを複数回繰返しした場合の例として図-13 (a) に示した  $\epsilon_{ul}=0.005$  から完全除荷・完全再載荷を 10 回繰返しした履歴を検討する。最初の除荷点応力は  $\sigma_{ul,1}=35.1\text{MPa}$  であり、ここから除荷した 1 回目の塑性点ひずみは  $\epsilon_{pl,1}=0.00228$  である。この後再載荷し、このような完全除荷・完全再載荷を 10 回繰返ししたあとには、 $\epsilon_{pl,10}$  は 0.00262 に増加し  $\sigma_{ul,11}$  は 26.2MPa に低下する。ただし、前述したように繰返し回数  $n$  が増加するにつれて、1 回の完全除荷・完全再載荷に伴う  $\epsilon_{pl,n}$  の増加の度合いおよび  $\sigma_{ul,n}$  の低下の度合いはいずれも減少していく。

図-20 は、 $\beta_n$  が除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  によってどのように変化するかを  $n=2, 5$  の場合を例に示した結果である。これによれば、 $\beta_n$  ( $n=2, 5$ ) は  $\epsilon_{ul} \geq 0.0035$  では  $\epsilon_{ul}$  によらずほぼ一定値をとり、 $\epsilon_{ul} \approx 0.0035$  で勾配が変化する等、図-19 に示した  $n=1$  の場合とよく似た特性を示す。このため  $\epsilon_{ul} \geq 0.0035$  の範囲での平均値を求め、これが  $n$  によってどのように変化するかを示した結果が図-21 である。図中には後述する提案式による計算値も比較のために示している。これによれば、 $\beta_n$  の値には多少ばらつきがあるが、 $n$  が増加すると  $\beta_n$  も増加し、その増加率は  $n$  が増加するにつれて緩やかになることが分かる。以上より、 $\beta_n$  を次式で与えることとする。

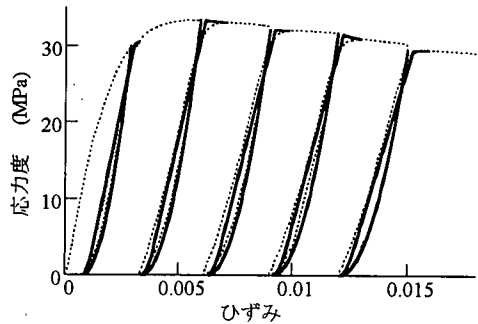
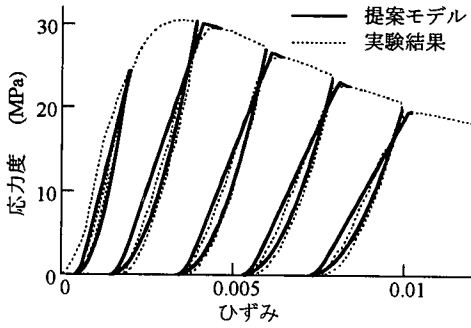


図-24  $n=1$  の場合の完全除荷・完全再載荷履歴の実験結果と提案モデルの比較

$1 \leq n \leq 2$  の場合

$$\beta_n = \begin{cases} 1 & 0 \leq \varepsilon_{ul} \leq 0.001 \\ 1 - (10n + 22)(\varepsilon_{ul} - 0.001) & 0.001 < \varepsilon_{ul} < 0.0035 \\ 0.92 + 0.025(n - 1) & 0.0035 \leq \varepsilon_{ul} \leq 0.03 \end{cases} \quad (12)$$

$n \geq 3$  の場合

$$\beta_n = \begin{cases} 1 & 0 \leq \varepsilon_{ul} \leq 0.001 \\ 1 - (2n + 8)(\varepsilon_{ul} - 0.001) & 0.001 < \varepsilon_{ul} < 0.0035 \\ 0.965 + 0.005(n - 3) & 0.0035 \leq \varepsilon_{ul} \leq 0.03 \end{cases} \quad (13)$$

ただし、 $\beta_n \leq 1$  である。式(12)、(13)による  $0.0035 \leq \varepsilon_{ul} \leq 0.03$  の範囲の  $\beta_n$  が図-21 の実線である。計算値は実験結果の特徴をよく表している。

次に、完全除荷・完全再載荷を繰り返すことにより、 $\varepsilon_{pl,n}$  がどのように増加していくかを表すために、 $n$  回目のひずみ増加率  $\gamma_n$  を次式のように定義する。

$$\gamma_n = \frac{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl,n}}{\varepsilon_{ul} - \varepsilon_{pl,n-1}} \quad (14)$$

式(14)による  $\gamma_n$  が除荷点ひずみ  $\varepsilon_{ul}$  によってどのように変化するかを示した結果が図-22 である。その他の場合にも同様な特徴を示すことから、ここでは除荷・再載荷の繰り返し回数を  $n=2, 5$  とした場合の結果を示している。これによれば、 $\gamma_n$  はほぼ一定であり、この範囲で  $\gamma_n$  の平均を求め、これが繰り返し回数  $n$  によってどのように変化するかを示した結果が図-23 である。図中には後述する提案式による計算値も比較のために示している。これより、 $\gamma_n$  にはばらつきがあるが、 $n$  が増加すると  $\gamma_n$  も増加する傾向にある。これをここでは次式のように与えることとする。

$$\gamma_n = \begin{cases} 0.945 & n = 2 \\ 0.965 + 0.005(n - 3) & n \geq 3 \end{cases} \quad (15)$$

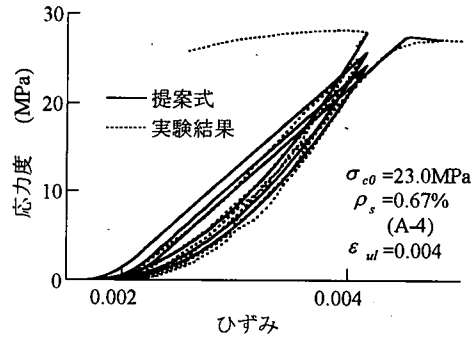


図-25 同一除荷点ひずみ  $\varepsilon_{ul}$  から3回完全除荷・完全再載荷した場合の実験結果と提案モデルの比較

ただし、 $\gamma_n \leq 1$  である。式(15)による計算値が図-23 中の実線であり、実験結果の傾向をおおむね表している。

#### (4) 完全除荷・完全再載荷履歴の提案モデルの妥当性

以上に示した完全除荷・完全再載荷した場合の応力度～ひずみ関係の提案式を実験値と比較した一例を図-24 に示す。ただし、本研究では包絡線に関しては現在までに各種の研究があることから、除荷・再載荷履歴のモデル化を対象としている。このためここでは包絡線には実験結果を用い、ある除荷点ひずみ  $\varepsilon_{ul}$  で除荷し始めてから、再載荷により再び包絡線にもどるまでの過程だけの比較を示している。これによれば、いずれの除荷点ひずみ  $\varepsilon_{ul}$  から除荷した場合にも、塑性点ひずみ  $\varepsilon_{pl,1}$ 、2 回目の除荷点応力度  $\sigma_{ul,2}$  は精度よく推定できており、除荷・再載荷の履歴曲線もよく一致していることがわかる。

図-25 には、同一除荷点ひずみ  $\varepsilon_{ul}$  から複数回完全除荷・完全再載荷を繰り返した場合に対する提案モデルの適用性を、 $n=3$  を例として示している：3回完全除荷・完全再載荷を繰り返した後の4回目の除荷点応力度  $\sigma_{ul,4}$  は、実験では 23.3MPa であるのに対して提案モデルでは 23.5MPa と、よく推定できている。また、図-26 は図-13 (a) に示した 10 回完全除荷・完全再載荷履歴を

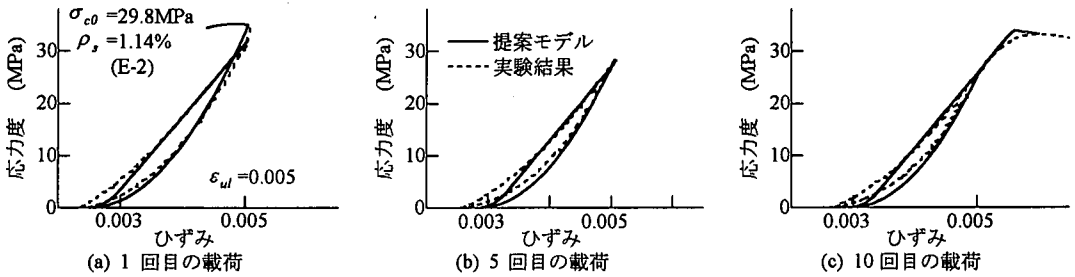


図-26  $n=10$ とした場合の1, 5, 10回目の履歴の実験結果と提案モデルの比較

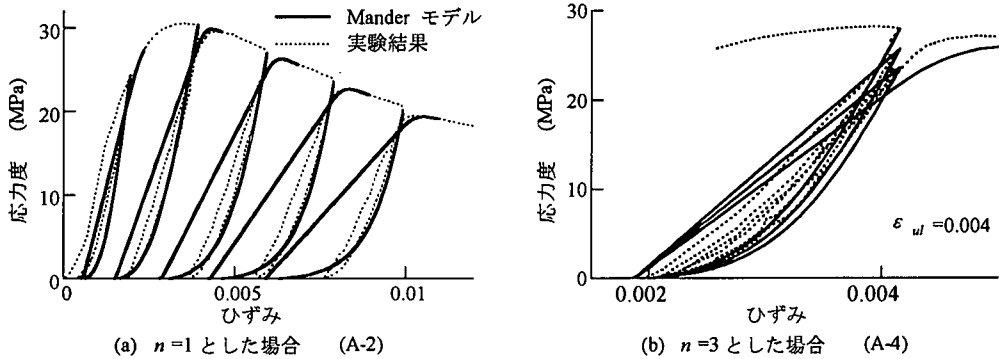


図-27 Manderモデルによる完全除荷・完全再載荷の応力度～ひずみ関係

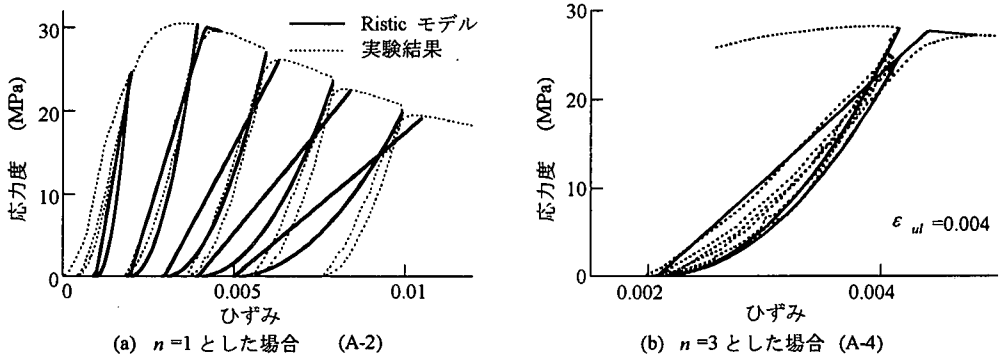


図-28 Risticモデルによる完全除荷・完全再載荷の応力度～ひずみ関係

繰り返した履歴に対する実験結果と提案モデルの比較を1回目、5回目、10回目の履歴に分けて示した結果である。いずれの場合にも提案モデルは実験値の特徴をよく表していると言することができる。なお、10回完全除荷・完全再載荷を繰り返した後の11回目の除荷点応力度 $\sigma_{ul,11}$ は、実験では26.2MPaであるのに対して提案モデルでは26.5MPaと、よく推定できている。

図-27, 28は図-24 (a), 25に示した比較をManderモデルとRisticモデルを用いて試算、比較したものである。ただし、前述したようにManderモデルの再載荷履歴においては除荷点ひずみ $\epsilon_{ul}$ から包絡線までの2次関数には誤りがあることがDoddらによって指摘、修正されているため、この過程にはDoddらの提案した3次関数を

用いている。また、ここでも除荷、再載荷履歴だけ比較することとし、包絡線としては実験値を用いている。これよりManderモデル、Risticモデルはともに除荷点ひずみ $\epsilon_{ul}$ が大きいかほど塑性点ひずみ $\epsilon_{pl,1}$ を過小評価し、再載荷履歴の平均弾性係数を過小評価していることがわかる。また、Manderモデル、Risticモデルともにもともと複数回繰り返して載荷することを考慮していないため、繰り返し回数が増加するにつれて $\sigma_{ul,n}$ の推定精度は低下している。

以上より、本提案モデルは既存のManderモデルやRisticモデルと比較して、除荷点ひずみ $\epsilon_{ul}$ が $2\epsilon_{cc}$ を上回るような大きなひずみからの完全除荷・完全再載荷の履歴を精度よく表していること、また同一除荷点ひずみ

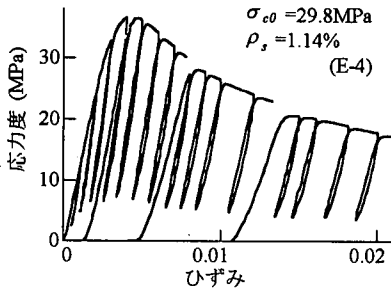


図-29 部分除荷・完全再載荷の応力度～ひずみ関係

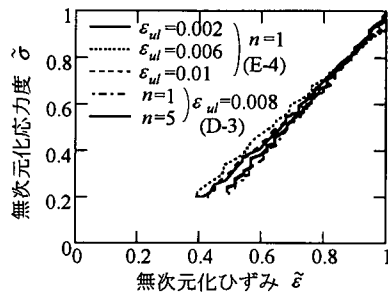


図-30 部分除荷後の再載荷履歴の $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}$  関係

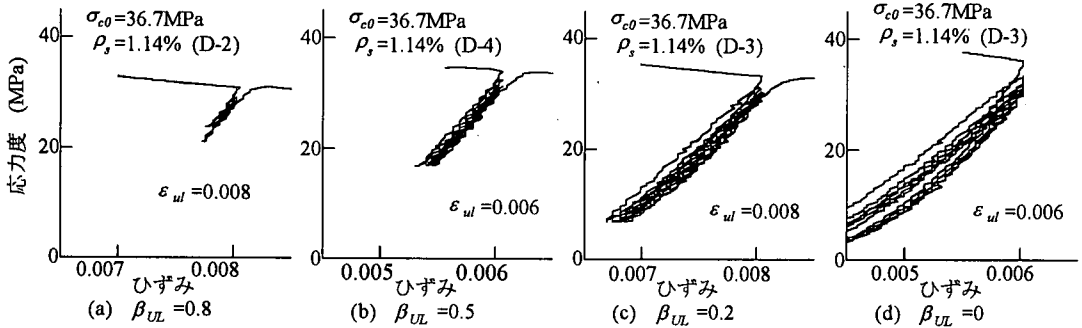


図-31 部分除荷・完全再載荷履歴の例

$\epsilon_{ul}$  から複数回完全除荷・完全再載荷を繰り返す場合の応力度低下の特徴をよく表していることが分かる。

## 5. 部分除荷・完全再載荷履歴の定式化

### (1) 部分除荷, 完全再載荷のモデル化

以上は、完全除荷・完全再載荷する場合の履歴のモデル化であるが、ここでは部分除荷・完全再載荷履歴をモデル化する。部分除荷・完全再載荷では、除荷過程において応力度が0になる前に再載荷するが、これは上述した完全除荷・完全再載荷の除荷過程において途中から再載荷するだけであることから、除荷履歴は、式(10)から求められる  $\epsilon_{pl-1}$  と式(7)で表される2次関数により与えることができる。したがって、部分除荷・完全再載荷においては、除荷履歴上のある任意のひずみ  $\epsilon_{rl}$ 、応力度  $\sigma_{rl}$  からの完全再載荷した場合のモデル化が必要である。

図-29 は式(1)の部分除荷度  $\beta_{UL}$  を0.2としていろいろな除荷点ひずみ  $\epsilon_{ul}$  から1回づつ部分除荷、完全再載荷を行った場合の応力度～ひずみ関係を示したものである。完全除荷・完全再載荷した場合の損傷の進展については前述したとおりであるが、部分除荷・完全再載荷した場合にも同様の傾向があり、ある除荷点から部分除荷・完全再載荷した場合にも供試体の損傷の進展はない。

図-29 を例として、式(5)、(6)で定義した  $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}$  を用いて、部分除荷後の再載荷履歴を示すと図-30 のようになる。また、図中には複数回除荷および再載荷を繰り返す

場合の例として後述する図-31 (c)に示す履歴の1回目および5回目の履歴に相当する  $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}$  関係も示している。ここで、 $\epsilon_{pl-1}$  は前述した式(10)により求めている。これによれば、無次元化応力度  $\bar{\sigma}$  は再載荷後の無次元化ひずみ  $\bar{\epsilon}$  におおむね比例して増加する。これは、図-14、15、16に示した完全除荷後の再載荷履歴と似ているが完全除荷の場合のように  $\bar{\sigma} \sim \bar{\epsilon}$  関係が2次関数で近似される  $\bar{\epsilon}$  の小さい範囲は部分除荷では重要ではない。この点を考慮して式(8)と同じように、部分除荷後の再載荷履歴の応力度～ひずみ関係を以下のようにモデル化する。

$$\sigma_c = E_{prl}(\epsilon_c - \epsilon_{ul}) + \sigma_{ul-n+1} \quad (16)$$

ここで、 $E_{prl}$  は部分除荷後の再載荷履歴における平均弾性係数で次式で与えられる。

$$E_{prl} = \frac{\sigma_{ul-n+1} - \sigma_{rl}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{rl}} \quad (17)$$

ここで、 $\sigma_{rl}$ 、 $\epsilon_{rl}$  はそれぞれ再載荷点応力度、再載荷点ひずみである。

### (2) 部分除荷後の完全再載荷履歴における応力度低下率の推定法

式(1)で定義した部分除荷度  $\beta_{UL}$  を0.8、0.5、0.2と変化させて部分除荷、完全再載荷を5回繰り返した場合の履歴を図-12に示した応力度～ひずみ関係から示すと図-31 のようになる。ここでは、比較のために完全除荷、完

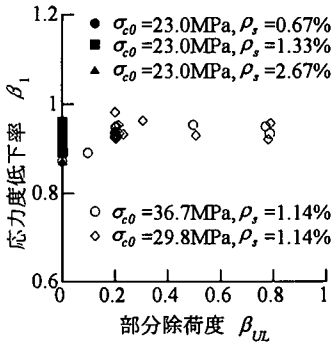


図-32  $\beta_{UL} \sim \beta_1$  の関係

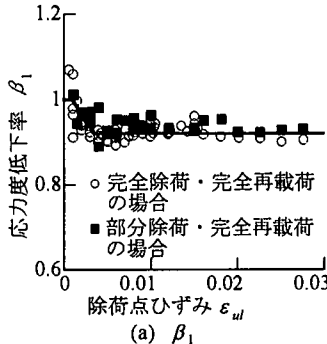


図-33 完全除荷後に再載荷した場合の  $\beta_n$  と部分除荷後に再載荷した場合の  $\beta_n$  の比較 ( $n=1, 5$  の場合)

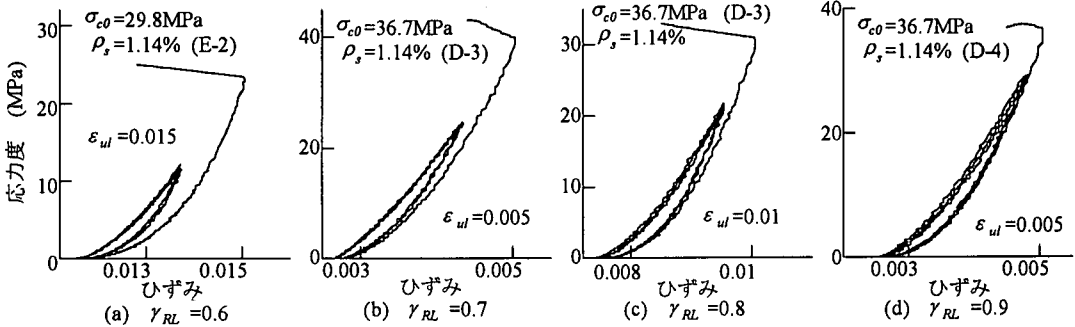
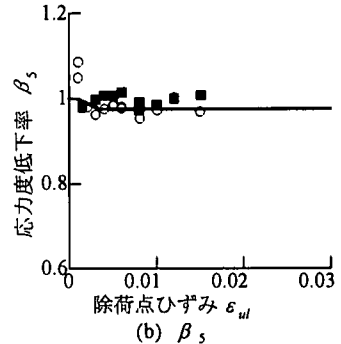


図-34 完全除荷・部分再載荷履歴の例

全再載荷した場合の履歴 ( $\beta_{UL}=0$ ) も併せて示している。これによれば、いずれの  $\beta_{UL}$  でも再載荷後  $\epsilon_{ul}$  に達したときの応力度  $\sigma_{ul,n+1}$  は除荷した時の応力度  $\sigma_{ul,n}$  よりも小さくなっていることが分かる。ここで、 $\beta_{UL}$  によって応力度低下率  $\beta_n$  がどのように変化するかを  $\beta_1$  を例として示した結果が図-32である。ここで、 $\beta_{UL}=0$  は完全除荷する場合に相当し、図-19 に示した結果を比較のために示している。また、 $\beta_{UL}=1$  は全く除荷しない状態に相当するため、原理的に  $\beta_1=1$  となる。図-32によれば、多少ばらつきがあるが、 $\beta_1$  の平均値は  $\beta_{UL}$  によって有意に変化せず、ほぼ同程度の値となる。

そこで、図-19, 20 に示した  $\epsilon_{ul} \sim \beta_n$  ( $n=1,5$ ) 関係を部分除荷・完全再載荷履歴に対しても求めた結果が図-33である。ここで、比較のために図-19, 20 の結果も示している。これによれば、部分除荷後に完全再載荷した場合の  $\beta_n$  は完全除荷後に完全再載荷した場合の  $\beta_n$  と比べて大きめの値を示す傾向はあるがほとんど変わらない。このため、ここでは、部分除荷後に完全再載荷した場合の応力度低下率  $\beta_n$  を、完全除荷・完全再載荷時の応力度低下を表す式(12), (13)によって与えることとする。

## 6. 完全除荷・部分再載荷履歴の定式化

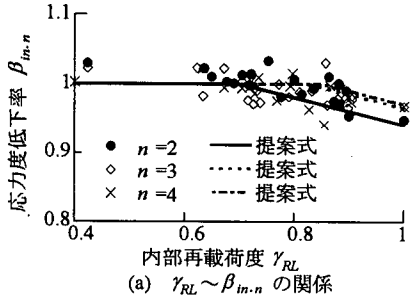
図-12 に示した中から完全除荷・部分再載荷に相当す

る履歴を取り出し、式(2)の部分再載荷度  $\gamma_{RL}=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$  に相当する履歴を示すと図-34 のようになる。ここでは、内部除荷点から2回除荷、再載荷を繰り返すまでの履歴を示している。このように、ある除荷点から完全除荷した後に部分再載荷や完全除荷しても、ひびわれが新たに発生したり、すでに生じていたひび割れが進展するようなことはない。これは、前述した完全除荷・完全再載荷した場合や部分除荷・完全再載荷した場合と同様である。

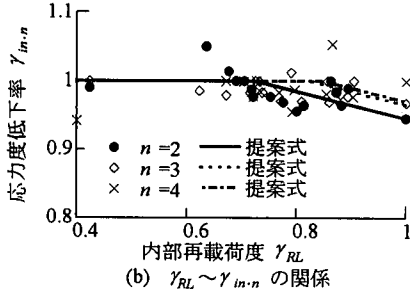
$\gamma_{RL}$  が 0.7 程度以下であれば、 $\sigma_{in-2}$  は 11.6MPa ( $\gamma_{RL}=0.6$ ), 24MPa ( $\gamma_{RL}=0.7$ ) であるのに対して、除荷、再載荷を2回繰り返した後の内部除荷点応力度  $\sigma_{in-4}$  は 12.2MPa ( $\gamma_{RL}=0.6$ ), 24.1MPa ( $\gamma_{RL}=0.7$ ) と内部除荷点応力度  $\sigma_{in-n}$  は低下しない。これに対して、 $\gamma_{RL}$  が 0.8, 0.9 と大きくなると、 $\sigma_{in-2}=21.7$ MPa ( $\gamma_{RL}=0.8$ ), 29.2MPa ( $\gamma_{RL}=0.9$ ) であった値が  $\sigma_{in-4}$  は 21.3MPa ( $\gamma_{RL}=0.8$ ), 28.3MPa ( $\gamma_{RL}=0.9$ ) と低下する。

同様に、塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl-n}$  も  $\gamma_{RL}=0.6, 0.7$  の場合には、1回目に除荷した後には  $\epsilon_{pl-1}$  はそれぞれ 0.0116, 0.00268 であるが、除荷、再載荷を2回繰り返した後(塑性点ひずみ  $\epsilon_{pl-3}$ ) にも 0.0114, 0.00268 と、ほとんど変わらない。これに対して、 $\gamma_{RL}$  が 0.8, 0.9 と大きくなると、塑性点ひずみはそれぞれ  $\epsilon_{pl-1}=0.00739, 0.00257$  から  $\epsilon_{pl-3}=0.00748, 0.00259$  と増加するようになる。





(a)  $\gamma_{RL} \sim \beta_{in-n}$  の関係



(b)  $\gamma_{RL} \sim \gamma_{in-n}$  の関係

図-35  $\beta_{in-n}$  および  $\gamma_{in-n}$  の  $\gamma_{RL}$  依存性

以上のような点を検討するため、完全除荷・部分再載荷を繰り返すことに伴う  $\varepsilon_{ul-in}$  における応力度  $\sigma_{in-n}$  の低下率  $\beta_{in-n}$  および内部除荷ひずみ  $\varepsilon_{ul-in}$  に対する塑性点ひずみ  $\varepsilon_{pl-n}$  の増加率  $\gamma_{in-n}$  を次式のように定義する。

$$\beta_{in-n} = \frac{\sigma_{in-n+1}}{\sigma_{in-n}} \quad (18)$$

$$\gamma_{in-n} = \frac{\varepsilon_{ul-in} - \varepsilon_{pl-n}}{\varepsilon_{ul-in} - \varepsilon_{pl-n-1}} \quad (19)$$

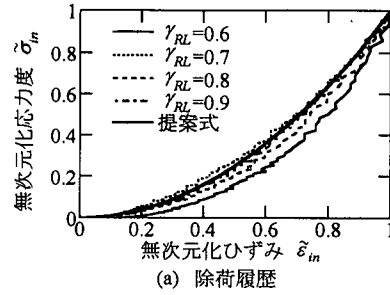
式(18), (19)を用いて、上述した  $\gamma_{RL}$  の増加に伴って  $\sigma_{in-n}$  の低下率および塑性点ひずみ  $\varepsilon_{pl-n}$  の増加率がともに増大するという特性を  $\gamma_{RL} \sim \beta_{in-n}$  および  $\gamma_{RL} \sim \gamma_{in-n}$  関係として示すと図-35 のようになる。図中には後述する提案式も比較のために示している。これによれば、実験値にはかなりばらつきがあるが、 $\gamma_{RL}$  が 1 より小さくなるにつれて、 $\beta_{in-n}$  と  $\gamma_{in-n}$  はいずれも 1 に漸近していく、おおむね  $\gamma_{RL} \approx 0.7$  で 1 に達することが分かる。これより、完全除荷、部分再載荷の応力度低下率  $\beta_{in-n}$  およびひずみ増加率  $\gamma_{in-n}$  を次式で与える。

$$\beta_{in-n} = \beta_n + 0.2(1 - \gamma_{RL}) \quad (20)$$

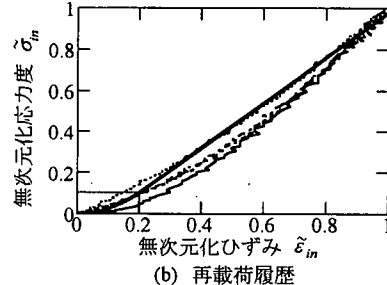
$$\gamma_{in-n} = \gamma_n + 0.2(1 - \gamma_{RL}) \quad (21)$$

ただし、 $n \geq 2$ 、 $\beta_n \leq \beta_{in-n} \leq 1$ 、 $\gamma_n \leq \gamma_{in-n} \leq 1$  である。ここで、 $\beta_n$ 、 $\gamma_n$  は前述した完全除荷、完全再載荷 ( $\gamma_{RL} = 1$ ) した場合の応力度低下率、ひずみ増加率であり、それぞれ式(12), (13)および(15)から求める。式(20), (21)によって求めた  $\beta_{in-n}$ 、 $\gamma_{in-n}$  は図-35 に示したとおりであり、実験値の特徴をよく与えている。

また、内部除荷点からの除荷履歴とその後の再載荷履



(a) 除荷履歴



(b) 再載荷履歴

図-36  $\gamma_{RL}$  を変化させた場合の  $\tilde{\sigma}_{in} \sim \tilde{\varepsilon}_{in}$  関係

歴を表すために無次元化応力度  $\tilde{\sigma}_{in}$ 、無次元化ひずみ  $\tilde{\varepsilon}_{in}$  を式(5), (6)と同様に次式のように定義する。

$$\tilde{\sigma}_{in} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{in-n}} \quad (22)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{in} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{pl-n}}{\varepsilon_{ul-in} - \varepsilon_{pl-n}} \quad (23)$$

これより  $\tilde{\sigma}_{in} \sim \tilde{\varepsilon}_{in}$  関係を図-34 を例として示した結果が図-36 である。ここでは、まず最初に  $n=1$  の場合を示している。図中には式(7), (8)において  $\sigma_{ul-n}$  を  $\sigma_{in-n}$  に、また、 $\varepsilon_{ul}$  を  $\varepsilon_{ul-in}$  と見なして式(7), (8)により求めた計算値も比較のために示している。これによれば、完全除荷・部分再載荷の場合にも、いろいろな  $\gamma_{RL}$  に対して除荷履歴は式(7)で、再載荷履歴は式(8)でそれぞれ表せることがわかる。また、図-34 から内部除荷・完全再載荷を複数回繰り返した後も除荷・再載荷履歴は 1 回目の完全除荷・部分再載荷履歴とほとんど変わらないことから、 $n$  が増加した場合にも除荷履歴は式(7)で、再載荷履歴は式(8)でそれぞれ与えることとする。

## 7. 部分除荷・完全再載荷履歴および完全除荷・部分再載荷履歴に対する提案モデルの妥当性

図-37 は、図-31 (b)に示した部分除荷・完全再載荷履歴を例として提案モデルと実験結果の比較を示した結果である。また、図-37 にはこの中から 1, 5 回目の部分除荷・完全再載荷だけを取り出して実験値と提案モデルとを比較した結果も示している。これによれば、5 回部分

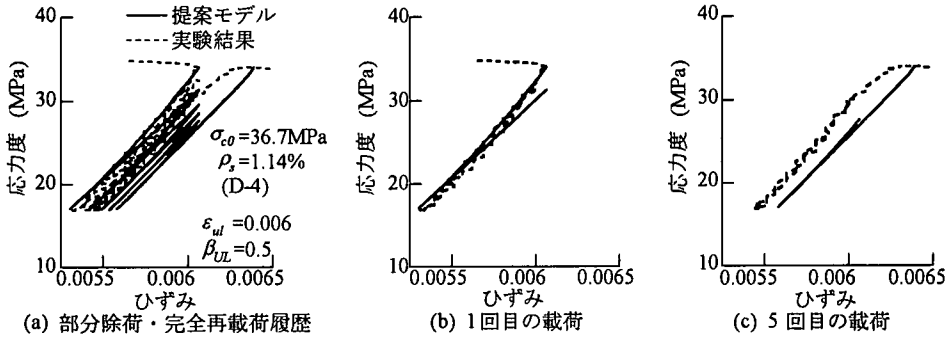


図-37 部分除荷・完全再載荷履歴に対する実験結果と提案モデルの比較

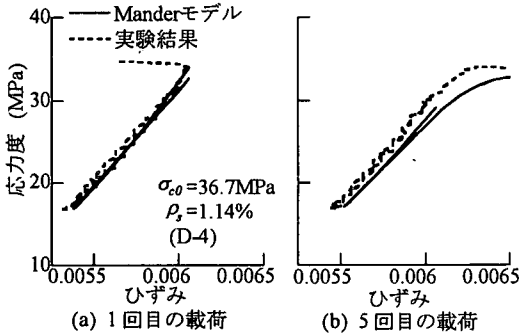


図-38 部分除荷・完全再載荷履歴に対する実験結果とManderモデルの比較

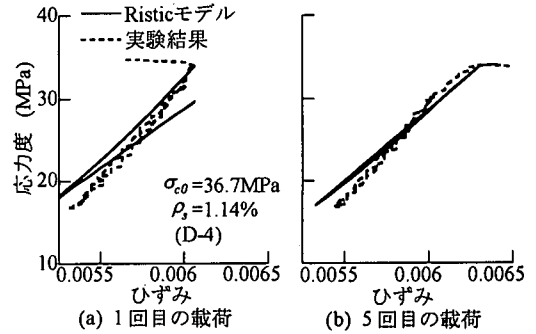


図-39 部分除荷・完全再載荷履歴に対する実験結果とRisticモデルの比較

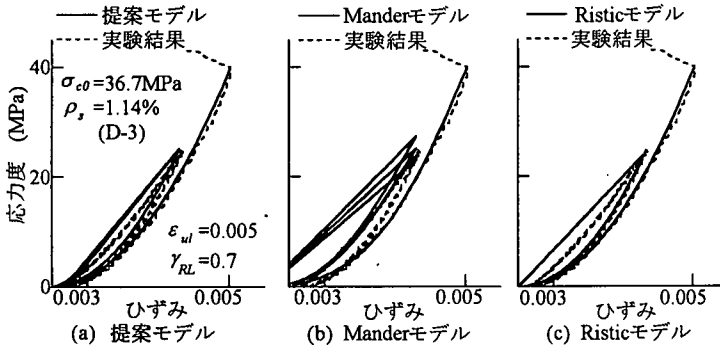


図-40 完全除荷・部分再載荷履歴に対する実験結果と提案モデル、既往のモデルの比較

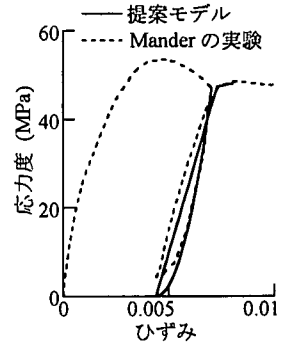


図-41 Manderの実験結果と提案モデルの比較

除荷・完全再載荷を繰り返した後の6回目の除荷点応力度 $\sigma_{ul-6}$ を例にとると提案モデルの27MPaは実験結果の31MPaを13%過小評価するが、5回目の再載荷過程の平均弾性係数は20.6GPaであり、おおむね実験結果(22.8GPa)と同程度であることが分かる。ここで、提案モデルが実験結果を過小評価するのは、図-33に示したように部分除荷後に再載荷した場合の $\beta_n$ は完全除荷・完全再載荷時の $\beta_n$ に比べて多少大きい傾向にあるが、これを簡単のために式(12)、(13)によって与えたためである。

図-38、39は、Manderモデル、Risticモデルを用いて

部分除荷、完全再載荷履歴を試算し、1回目と5回目の履歴を例に実験結果と比較したものである。これによれば、Manderモデルでは再載荷過程の平均弾性係数は20.4GPaとおおむね一致しているが、 $\sigma_{ul-6}$ に対しては上記の提案モデルと同様に約13%の過小評価となる。Risticモデルでは、 $\sigma_{ul-6}$ の推定精度は比較的よいが再載荷過程の平均弾性係数は24%程度過小評価となっている。

完全除荷・部分再載荷履歴について、実験結果と提案モデル、Manderモデル、Risticモデルをそれぞれ比較した結果が図-40である。ここでは、内部除荷点から2回除荷、再載荷を繰り返すまでの履歴を比較した結果を示

している。図-35によれば、実験結果による $\beta_{in,n}$ および $\gamma_{in,n}$ はばらつきが大きいですが、図-40(a)によれば、提案モデルは実験結果の傾向をよく表している。特に、内部除荷点からの除荷過程では実験結果の特徴がよく一致している。また、Manderモデルは塑性点ひずみの推定精度がよくないため再載荷過程が実験結果をうまく表せていない。Risticモデルは除荷過程では実験値とよく一致しているが、再載荷過程では提案モデルのほうがよい一致度を与える。

図-41は、Manderらが行った実験のうち部分除荷・完全再載荷のケース<sup>8)</sup>に対して、提案モデルの妥当性を検討した結果である。ここでは、コンクリート強度 $\sigma_{c0}=27\text{MPa}$ 、帯鉄筋比 $\rho_s=2\%$ とし、スパイラル筋で横拘束された直径500mmの円形供試体に対する実験結果を示している。なお、計算値はある除荷点から除荷し始めてから、再載荷点ひずみ $\varepsilon_{rl}$ に達した後、再載荷して包絡線にもどるまでの過程だけを求めている。これより、提案モデルでは除荷点から応力度が約10MPaまで除荷する履歴はよく表すが、再載荷点応力度 $\sigma_{rl}$ を実験値の4.3MPaに対して、0MPaと過小評価する。再載荷履歴は、 $\sigma_{rl}$ の推定精度がよくないためずれているが、再載荷弾性係数は実験値が16.7GPaに対して計算値は16.4GPaとよく表している。

## 8. 結論

本研究では、除荷・再載荷を含むコンクリート柱の応力度～ひずみ関係を定式化することを目的として、帯鉄筋比を $0.67\% \leq \rho_s \leq 2.67\%$ 、コンクリート強度を $23.0\text{MPa} \leq \sigma_{c0} \leq 36.7\text{MPa}$ と変化させた合計20体の横拘束されたコンクリートに対して、単調載荷、完全除荷・完全再載荷、部分除荷・完全再載荷、完全除荷・部分再載荷の4つの載荷履歴を用い、除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ の大きさや載荷繰返し回数をパラメーターとして、一軸圧縮載荷実験を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 本実験で用いた載荷履歴の範囲では、包絡線上の任意の点から除荷する回数 $m$ と同一除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ からの完全除荷、完全再載荷の繰返し回数 $n$ を変化させても、包絡線や除荷、再載荷履歴を含む応力度～ひずみ関係はほとんど変わらない。
- (2) 同一除荷点ひずみ $\varepsilon_{ul}$ から除荷する場合には、本実験で対象とした帯鉄筋比 $0.67\% \leq \rho_s \leq 2.67\%$ とコンクリート強度 $23.0\text{MPa} \leq \sigma_{c0} \leq 36.7\text{MPa}$ の範囲では、塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl-1}$ や式(4)で定義した応力度低下率 $\beta_1$ は $\rho_s$ 、 $\sigma_{c0}$ に関わらず、おおむね同程度である。このため、これらの推定式をそれぞれ式(10)、(11)のように提案した。
- (3) 完全除荷・完全再載荷履歴を繰返すと、塑性点ひ

ずみ $\varepsilon_{pl-n}$ は大きくなり、除荷点応力度 $\sigma_{ul-n}$ は低下する。ただし、繰返し回数が増加するにつれて、塑性点ひずみ $\varepsilon_{pl-n}$ の増加割合、除荷点応力度 $\sigma_{ul-n}$ の低下割合は減少する。これらの特性を、応力度低下率 $\beta_n$ 、ひずみ増加率 $\gamma_n$ を定義して式(12)、(13)、(15)のように定式化した。

(4) 部分除荷・完全再載荷履歴、完全除荷・部分再載荷履歴では、完全除荷・完全再載荷履歴と同様に、ある除荷点での繰返し回数 $n$ を増やすと除荷点応力度は低下し、塑性点ひずみは増加する。部分除荷・完全再載荷履歴では、除荷点応力度の低下率は完全除荷・完全再載荷の場合と変わらない。このため完全除荷・部分再載荷履歴では、応力度低下率とひずみ増加率を式(20)、(21)のように与えた。

(5) 本提案式による応力度～ひずみ関係は、本研究で対象とした $0.0005 \leq \varepsilon_{ul} \leq 0.03$ の範囲における除荷、再載荷の履歴や繰返し回数が増えた場合の除荷、再載荷履歴をよく表すことができる。

謝辞：本研究の全般にわたり、建設省土木研究所の星隈順一氏、大成建設(株)の細谷学氏(元東京工業大学大学院から有益なご意見を賜りました。東京大学大学院工学系研究科の前川宏一教授には貴重な資料を頂きました。また、供試体の作製に際しては、(株)ピー・エスの野村貞広氏、森拓也氏、武村浩志氏にお世話になりました。実験に際しては、東京工業大学の穴見健吾助手、久田真助手(現新潟大学工学部助教授)、石関宏一技官の他、荒井智代、榊原泰造、渡邊学歩、宇根寛、剣持安伸、米田慶太の各氏のご援助を得ました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 2) Kent, D. C. and Park, R.: Flexural Members with Confined Concrete, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 97, No. 7, pp. 1969-1990, 1971.
- 3) Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M.: Strength and Ductility of Tied Concrete Columns, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 106, No. ST 5, pp. 1079-1102, 1980.
- 4) Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M.: Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 108, No. ST12, pp. 2703-2722, 1982.
- 5) 六車照, 渡辺史夫, 勝田庄二, 田中仁史: 横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化, セメント技術年報, Vol. 34, pp. 429-432, 1980.
- 6) 藤井学, 小林和夫, 宮川豊章, 井上晋, 松本利彦: 横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の適用に関する検討, セ

- メント技術年報, Vol. 42, pp. 311-314, 1988.
- 7) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.
  - 8) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 114 No. 8, pp. 1827-1849, 1988.
  - 9) Saatcioglu, M. and Razvi, S. R.: Strength and Ductility of Confined Concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607, 1992.
  - 10) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A. W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 624-633, 1997.
  - 11) Ban, S. and Muguruma, H.: Behaviour of Plain Concrete under Dynamic Loading with Straining Rate Comparable to Earthquake Loading, *Proc. of 2nd World Conference on Earthquake Engrg.*, Vol. III, pp. 1979-1993, 1960.
  - 12) Sinha, B. P., Gerstle, K. H., and Tulin, L. G.: Stress-Strain Relations for Concrete under Cyclic Loading, *Am. Concr. Inst. J.*, Vol. 61, No. 2, pp. 195-211, 1964.
  - 13) Karsan, I. D. and Jirsa, J. O.: Behavior of Concrete under Compressive Loadings, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 95, No. ST12, pp. 2543-2563, 1969.
  - 14) Park, R., Kent, D. C. and Sampson, R. A.: Reinforced Concrete Member with Cyclic Loading, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 98, No. 7, pp. 1341-1360, 1972.
  - 15) Ristic, D.: Nonlinear Behavior and Stress-Strain Based Modeling of Reinforced Concrete Structure under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, School of Engineering, Kyoto University, 1988.
  - 16) 谷川恭雄, 西川公三, 小池狭千朗: 帯筋の拘束を受けるコンクリートの繰り返し塑性変形挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1745-1746, 1977.
  - 17) Dodd, L. L. and Cooke, N.: The Dynamic Behaviour of Reinforced-Concrete Bridge Piers Subjected to New Zealand Seismicity, *Report 92-04*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1992.
  - 18) 滝口克己, 黒正清治, 小林克巳: 鉄筋コンクリート断面の二軸曲げ解析, 日本建築学会論文報告集, 第250号, pp. 1-8, 1976.
  - 19) Maekawa, K. and Okamura, H.: The Deformational Behavior and Constitutive Equation of Concrete Using the Elasto-Plastic and Fracture Model, *Journal of Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, Vol. 37, No. 2, pp. 253-328, 1983.
  - 20) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1997.
  - 21) 堀淳一, 川島一彦, 庄司学: 横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度~ひずみ関係, Report No. TIT/EERG 99-6, 東京工業大学土木工学科耐震工学研究グループ, 1999.

(1999. 9. 13 受付)

## A STRESS-STRAIN MODEL FOR UNLOADING AND RELOADING OF CONCRETE CONFINED BY TIE REINFORCEMENT

Jun-ichi SAKAI, Kazuhiko KAWASHIMA and Gaku SHOJI

This paper presents a series of uniaxial compressive loading tests on concrete cylinders confined by tie reinforcements in order to develop an unloading and reloading stress-strain model of confined concrete. Variables considered as parameters were the volumetric ratio of tie reinforcement  $\rho_s$ , the cylinder strength of concrete  $\sigma_{c0}$  and the number of unloading and reloading cycles at the same strain. To predict an unloading and reloading path, the plastic strain  $\varepsilon_{pl,n}$  and the stress at the unloading strain  $\sigma_{ul,n}$  are controlling parameters. These controlling parameters were analyzed based on the test data to propose an empirical relation. The predicted relation provides good agreement with the test data.