

論文 格子モデル解析による損傷 RC はり部材のせん断耐荷機構の評価

鈴木 暢恵*¹・三木 朋広*²・二羽 淳一郎*³

要旨：損傷した RC はり部材のせん断耐荷機構を把握するため、格子モデルを用いて解析的に検討した。格子モデルはトラス要素で構成された簡便な解析モデルである。本研究では、実験の鉄筋腐食の程度を、鉄筋の断面欠損、および主鉄筋とコンクリートの付着劣化として解析に反映させた。その結果、鉄筋腐食の程度が大きくなるにつれ、はりのせん断耐力が上昇し、せん断破壊モードから曲げ破壊モードへ移行する傾向を解析的に説明できた。

キーワード：腐食、せん断、RC はり部材、付着性能、接合要素、格子モデル

1. はじめに

近年、劣化状況の異なる既設構造物に対し、適切な維持管理プロセスの構築が求められている。鉄筋コンクリート(RC)構造物においては、塩化物イオンの浸透を原因とした鉄筋腐食による早期劣化が問題となっている。既往の研究¹⁾により、鉄筋の腐食膨張圧に起因する鉄筋に沿った縦ひび割れといったコンクリートの劣化、およびそれとともに鉄筋とコンクリートの付着劣化によって、曲げ耐力は腐食による断面欠損以上に低下すると指摘されている。その一方で、松尾ら²⁾は、せん断耐荷性能に関して、鉄筋腐食によりせん断耐力が増加し、せん断破壊モードから曲げ破壊モードとなることを報告している。

維持管理手法を決定する上で、解析的な手法は、有効なアプローチの一つである。富田ら³⁾は、鉄筋腐食によって劣化した RC 部材の耐力、ならびに変形挙動について、剛体-ばねモデルを用いて予測可能であることを明らかにしている。

本研究では、さらに簡便な手法の確立を目指し、格子モデル⁴⁾を用いた静的解析を行い、マクロ的な耐荷機構の検討を試みた。格子モデルは、RC 部材を軸力のみを伝えるトラス要素に離散化しているため、力の流れを容易に特定できる簡便な解析モデルである。格子モデルに、より現実的な材料モデルを適用することによって、十分な精度の

解析結果を得ている。著者らのこれまでの研究⁵⁾では、主鉄筋およびせん断補強筋の断面欠損を考慮することに加え、主鉄筋とコンクリートの節点を別々に設け、新たにせん断ばねと垂直ばねによる接合要素を用いることによって、鉄筋腐食が RC はり部材の曲げ耐荷性能、および変形性能に与える影響が評価できることを確かめた。そこで本研究では、鉄筋の断面欠損率と付着劣化の程度を関連付けた加藤らの研究⁶⁾を参考として、鉄筋腐食した RC はりの解析でこれまで不十分であった、せん断ばねの付着モデルを決定した。さらに、松尾らの RC はり²⁾のせん断耐荷機構を評価することを目的とした。

2. 解析モデル

2.1 格子モデルの概要

格子モデル⁴⁾は、図-1に示すように離散化されたトラス要素から構成される。また、コンクリートの斜め圧縮部材および斜め引張部材を規則的に配置し、さらに端部節点以外で変位が独立なアーチ部材を組み込んでいる。図-2は、格子モデルにおけるコンクリート部材断面区分の概念図である。はりのコンクリート部分を図-2に示すように、トラス部分とアーチ部分に区分する。それぞれの要素の幅は、アーチ部分を bt 、トラス部分を $b(1-t)$ ($0 < t < 1$) とする。ここで、 t 値は、部材幅 b

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助手 博士(工学)(正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博(正会員)

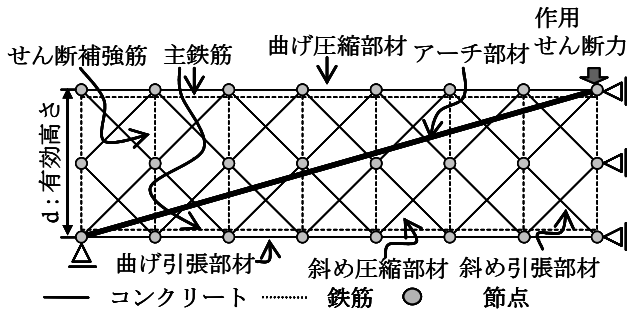


図-1 RCはりに対する格子モデル概略図

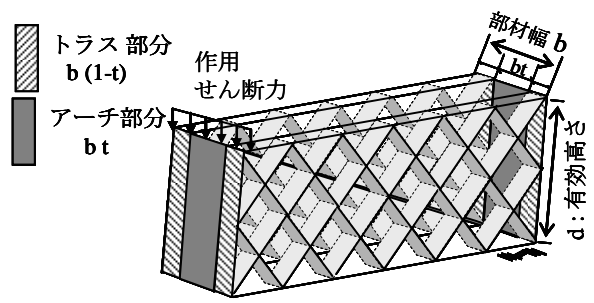


図-2 格子モデル断面区分の概略図

に対するアーチ部分の割合として定義し、部材の初期状態における全体のポテンシャルエネルギーが最小となるように定めている。

2.2 各要素の構成則

(1) コンクリートモデル

斜め圧縮部材およびアーチ部材に対して、せん断補強筋による拘束効果を考慮するために、圧縮包絡線には、Manderらが提案した圧縮応力 σ'_c - 圧縮ひずみ ε'_c 関係⁷⁾を採用した。さらに、ひび割れたコンクリートの引張ひずみ ε_t の増加にともなう、直交方向の圧縮強度の軟化挙動を、Vecchioらが提案したモデル⁸⁾を用いて考慮した。曲げ圧縮部材には、前川らのモデル⁹⁾を採用した。ただし、曲げ圧縮部材については、圧縮軟化の影響は考慮していない。コンクリートの曲げ引張部材には、ひび割れ発生後には岡村・前川のモデル¹⁰⁾を用いて、鉄筋とコンクリートの付着の影響を考慮した。一方、斜め引張部材には、鉄筋の付着作用が影響しないと仮定し、コンクリート特有の脆性的な軟化挙動を表現するために、引張軟化曲線として1/4モデル¹¹⁾を適用した。内部履歴モデルには、長沼らのモデル¹²⁾を参考とした履歴曲線を使用した。

(2) 鉄筋モデル

鉄筋の応力-ひずみ関係には、引張応力域においては、前川らが提案した、ひび割れたコンクリート中の鉄筋の平均化構成モデル⁹⁾を用いた。一方、圧縮応力域ではバイリニアモデルを用いた。

2.3 主鉄筋とコンクリート接合要素のモデル化

本研究では、主鉄筋とコンクリートの曲げ引張部材の節点を独立させ、付着応力を伝達するためのモデル化を行った。詳細を以下に示す。コンク

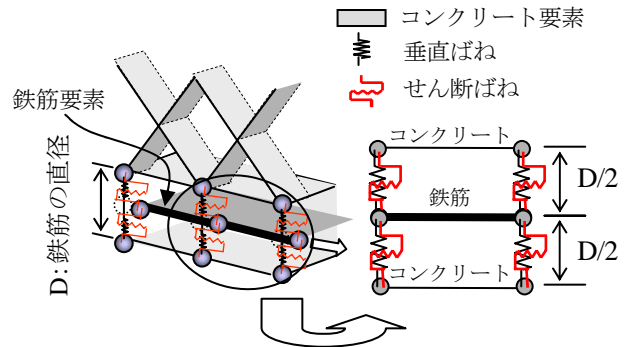


図-3 接合要素の概要

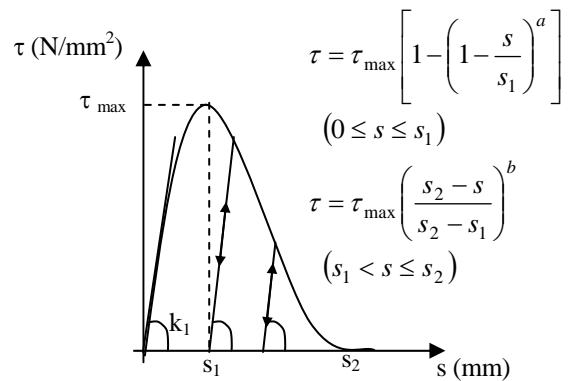


図-4 せん断ばねの付着特性

リート要素と鉄筋要素は、図-3に示すように、鉄筋要素をコンクリート要素で挟むように配置した。接合要素の厚みには、鉄筋の直径Dを用いた。鉄筋要素とコンクリート要素は、垂直応力を伝達する垂直ばねとせん断応力を伝達するせん断ばねで結合し、それぞれのばねに材料特性を付与した。垂直ばねはコンクリートのヤング係数を用いた弾性体とした。せん断ばねは、鉄筋の表面積全体に付着応力が一様に作用するものとして、付着応力に鉄筋の表面積を乗じ、付着力とすべり量s (mm)の関係に置き換えた。本研究では、最大付着応力 τ_{max} 、その時の鉄筋とコンクリート間の変位 s_1 、付着応力が完全にゼロとなる時の変位 s_2 を

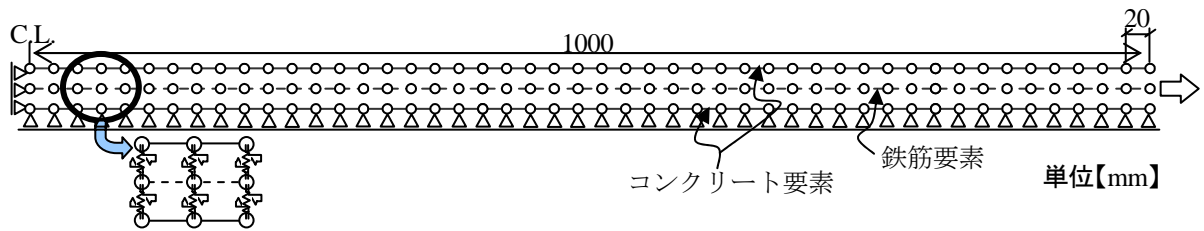


図-5 解析モデル

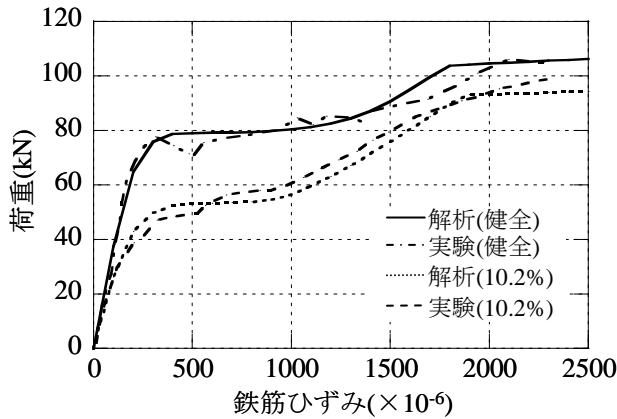


図-6 実験結果とのフィッティング

パラメータとした，図-4に示す付着特性を用いた。このとき，付着剛性 k_1 は， s_1 ， τ_{max} から決定される。図-4の式中，指数 a ， b は定数とし，それぞれ $a=1$ ， $b=4$ とした。 τ_{max} ， s_1 ，および s_2 の決定方法を次節で述べる。

2.4 せん断ばねの材料モデル

鉄筋とコンクリート間の付着劣化に関する実験と格子モデル解析の結果を比較することで，せん断ばねの材料モデル中の各種パラメータを同定していく。このために，加藤ら⁶⁾によって行われた，腐食程度の異なる両引き試験を解析対象とした。試験体は， $200 \times 150 \times 2000$ mm のコンクリート(圧縮強度 39 N/mm^2)の中央に，D19(降伏強度 362 N/mm^2)の鉄筋1本を埋め込んだものである。端部鉄筋を露出させることによって，鉄筋に直接引張力を作用させている。本研究では，試験体を図-5に示すように，格子の一边を 20 mm としたコンクリート要素と鉄筋要素を用いて，1/2対称2次元モデルに離散化し，2.3で示した接合要素で両節点間を連結した。図-6に示すように，解析結果が腐食量の異なる実験の荷重-鉄筋ひずみ関係と適合するように，せん断ばねのパラメータ τ_{max} ， s_1 ， s_2 の最適解を求めた。この結果，パラメータはそれぞれ表-1に示すようになった。腐食

表-1 せん断ばねパラメータ値

| 試験体の状態 | 鉄筋断面欠損率(%) | τ_{max} (N/mm ²) | s_1 (mm) | s_2 (mm) |
|--------|------------|-----------------------------------|------------|------------|
| 健全 | 0 | 6.0 | 0.1 | 0.6 |
| 腐食 | 0.8 | 4.0 | 0.1 | 0.8 |
| | 5.3 | 3.0 | 0.1 | 0.8 |
| | 10.2 | 2.5 | 0.1 | 0.8 |

試験体において， s_1 ， s_2 をそれぞれ 0.1 mm ， 0.8 mm と固定し，鉄筋の断面欠損率を x としたとき， τ_{max} は式(1)を用いることで評価可能であった。以後の解析では，このようにして，鉄筋断面欠損率とせん断ばねの材料パラメータ，すなわち付着劣化程度の関連付けを行うこととする。

$$\tau_{max} = -0.16x + 4 \quad (1)$$

ただし， x は主鉄筋の断面欠損率(%)であり，腐食試験体に限り適用する。

3. 損傷 RC はり部材のせん断耐荷機構の評価

3.1 解析の概要

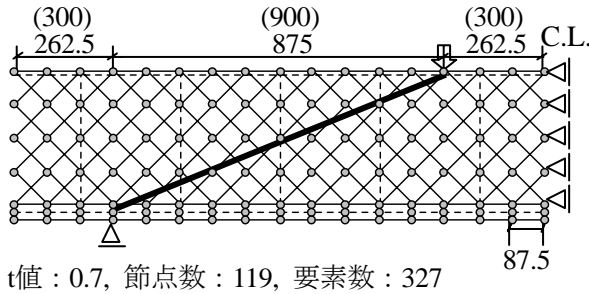
解析対象には，松尾らによって行われた，短期間に実現現象の腐食を概ね模擬できるとして一般的な電食により鉄筋を腐食させた RC はり部材のせん断実験²⁾を選定した。図-7に試験体の1/2対称2次元格子モデルを示し，寸法および荷重位置などの詳細を記す。括弧内の数値は試験体寸法である。試験体は $200 \times 400 \times 3000$ mm，有効高さは 350 mm ， $a/d=2.5$ となっている。主鉄筋(D22)を2本配置し，試験区間 2400 mm が $3\% \text{ NaCl}$ 溶液に浸漬され，直流電流 15 A で通電されている。材料特性を表-2に示す。実験のパラメータであるせん断補強筋の有無および通電時間を試験体名に記しており，たとえば A-72h はせん断補強された RC はりに 72 時間通電したものである。せん断補強筋は，D6 を 300 mm 間隔で配置している。解析対象とした実験ケース，および式(1)で算出したせん断ばね

表-2 材料特性

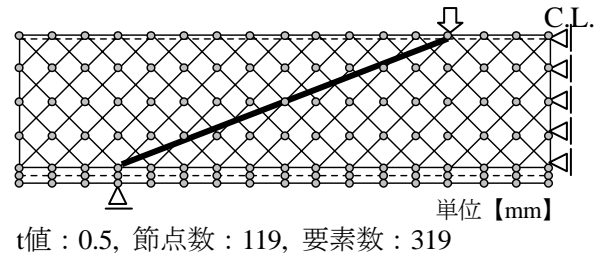
| コンクリート | |
|-----------------------------|------|
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 47.8 |
| ヤング係数 (kN/mm ²) | 36.4 |
| 主鉄筋(2D19) | |
| 降伏強度(N/mm ²) | 429 |
| ヤング係数 (kN/mm ²) | 191 |
| せん断補強筋(10D6) | |
| 降伏強度(N/mm ²) | 279 |
| ヤング係数 (kN/mm ²) | 191 |

表-3 解析パラメータ値

| 試験体名 | 実測鉄筋断面欠損率 (%) | | 算出 τ_{max} (N/mm ²) |
|--------|---------------|--------|---|
| | 主鉄筋 | せん断補強筋 | |
| A-0h | 0 | 0 | 完全付着 |
| A-36h | 1.3 | 21.3 | 3.8 |
| A-72h | 2.8 | 38.0 | 3.55 |
| A-144h | 10.6 | 52.9 | 2.3 |
| N-0h | 0 | | 6.0 |
| N-36h | 3.5 | | 3.4 |
| N-72h | 7.3 | | 2.83 |
| N-144h | 24.4 | | 0.16 |



(a) せん断補強筋あり (Aシリーズ)



(b) せん断補強筋なし (Nシリーズ)

図-7 解析モデル

の最大付着応力 τ_{max} を表-3に示す。解析では、実験の主鉄筋およびせん断補強筋の腐食を図-8に示すような、両鉄筋の断面欠損、主鉄筋とコンクリート界面の付着劣化として考慮した。さらに、Aシリーズでは、せん断補強筋要素の端部1要素を取り除くことによって、せん断補強筋の主鉄筋位置の隅角部での定着不良を表現し、解析結果に反映した。腐食区間は実験を模擬し、図-8のように、支点から端部までは健全な試験体と同条件とし、その他の部分に対して上記のように腐食現象を考慮することとした。

3.2 解析結果および解析的検討

(1) せん断力-変位関係の比較

図-9に解析によって得られたせん断力-荷重点変位関係と実験結果の比較を示す。さらに、解析での主鉄筋の降伏開始点(Y)およびアーチ部材の軟化開始点(C)も示す。主鉄筋降伏開始前に、斜めひび割れ面でのせん断力の低下を表現するアーチ部材の圧縮軟化が生じたとき、解析では斜め引張破壊を示している。得られた解析結果の破壊モードならびに実験の破壊モードも記す。解析結果は実験結果を良好に予測できている。せん断補強筋がないNシリーズの場合、腐食が進行するとともに、せん断耐力の上昇が確認できる。さらに、実験結

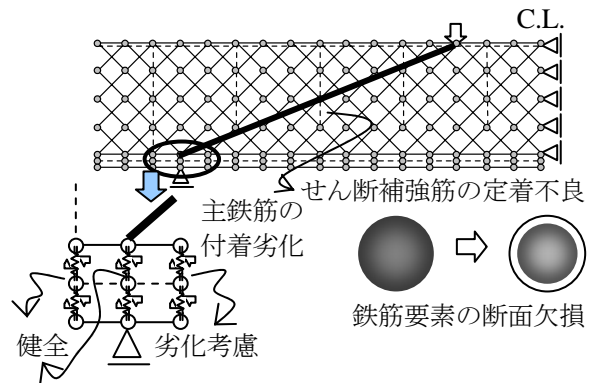


図-8 腐食現象の考慮

果および解析結果ともに、N-72h、N-144hでは、主鉄筋が降伏し、曲げ破壊形態を示した。またN-144hはN-72hと比較し、曲げ耐力は低下していた。これは、主鉄筋の断面欠損量が大きいため、降伏荷重が低下したためである。せん断補強筋があるAシリーズも同様に、腐食程度の進行に伴ってせん断耐力は上昇し、実験および解析ともにA-144hで曲げ破壊を示した。

(2) せん断力の分担

Aシリーズに関して、はりのせん断耐荷機構で支配的なコンクリートの斜め引張部材、アーチ部材、およびせん断補強筋の作用せん断力の分担の程度を考えることとした。図-10に示すように、せん断スパン中央で格子モデルのフリーボディを考える。この場合、コンクリート貢献分 V_c は、コ

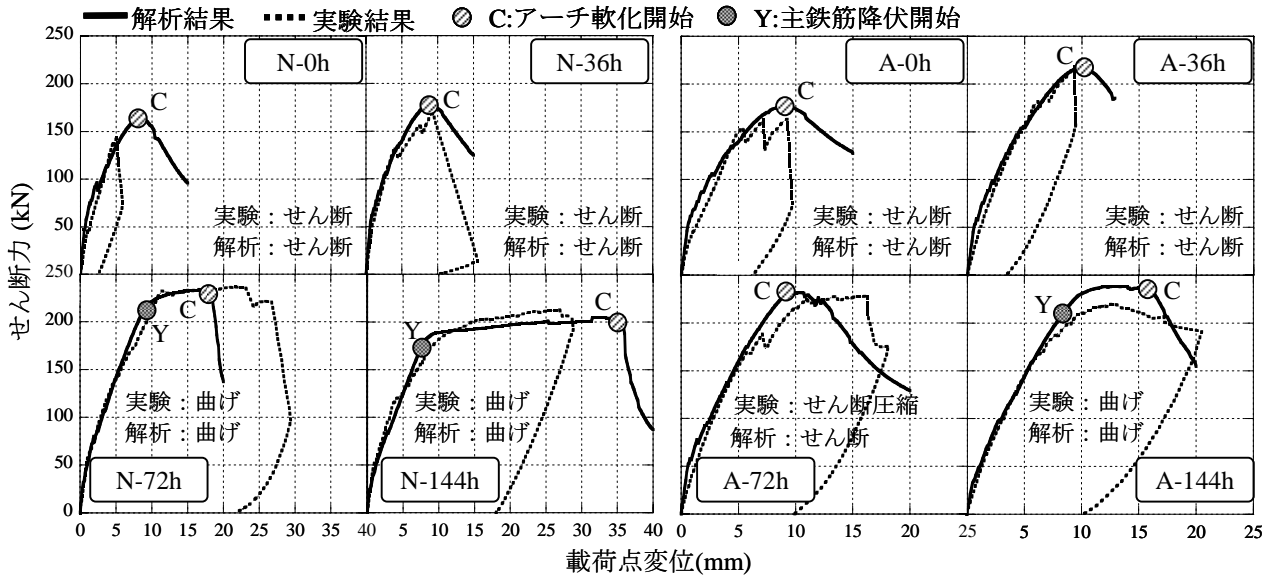


図-9 せん断力-荷点変位関係の比較

表-4 せん断力の分担 (解析結果)

| 試験体名 | V_{dia} (斜めひび割れ発生時) (kN) | V_s (降伏時) (kN) | V_{arch} (最大耐力時) (kN) |
|--------|----------------------------|------------------|-------------------------|
| A-0h | 24.4 | 31.6 | 139.4 |
| A-36h | 18.2 | 27.4 | 181.6 |
| A-72h | 15.6 | 21.6 | 192.5 |
| A-144h | 14.0 | 16.4 | 208.5 |

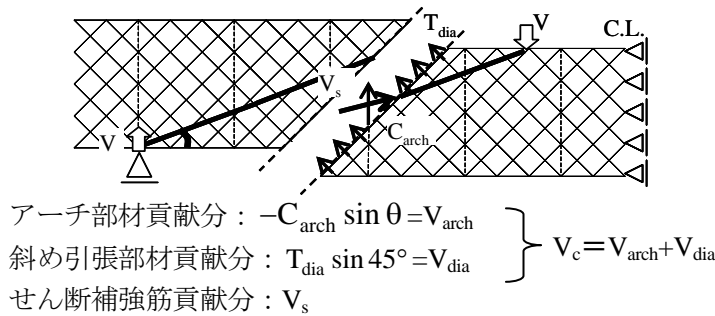


図-10 格子モデルのフリーボディと各部材力

コンクリートの斜め引張部材とアーチ部材の抵抗力から構成される。一例として、図-11にA-0hならびにA-144hの作用せん断力の分担力 V_s および V_c を記す。また表-4に各試験体の、任意の斜め引張部材が最初に引張強度に達する斜めひび割れ発生時の V_{dia} 、せん断補強筋の降伏開始時の V_s 、および V_{arch} の最大分担力を示す。A-0hでは、斜めひび割れ発生後、 V_s は増加していく。せん断補強筋が降伏するとほぼ同時にアーチ部材が圧縮軟化し始め、せん断力は急激に低下する。一方、A-144hでは、せん断補強筋降伏時の V_s は表-4からA-0hと比較して小さくなっていることが確認できる。しかし、せん断補強筋の降伏後も V_c

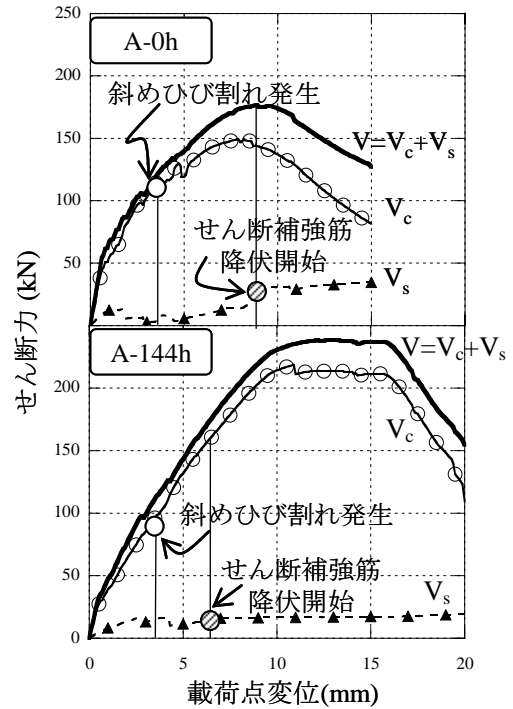


図-11 せん断力の分担評価

は増加し続け、最終的には曲げ破壊に至っている。表-4から、腐食程度の増加にともなって、 V_{dia} 、 V_s は減少する傾向が見られた。 V_s に関しては、腐食による断面欠損、および定着不良によって十分に性能を発揮していないことが原因である。また、 V_{dia} に関しては、主鉄筋とコンクリート界面の付着劣化およびせん断補強筋の定着不良に起因するものであると考えられる。

図-12にAシリーズの各試験体のアーチ部材貢献分 V_{arch} を示す。この図から、腐食程度が進行するにつれて、アーチ部材の貢献分が増加してい

くことが確認できる。既往の研究¹³⁾では、せん断スパン内の主鉄筋の付着を除去した RC はりでは、タイドアーチ効果が発揮されることによって、せん断耐力が向上することが報告されている。今回対象とした試験体では、腐食程度の増加に従って、主鉄筋とコンクリートの付着性能が大きく低下している。加えて、支点および主鉄筋の定着が健全な状態である。その結果、タイドアーチ効果を明確に発揮して、せん断耐力が増加することが解析結果から確認できた。その一方で、主鉄筋の断面欠損率は大きくなり、その結果曲げ耐力は低下していく。そのため、主鉄筋の腐食程度の大きい場合では、曲げ耐力がせん断耐力を下回るようになり、鉄筋が健全な時にはせん断破壊した RC はりが、曲げ破壊に至るということがわかった。

4. まとめ

本研究では、鉄筋腐食によって劣化した RC はりに関する実験を対象として、格子モデルを用いて解析的に検討した。以下に結論を示す。

- (1) 異なる鉄筋腐食程度の RC 部材の両引き試験の結果から、主鉄筋とコンクリートの付着劣化のモデルを同定した。さらに、このモデルを用いた解析によって、損傷 RC はりのせん断実験の結果を精度良く予測することができた。
- (2) 主鉄筋定着部が健全である場合、腐食が進行するにつれて、アーチ機構が強化されるためにせん断耐力が上昇することを、格子モデル解析から実証することができた。

謝辞：本研究で使用した実験のデータを提供頂きました港湾空港技術研究所 横田弘 LCM 研究センター長、加藤絵万博士、ならびに電力中央研究所 松尾豊史氏に心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 加藤絵万ほか：繰返し荷重を受ける RC はりの曲げ耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1849-1854，2003.7
- 2) 松尾豊史ほか：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究，コンクリート工学論文集，

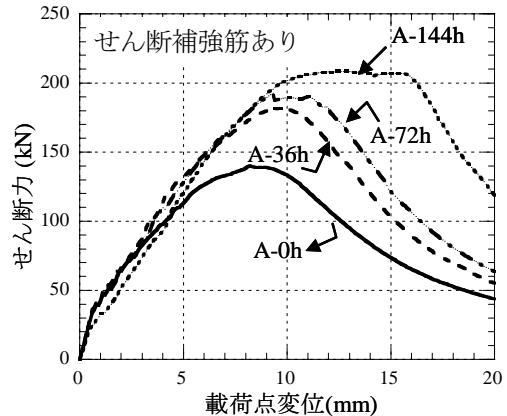


図-12 アーチ部材の分担せん断力の比較

Vol.15, No.2, pp.69-77, 2004.5

- 3) 富田充宏ほか：鉄筋腐食により劣化した RC はりの剛体-ばねモデルによる非線形解析，土木学会論文集，No.584/I-42，pp.267-276，1998.1
- 4) 二羽淳一郎ほか：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究，土木学会論文集，No.508/V-26，pp.79-88，1995.2
- 5) 鈴木暢恵ほか：鉄筋の腐食による劣化を考慮した RC 部材の格子モデル解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.97-102，2005.6
- 6) 加藤絵万ほか：鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1044，2003.3
- 7) Mander, J. B. et al.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, August, 1988.
- 8) Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, Mar./Apr., 1986
- 9) 前川宏一ほか：擬似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.732/V-59，pp.63-76，2003.5
- 10) 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，1991.5
- 11) 内田裕市ほか：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，No.426/V-14，pp.203-212，1991.2
- 12) 長沼一洋ほか：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，No.536，pp.135-142，2000.10
- 13) 池田尚治ほか：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文集，No.293，pp.101-109，1980.1