

# ASR による材料劣化を考慮した RC 梁の力学的特性の試算

Trial Calculation on the Mechanical Property of Reinforced Concrete Beams by the Considerate of the Degenerated Materials

株式会社 国際建設技術研究所 ○正会員 日比野 憲太 (Kenta Hibino)  
 北武コンサルタント株式会社 正会員 渡辺 忠明 (Tadatomo Watanabe)  
 株式会社 国際建設技術研究所 フェロー会員 葛目 和宏 (Kazuhiro Kuzume)

## 1. はじめに

構造物は、その供用期間中に様々な作用を受ける。中でも特に環境による作用は、ASR や塩害に代表されるように、時間の経過に伴って構造物を形成する各種構成材料の劣化を進行させ、その結果として構造物の応答作用や耐力等の限界値を変化させる要因となる。

これまでの構造物の照査は、このような時間の影響を考慮して構造物の供用期間中の最終状態での性能を照査するか、または時間の影響を生じさせないようにあらかじめ細目を定め時間の影響を無視して照査を行っている。このように現状では、構造物の設計自体に時間軸の概念がないために、新規に構造物を設計する場合における性能照査と、補修・補強などの維持管理時の照査が区別されており、両者は別の体系で扱われている場合が多い。そのため、時間軸を考慮した性能照査方法が確立されれば、構造物の任意の時間における性能を全て照査できることから、新設構造物の照査も既設構造物の照査も同一の時間軸上で照査できることになり、新設構造物の設計と維持管理時の設計との差異による弊害が解消されるものと考えられる。

そこで本研究は ASR による材料劣化に着目し、時間軸を考慮したコンクリート構造物の性能照査方法の確立のための基礎的データの蓄積を目的として、時間の経過による各種構成材料の特性値の変化を仮定し、その変化が RC 構造物の耐力、変形および破壊形態に及ぼす影響に関して、パラメトリック解析を試みたものである。

## 2. 時間軸を考慮した各種構成材料の構成則の変化

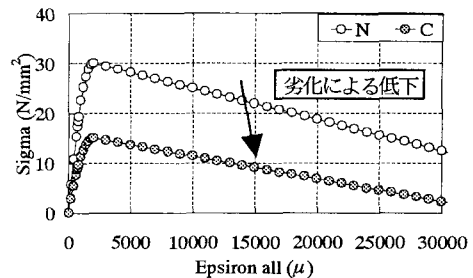
### 2.1 概要

RC 構造を構成する各種材料の構成則において、時間の進行によりその構成則が変化すると考えられるものには、コンクリートの圧縮特性、ひび割れ面での応力伝達特性ならびに補強材とコンクリート間の付着特性などが挙げられる。しかし、構成材料の劣化は単純な時間の進行のみならず、環境条件にその進行を強く支配されるため、時間軸のみならず定量的に劣化の進行状態を評価することのできる指標（例えば、ひび割れ密度など）の提案も必要である。以下に、これらの構成則に関して、劣化の影響を考慮した特性をまとめる。

### 2.2 コンクリートの圧縮特性

ASR により劣化したコンクリートの無拘束状態での一軸圧縮特性は、図-1 に示すように、劣化の進行により最大強度が低下

し、弾性係数が小さくなる傾向が報告されている<sup>1)</sup>。そこで本研究では、健全なコンクリートの応力-ひずみ関係 (N) として、最大強度までを 2 次曲線、それ以降の軟化域を直線で表現したモデルを採用した。さらに軟化域での要素依存性を軽減するために、圧縮破壊エネルギー ( $G_{CF}$ ) の観念を考慮している。劣化時の特性 (C) は、N シリーズの圧縮強度 ( $f'_{c(N)}$ ) および弾性係数 ( $E_{c(N)}$ ) を 0.5 倍し、その圧縮強度から計算される圧縮破壊エネルギーを 0.5 倍して表現した。



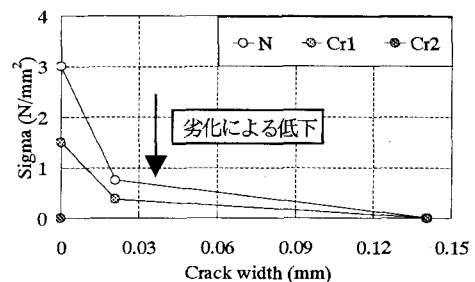
N: 健全, C: 劣化 ( $f'_c = 0.5 \times f'_{c(N)}$ ,  $E_c = 0.5 \times E_{c(N)}$ )

図-1 コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係

ただし、既往の研究では RC 構造内部に配置された補強材の拘束によるケミカルプレストレス効果により、構造体としての部材の耐力ならびに変形が改善されたとの報告もあり<sup>2)</sup>、劣化したコンクリートの力学的特性と構造体内部での見かけのコンクリートの力学的特性との関連を検討する必要がある。

### 2.3 ひび割れ面での応力伝達特性

ASR による膨張のためにコンクリートには無数のひび割れが発生し、コンクリートの引張軟化特性は健全なコンクリートの



N: 健全, Cr1: 劣化度 1 ( $f_t = 0.5 \times f_{t(N)}$ ,  $G_F = 0.5 \times G_{F(N)}$ ),

Cr2: 劣化度 2 ( $f_t = 0$ ,  $G_F = 0$ )

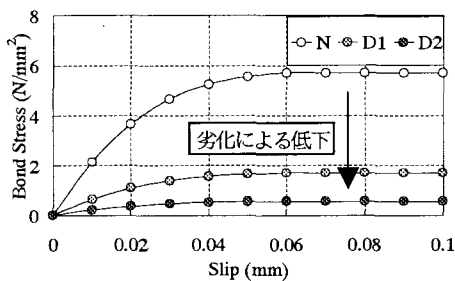
図-2 ひび割れ間でのせん断保率

ものと比べ著しく低下するものと考えられる。そこで本研究では、図-2 に示すように、健全なコンクリートの引張軟化特性(N)を1/4モデルで表現し、劣化時には健全なコンクリートの引張強度( $f_{t(N)}$ )および破壊エネルギー( $G_{F(N)}$ )を0.5倍した劣化度1(Gr1), ならびに引張軟化特性を考慮しない劣化度2(Gr2)を採用した。また、ひび割れ面でのかみ合わせ作用は、ひび割れ幅の増大に伴ってせん断剛性が低下するせん断保持率を考慮している。特にGr2シリーズに関しては、せん断保持率を0.として試算を行った。

ただし、上述したコンクリートの圧縮特性とも関連し、構造体内部で生じるケミカルプレストレス効果による見かけの引張強度の増大や、それに関連する引張軟化特性ならびにせん断保持率の変化を検討する必要がある。

## 2. 4 補強材とコンクリート間の付着特性

補強材とコンクリート間の付着特性は、図-3 に示すように、劣化の進行により最大付着強度が低下するとの報告がある<sup>3)4)</sup>。そこで本研究では、健全なコンクリートの付着応力-すべり関係(N)として、最大付着応力( $\tau_{max(N)}$ )までを3次曲線、それ以降を直線で表現したモデルを採用した。また、劣化時の付着特性は、劣化度1では健全時の最大付着応力の0.3倍(D1), 劣化度2では0.1倍としたモデル(D2)を採用した。



N : 健全, D1 : 劣化度1 ( $\tau_{max} = 0.3 \times \tau_{max(N)}$ ),

D2 : 劣化度2 ( $\tau_{max} = 0.1 \times \tau_{max(N)}$ )

図-3 付着応力-すべり関係

補強材とコンクリート間の付着特性に関しては、劣化したコンクリートならびに腐食した鉄筋を用いた一軸引抜試験により、その特性の変化に関する検討を行う予定である。また、上述した2つの構成則と同様に、ケミカルプレストレス効果(側圧)による付着特性の変化を検討する必要がある。

## 3. ASRによる材料劣化を考慮した各種構成則を用いたRC梁の力学的特性の試算

### 3. 1 概要

本節では、ASRによる材料劣化を考慮した各種構成則の変化が、RC構造物の耐力、変形および破壊モードに及ぼす影響に関して、パラメトリック解析を試みた。

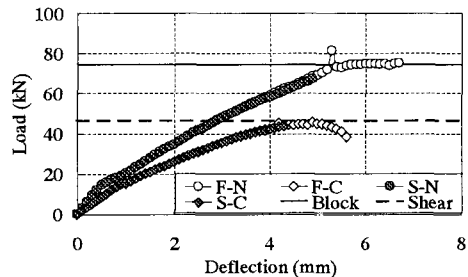
解析対象にはRC梁部材を選択し、部材寸法は150×240×2,000(mm), 軸方向鉄筋としてD22( $f_t=350N/mm^2$ )を有効高さ200mmの位置に2本配置したものとした。また、荷重条件は支持スパン1,800mm, 荷重スパン600mm( $a/d=3.0$ )の対称2

点集中荷重とした。以上のRC梁部材の諸元を基にしてせん断破壊先行型(S), およびせん断補強鉄筋としてD10( $f_t=350N/mm^2$ )を間隔200mmで配筋した曲げ破壊先行型(F)の2シリーズに関して、パラメトリック解析を試みた。

RC梁部材の力学的特性の試算には汎用有限要素解析コード「DIANA」を使用した。各構成材料は弾塑性体として扱い、その破壊基準として、コンクリートにはDucker-Prager, 鉄筋にはVon Misesを採用した。さらに、コンクリートの圧縮軟化域には圧縮破壊エネルギー( $G_{RC}$ )を考慮して、要素寸法依存性の軽減を計った。一方、引張域には、mode Iには引張軟化特性(図-2), mode IIにはせん断保持率を考慮した。軸方向鉄筋ならびにせん断補強筋は、トラス要素を用いて表現した。また、接合要素型の付着モデルを介することにより、コンクリート要素の界面に接続している。さらに、付着モデルには付着応力-すべり関係(図-3)を導入することにより、鉄筋とコンクリート間の相対変位(付着すべり)を表現した。

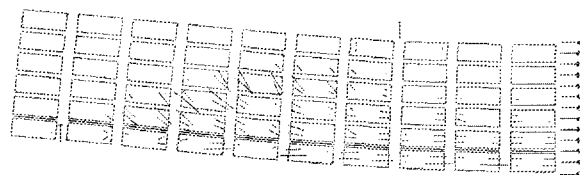
### 3. 2 コンクリートの応力-ひずみ関係の影響

解析要因に、図-1に示す2種類のコンクリートの応力-ひずみ関係(N,C)を用いた場合での、せん断破壊先行型(S)および曲げ破壊先行型(F)のRC梁の荷重-変位関係を図-4に示す。また、図-5にNシリーズのSおよびFに関する、終局時のひび割れひずみベクトル分布を示す。特に、図-4に示すBlockは等価応力ブロック法を用いて算出したFの曲げ耐力, Shearは二羽式を用いて算出したSのせん断耐力を示す。



Block : 曲げ耐力 (F), Shear : せん断耐力 (S)

図-4 荷重-変位関係 (N,C Series)



(a) せん断破壊先行型-健全 (S-N)



(b) 曲げ破壊先行型-健全 (F-N)

図-5 終局時のひび割れひずみベクトル (N Series)

健全な要素特性を有する N シリーズでは、S が軸方向鉄筋降伏前のせん断破壊、F が軸方向鉄筋降伏後に曲げ破壊する結果となった。また、S の終局耐力は二羽式による計算耐力を3割ほど上回っているが、これは S がせん断引張破壊に近い破壊モードを示しているためであると考えられる。一方、F の終局耐力は等価応力ブロック法で計算した終局曲げ耐力に近い結果となった。

コンクリートの劣化を考慮した C シリーズは、コンクリートの弾性係数の低下による部材剛性の低下、ならびに圧縮強度の低下による部材耐力の低下が確認できる。また、部材の破壊モードは、S および F 共に軸方向鉄筋が降伏する前に曲げ破壊した。この破壊モードは、コンクリートの圧縮強度が低下して過鉄筋の RC 梁となっているため、本来の N シリーズが有する曲げおよびせん断耐力に到達する前に、圧縮部コンクリートが圧壊した結果であると考えられる。

以上の解析結果から、コンクリートの応力-ひずみ関係の劣化は、RC 梁の部材剛性や終局耐力に影響を与えることが確認できた。しかし、既往の研究では、コンクリートの特性値が低下した段階においても、部材の力学的挙動に大きな変化が確認されないとの報告もあるため<sup>4,5)</sup>、構造内部でのケミカルプレストレス効果に関する検討も必要である。

### 3. 3 ひび割れ面での応力伝達特性の影響

解析要因に、図-2 に示す3種類の引張軟化特性 (N, Cr1, Cr2) を用いた場合での、曲げ破壊先行型の梁 (F) の荷重-変位関係を図-6 に示す。また、図-7 に Cr1, Cr2 シリーズの F に関する終局時のひび割れひずみベクトル分布を示す。

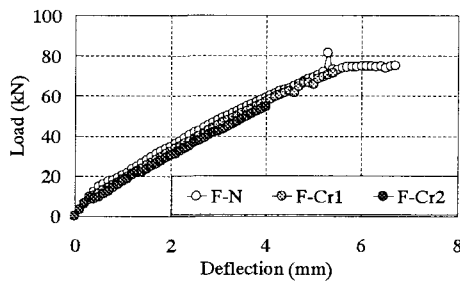
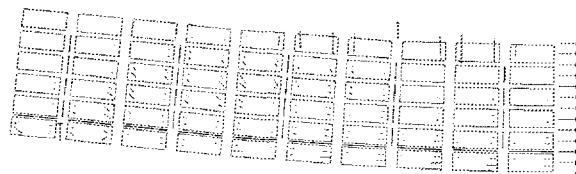


図-6 荷重-変位関係 (N, Cr1, Cr2 Series)  
(曲げ破壊先行型 (F))



(a) 曲げ破壊先行型-劣化度1 (F-Cr1)



(b) 曲げ破壊先行型-劣化度2 (F-Cr2)

図-7 終局時のひび割れひずみベクトル (Cr1, Cr2 Series)  
(曲げ破壊先行型 (F))

ひび割れ間での応力伝達を低減させた G シリーズは、その劣化度に比例して、その部材剛性ならびに耐力が低下している。また、部材の破壊モードは、Cr1 シリーズでは曲げ破壊、Cr2 シリーズではせん断破壊と、特に引張軟化特性およびせん断保有率を考慮しない Cr2 シリーズに関しては、N シリーズとは破壊モードが異なる結果となった。

以上の解析結果から、ひび割れ間での応力伝達特性の劣化は RC 梁の部材剛性や終局耐力に影響を与えることが確認できた。しかし、上述したコンクリートの圧縮強度特性の影響に関する考察とも関連し、ASR 膨張により発生したひび割れ間での応力伝達特性、ならびに構造内部でのケミカルプレストレス効果に関する検討も必要である。

### 3. 4 補強材とコンクリート間の付着特性の影響

#### (a) せん断破壊先行型の RC 梁

解析要因に、図-3 に示す3種類の付着応力-すべり関係 (N, D1, D2) を用いた場合での、せん断破壊先行型の梁 (S) の荷重-変位関係を図-8 に示す。また、図-9 に D1, D2 シリーズの S に関する終局時のひび割れひずみベクトル分布を示す。

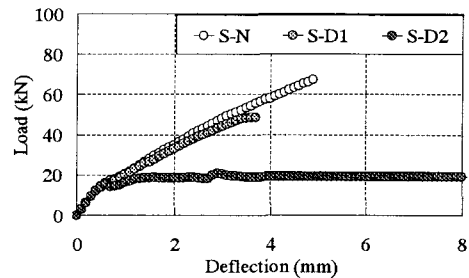
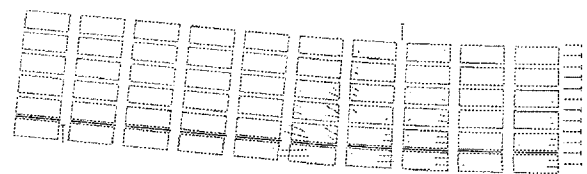
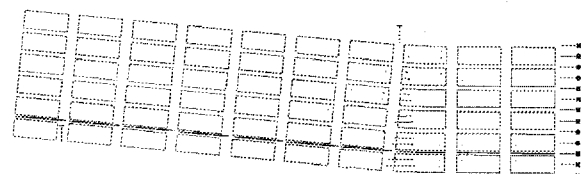


図-8 荷重-変位関係 (N, D1, D2 Series)  
(せん断破壊先行型 (S))



(a) せん断破壊先行型-劣化度1 (S-D1)



(b) せん断破壊先行型-劣化度2 (S-D2)

図-9 終局時のひび割れひずみベクトル (D1, D2 Series)  
(せん断破壊先行型 (S))

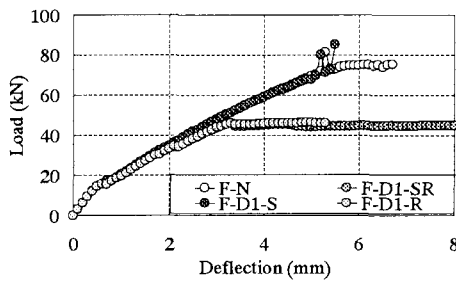
補強材とコンクリート間の付着応力-すべり関係を低減させた D シリーズは、その劣化度に比例して、その部材剛性ならびに部材の終局耐力の低下が確認できる。また、部材の破壊モードは、D1, D2 の両シリーズ共に曲げ破壊し、N シリーズの破壊モードとは異なる結果となった。特に D2 シリーズでは、明確な

破壊位置が確認できない結果となった。

終局時のひび割れひずみベクトル分布を比較すると、図-5 に示す S-N ではせん断スパン内に斜めひび割れが発生し、曲げスパン全域に曲げひび割れが分散していることが確認できる。一方、図-9 に示す S-D1, D2 では、載荷点直下近傍のひび割れが軸方向鉄筋の付着劣化により局所化し、曲げ破壊領域が載荷点直下近傍に集中する傾向が確認できた。

(b) 曲げ破壊先行型の RC 梁

解析要因として、曲げ破壊先行型の RC 梁 (F) において、軸方向鉄筋ならびにせん断補強鉄筋を①健全(N), ②軸方向鉄筋およびせん断補強筋が両方とも付着劣化(RS), ③軸方向鉄筋のみが付着劣化(R), ④せん断補強筋のみが付着劣化(S)の全4パターンとした。また、各々の付着劣化した鉄筋に用いた付着応力-すべり関係は、図-3 に示す D1 を用いた。本解析から得られた荷重-変位関係を図-10 に、また、SR, S, R の終局時のひび割れひずみベクトル分布を図-11 に示す。



S : せん断補強筋, R : 軸方向鉄筋の付着劣化  
 図-10 荷重-変位関係 (N, D1 Series)  
 (曲げ破壊先行型 (F))



(a) 曲げ破壊先行型-劣化度1-SR (F-D1-SR)



(b) 曲げ破壊先行型-劣化度1-S (F-D1-S)



(c) 曲げ破壊先行型-劣化度1-R (F-D1-R)

S : せん断補強筋, R : 軸方向鉄筋の付着軟化

図-11 終局時のひび割れひずみベクトル (N, D1 Series)  
 (曲げ破壊先行型 (F))

曲げ破壊先行型の RC 梁 (F) において付着劣化が生じた鉄筋の種類を変化させた場合、特に軸方向鉄筋の付着特性を軟化させた SR および R に関して、その部材剛性ならびに終局耐力の低下が確認できる。また、部材の破壊モードは、S は軸方向鉄筋降伏前のせん断破壊、SR および R は曲げ破壊し、N シリーズの破壊モードとは異なる結果となった。特に S はせん断補強鉄筋を有さない健全梁である S-N に近い終局耐力を示し、SR および R は明確な破壊位置が確認できない結果となった。

終局時のひび割れひずみベクトル分布を比較すると、図-5 に示す F-N では曲げおよびせん断スパン内に曲げひび割れの発生が確認できる。一方、せん断補強鉄筋が付着劣化した S は、図-5 に示す S-N に近い結果となった。また、軸方向鉄筋が付着劣化した SR および R は、載荷点直下近傍のひび割れが軸方向鉄筋の付着劣化により局所化し、曲げ破壊領域が載荷点直下近傍に集中する傾向が確認できた。

4. まとめ

本研究は、ASR による材料劣化を考慮した各種構成則の変化が、RC 構造物の耐力、変形および破壊モードに及ぼす影響に関して、パラメトリック解析を試みたものである。

本研究結果から、以下の知見が得られた。

- (1) コンクリートの応力-ひずみ関係ならびにひび割れ間での応力伝達特性の劣化は、RC 梁の部材剛性や終局耐力に影響を与えることが確認できた。
- (2) せん断破壊先行型の RC 梁において、軸方向鉄筋が付着劣化した場合、その付着劣化の程度により梁の破壊モードがせん断破壊から曲げ破壊にシフトする結果となった。
- (3) 曲げ破壊先行型の RC 梁において、軸方向鉄筋が付着劣化した場合、その部材耐力ならびに破壊モードに大きな変化が生じた。よって劣化した RC 構造物の力学的挙動を推定する場合、軸方向鉄筋の付着特性の解明が重要となる。
- (4) 既往の研究では、コンクリートの特性値が低下した段階においても、部材の力学的挙動に大きな変化が確認されないとの報告があるため、今後は構造内部でのケミカルプレストレス効果に関する検討が必要である。

参考文献

- 1) 例えば、阪神高速道路公団、財団法人 阪神道路管理技術センター、アルカリ骨材反応に関する調査研究 委員会報告、1986。
- 2) 例えば、阪神高速道路公団、財団法人 阪神道路管理技術センター、アルカリ骨材反応に関する調査研究 委員会報告 (その2)、1990。
- 3) 阪神高速道路公団、財団法人 阪神道路管理技術センター、注入樹脂の適性実験、アルカリ骨材反応に関する調査研究 委員会報告 (その2)、pp.145-161, 1990。
- 4) The Institution of Structural Engineers, Structural effects of alkali-silica reaction Technical guidance on the appraisal of existing structures, pp.17, 1992。