

# 論文 パターン化した劣化モデルを考慮した RC 梁のせん断耐荷特性

河合 優<sup>\*1</sup>・森川英典<sup>\*2</sup>・片山憲一<sup>\*3</sup>・山本剛司<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本稿は、既存 RC 橋において実際にみられるコンクリートの劣化およびそのばらつきがせん断破壊に与える影響を評価するものである。劣化のばらつきモデルをパターン化して RC 梁に導入し、実験および 2 次元弾塑性有限要素法解析を用いて劣化パラメータの耐力に対する感度分析を行った。その結果、劣化の位置、幅および劣化強度がせん断耐力に大きな影響を及ぼすことを明らかにし、これを考慮したせん断耐力評価の考え方を提示した。

**キーワード:** コンクリート強度、劣化、せん断耐力、RC 橋、弾塑性有限要素法

## 1. はじめに

著者らはこれまで既存 RC 橋における材料試験を行い、状況によりコンクリート強度が経年により低下（劣化）していること、またそのばらつきが非常に大きいことを明らかにしてきた[1]。さらに、これらの結果を用いた安全性評価により、劣化の著しい橋梁においてはせん断破壊が支配的となり、また通常の土木学会コンクリート標準示方書によるせん断耐力評価をかなり下回ることを指摘した[2]。これは、対象とした橋梁の劣化程度が示方書の評価式の適用範囲を逸脱していること、また設計時に仮定しているものに比べて非常に大きなコンクリート強度のばらつきの影響によるものと考えられる。そこで本研究では、コンクリートの強度劣化およびそのばらつきが RC 梁の耐荷性に与える影響を評価することを目的として、パターン化した部分劣化モデルを考慮した RC 梁を用いた実験および 2 次元弾塑性有限要素法解析を実施した。

## 2. 劣化モデルのパターン化

既存 RC 橋においては、施工状態や架設地域の気候条件や環境条件などによって、劣化の有無あるいは劣化の進行状況は異なるものと考えられる。また同一橋梁であっても種々の要因により、劣化状況にばらつきが生じ、コンクリートの強度は、施工時に比較して、全体的にそのレベルが低下しているとともに、ばらつきの分布が大幅に異なるものになっていると考えられる。例えば、図 1 の左上図に示すように、断面内のコンクリート強度の平均値が部材軸方向にランダムに分布しているものとして考えた場合、危険側の評価を避けるために、強度分布の最小値とその広がりがせん断耐力に及ぼす影響を評価することが重要と考える。

そこで本研究では、この影響を実験的、解析的に評価するためのモデル化として、ランダムな分布を図 1 の右上図に示すような等価なブロック波に置換え、さらにその最小ブロックを部分劣化として取り出す方法をとった。つまり、劣化を導入したモデルとしては、図 1 の下図に示すよ

\* 1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻（正会員）

\* 2 神戸大学助教授 工学部建設学科、工博（正会員）

\* 3 (株) 横河ブリッジ、工修（正会員）

\* 4 (株) 阪神コンサルタンツ

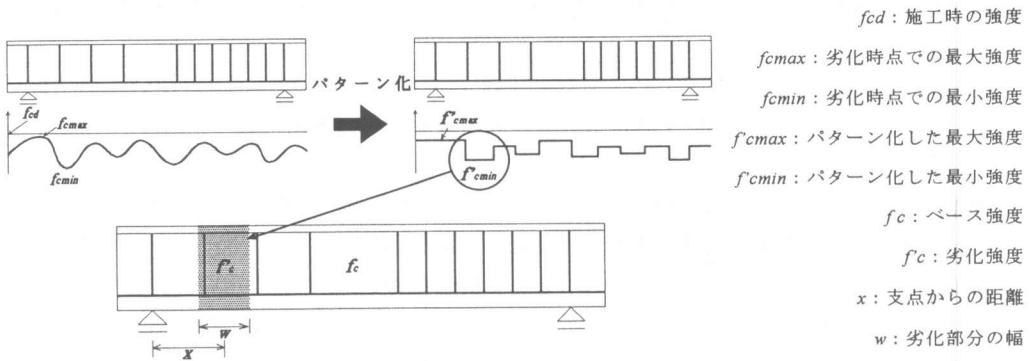


図 1 劣化モデルのパターン化

うに、ある劣化箇所にブロック領域で強度の最小値を有すると考え、その他の領域は劣化部材全体の平均的な強度を有するものとした。また劣化パラメータとしては、劣化ブロックの強度、支点からの距離、ブロック幅の 3つを取り上げ、それぞれのパラメータがせん断耐力に及ぼす影響を調べた。

### 3. 実験の概要

実験に用いる供試体は、図 2 に示すとおり、幅 150mm、高さ 240mm、有効高さ 200mm の矩形断面を持つスパン 1200mm の R C 梁供試体である。載荷は中央 2 点載荷であり、せん断スパン比は 2.5 である。このようなせん断スパン比の梁では支圧板の影響があると考えられ、本実験では鋼製円柱によって線載荷を行った。主筋には D16 (SD295B) を 3 本、スターラップには D6 (SD390) を用いており、引張鉄筋比は  $p_w=0.0199$  である。また実験供試体における局部劣化部は、セメントとの硬化時間を考慮して付着が十分となるように時間差打設によって作成した。実験は後述する 9 種類の劣化パターンの供試体と 4 種類の均一劣化パターンの供試体について行った。

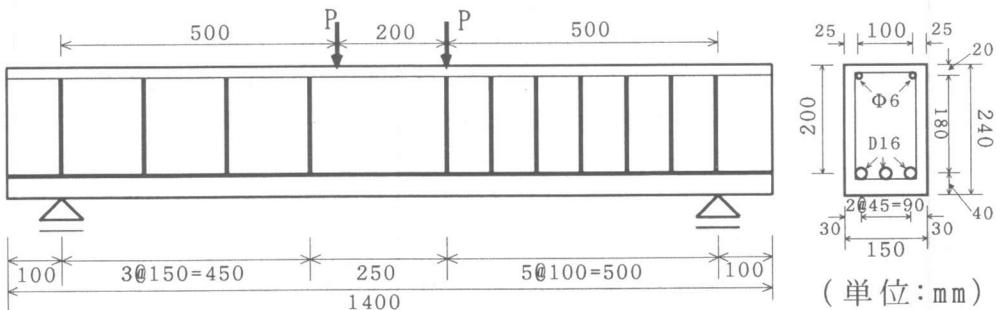


図 2 供試体概略図

実験を行った供試体の劣化パターンを表 1 に示す。供試体 No.1-1～No.1-3 は、No.2～No.10 の劣化供試体のベース強度（局部劣化部以外の強度）に対応するコンクリート強度を持つ均一供試体である。また、供試体 No.1-4 は No.4 と No.10 の局部劣化部の強度をもつ均一供試体である。それぞれの劣化パラメータのパターン数は、劣化強度 2 種類、劣化幅 2 種類、劣化位置 3 種類としており、劣化強度はベース強度の 1/2 倍および 1/3 倍、劣化幅はスターラップ間隔の 2/3 倍およ

び等倍、劣化位置はスターラップ間の中央部となるように決定した。

表 1 実験供試体の劣化パターン

	No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
$f_c(N/mm^2)$	14.1	13.6	13.2	6.90	14.1	14.1	13.2	13.2	13.6	13.6	13.6	13.6	13.2
$f'_c(N/mm^2)$	—	—	—	—	7.37	5.40	6.90	4.47	7.34	4.81	7.34	4.81	6.90
$x(mm)$	—	—	—	—	225	225	225	225	375	375	375	375	75
$w(mm)$	—	—	—	—	100	100	150	150	100	100	150	150	100

#### 4. 解析の概要

解析は 2 次元弾塑性有限要素法を用いて行った。図 3 に解析モデルを示す。モデルは、前節で述べた実験供試体と同じ条件である。ここで行った解析は、実験結果との比較をした上で、それぞれの劣化パラメータのせん断耐力に対する詳細な感度解析を行うためのものである。解析に用いたコンクリートの材料特性は、解析がスターラップの降伏を指標とした定性的評価を目的としているため、圧縮側を tri-linear, 引張側を弾性で近似しており、引張軟化は考慮していない。しかし、せん断を解析するのにひび割れ発生後の引張応力の軟化は非常に重要であると考えられるため、今後導入していく必要がある。また鉄筋については完全弾塑性、バネについては bi-linear で近似した。また解析における劣化パラメータのパターンは、実験ケースを補間する意味で劣化位置で 15 通り、劣化幅 3 通り、劣化強度 4 通りと多く設定した。

#### 5. 実験と解析結果の比較・検証

解析結果のほとんどにおいてスターラップの降伏が主鉄筋の降伏に先行しており、スターラップの降伏後終局に至るまで解析が不安定な状態となり、結果のばらつきが大きい。そこで本研究では全てのパターンにおける統一指標としてスターラップの降伏に着目し、スターラップ降伏時の耐力をせん断耐力として解析結果を整理した。また実験についてはスターラップひずみの測定点が固定されており、初期降伏点を特定することができないため、梁の終局時の耐力について評価を行うこととした。解析は実験に先行して行ったため、材料特性は実際の実験結果とは若干異なっている。表 1 に示した劣化パターンの供試体の実験結果と、それに対応する解析パターンの解析結果を表 2 に示す。

表 2 実験結果及び解析結果

	No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
実験結果	146.5	146.2	130.3	90.6	142.5	112.7	119.6	86.2	124.9	105.1	112.7	91.1	134.8
解析結果	109.8	109.8	109.8	81.3	107.1	98.0	96.4	94.7	110.7	96.0	104.9	93.9	103.9
結果の比	1.334	1.332	1.187	1.114	1.331	1.150	1.241	0.910	1.128	1.095	1.074	0.970	1.297

単位 : kN

## 実験結果と解析結果

果では、結果の指標が異なるため直接の評価はできないが、それぞれの結果の比をとってみると、一部を除いて大きな変動はみられず相応の結果が得られたとい

える。次に、それぞれの荷重-変位・荷

重-スターラップひずみ曲線について比較を行う。図4はあるパターンにおける解析と実験の比較を示している。右図のスターラップ降伏耐力等について解析値が実験値をやや下回っているが、他のパターンにおいても同様の傾向が得られており、引張軟化を考慮していない影響と考えられる。さらに、それぞれのひび割れ状況について比較を試みる。図5は解析の最大主応力分布およびひび割れ状況図であり、図中の濃淡で最大主応力の量、矢印でひび割れ方向を示している。また、図6は実験のひび割れ図である。これらの比較から、実験、解析とともに、せん断スパンにおいて、荷重点から支点に向かう方向にひび割れが発生していることが認められる。また解析結果の最大主応力分布から、劣化導入部において、斜めひび割れ発生後、応力が完全に解放されている様子が確認でき、劣化導入部で破壊の進行が早いことが表されている。

## 6. 劣化パラメータの感度分析

まずははじめに、均一劣化した場合のRC梁の耐力変化を図7に示す。図に用いた実験データは、表1で示した供試体No.1-1からNo.1-4の実験結果およ

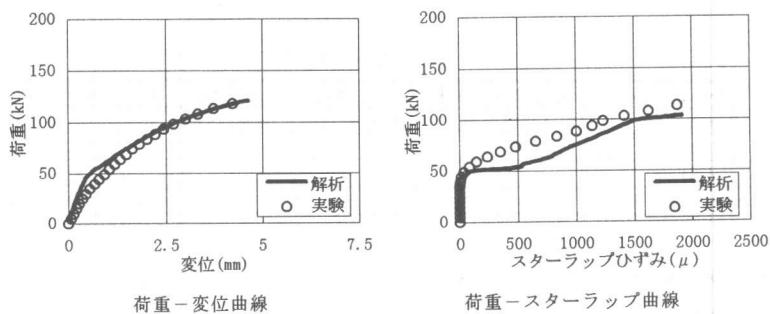


図4 実験結果と解析結果の比較

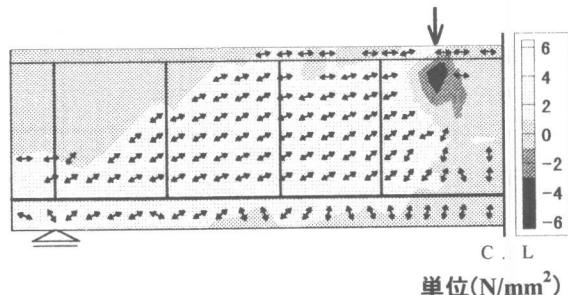


図5 最大主応力分布およびひび割れ状況図

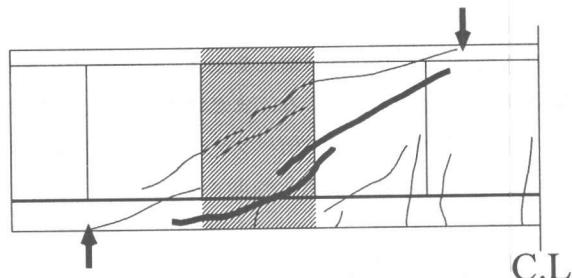


図6 実験ひび割れ図

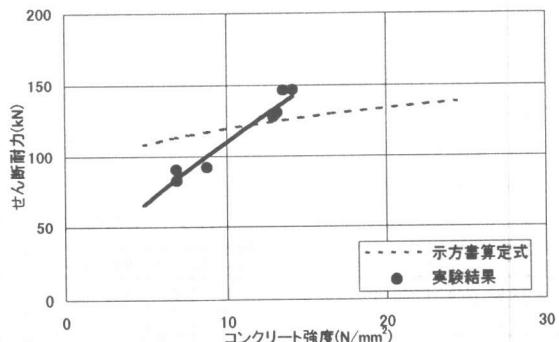


図7 コンクリート強度とせん断耐力

び本研究でこれまで行ってきた実験結果[4]を含んでいる。図7のように、コンクリート強度が低いRC梁では、土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式による値よりも、小さい値を示していることがわかる。このように、劣化が進行していくと示方書式に対する安全余裕度が次第に低下し、最終的に危険側に移行することになる。よって、これらの実験結果等を用いることにより劣化した場合の評価式を確立する必要があると言える。さらに、劣化したコンクリート部材では、前述のようにコンクリートの平均強度低下の他に、ばらつきの増大が生じ得る。したがって、実際の評価に際しては、平均強度で評価された耐力評価式にこのばらつきの影響を考慮する必要がある。そこで、本研究では、せん断耐力を低下させる要因を検証し、かつその影響を評価するため、以下のような劣化パラメータの感度分析を行った。

### (1) 劣化位置に関する感度分析

劣化位置に関する感度分析は、劣化幅100mm、ベース強度 $14.7\text{N/mm}^2$ 、劣化強度 $4.90\text{N/mm}^2$ を基準として行った。図8に結果を示す。前述のように、実験結果は最大耐力値であり、解析結果は、スターラップの初期降伏値で整理しており、解析結果が実験結果よりもやや低くなっている。解析結果によると、劣化位置が応力の集中する支点付近及び載荷点付近の時に最もせん断耐力に

影響を与えることが顕著に現れている。また、劣化位置がせん断スパンの中央位置( $x=225\text{mm}$ )付近でスターラップ間隔のほぼ中央にあるときにも、周辺の位置よりせん断耐力が低い値を示しているのがわかる。逆に、劣化部分がスターラップを含むような劣化位置の場合には、あまり影響が現れなかった。このように劣化位置はせん断耐力に大きな影響を及ぼす要因の一つであることが推測される。

### (2) 劣化幅・劣化強度に関する感度分析

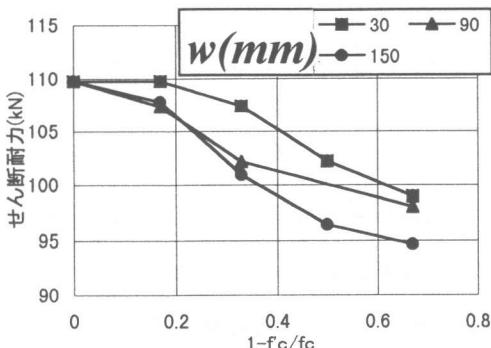


図9 各劣化幅に対する  
劣化強度による感度分析結果

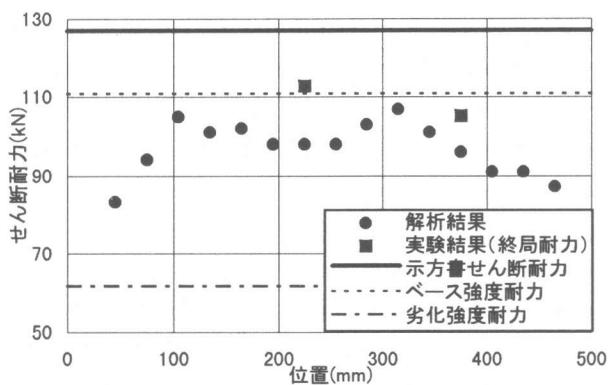


図8 劣化位置によるせん断耐力の評価

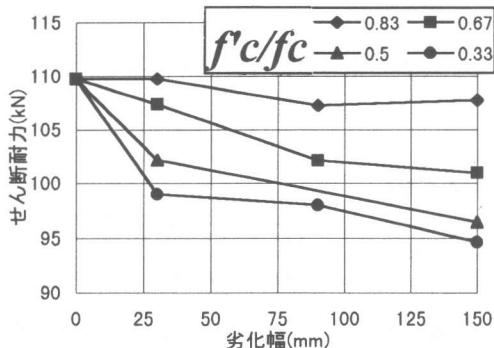


図10 各劣化強度に対する  
劣化幅による感度分析結果

図9は、(1)で行った劣化位置に関する感度分析結果のうち、せん断スパンの中央位置に劣化位置を固定して劣化幅を30~150mmまで変化させ、それぞれの劣化幅に対して劣化強度がせん断耐力に及ぼす影響を示した図であり、図10は、劣化強度を $4.90\text{N/mm}^2$ ~ $12.3\text{N/mm}^2$ まで変化させ、それぞれの劣化強度に対して劣化幅がせん断耐力に及ぼす影響を示した図である。それぞれの劣化幅に対して劣化強度のせん断耐力に及ぼす影響は、ほぼ線形に低下しているように見える。しかし、劣化程度が微少な段階ではほとんど影響がみられず、劣化がある程度進行するまでは劣化強度の影響はあまり見られない結果となった。また、それぞれの劣化強度に対して劣化幅のせん断耐力に及ぼす影響は、劣化のばらつきが小さい(劣化強度比( $f_{c'}/f_c$ )が大きい)場合には、ほぼ線形的な相関が認められるが、劣化のばらつきが大きい場合、劣化幅の小さい領域での感度が非常に大きく、非線形的な感度特性が認められる。

つまり、パターン化した劣化の位置、幅、程度はせん断耐力に対して影響を及ぼし、またそれぞれ特有の感度を有することが明らかになった。したがって、これらの感度特性を利用すると、均一劣化の場合のせん断耐力評価からのシフト量を算定することが可能となり、劣化のばらつきが大きい場合に、危険側の評価を避けることが可能となる。

## 7. 結論

本研究で得られた結果について次に述べる。

- (1)劣化がかなり進行したRC梁のせん断耐力は、コンクリート標準示方書の耐力算定式に対する安全余裕度が通常よりもかなり低く、最終的には危険側に移行する。
- (2)パターン化した劣化モデルを用いて行った実験・解析によって、それぞれの劣化パラメータのRC梁のせん断耐力に対する感度特性が明らかになった。その結果は以下のとおりである。
  - a)劣化位置：応力の集中する支点・荷重点付近およびせん断面中央部分付近に配置するとせん断耐力は大きく低下し、スターラップを含んで配置するとそれほど低下しない。
  - b)劣化幅：特に強度劣化比が0.7程度以下においてせん断耐力に及ぼす影響が大きく、強度劣化比が0.5以下になると、劣化幅が小さい領域での感度が非常に高くなる。
  - c)劣化強度：せん断耐力に対してほぼ線形関係を有するが、劣化強度比が0.8以下の領域での感度が高い。
- (3)均一劣化した場合のせん断耐力評価に、上記で評価した劣化モデルのパラメータの感度特性を考慮すると、劣化のばらつきを考慮したせん断耐力が評価することが可能になる。

ここで行った分析は今後、劣化したRC橋のせん断耐力評価法確立のためにさらに詳細に検討していく予定である。

## 【参考文献】

- [1]森川英典、大山慎一、宮本文穂、北村敦彦、竹内和美：既存コンクリート品質に関する統計的考察、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、V-93,pp.212-213,1993.9
- [2]森川英典、宮本文穂、竹内和美：統計解析に基づく既存コンクリート橋の安全性および寿命評価、土木学会論文集、No.502/V-25, pp.53-62, 1994.11.
- [3]山本剛司、森川英典、片山憲一、河合 優：部分劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断耐荷実験、平成9年度土木学会関西支部年次学術講演会投稿中
- [4]河合 優、片山憲一、高田至郎、森川英典：コンクリートへの加水が材料特性及びRC梁のせん断挙動に及ぼす影響、平成8年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要、V-9,1996.5