

## 論文 定着部に損傷を有する RC 梁のせん断耐荷機構

千々和 伸浩<sup>\*1</sup>・GEBREYOUHANNES Esayas<sup>\*2</sup>・藤山 知加子<sup>\*3</sup>・前川 宏一<sup>\*4</sup>

**要旨**：鋼材腐食によるひび割れを模した人工損傷を主鉄筋定着部に導入した数種の梁を作成し、静的載荷実験を行った。初期欠陥・損傷の無い健全部材では殆ど経験しないような大開口を呈するひび割れが進展しつつ、終局限界状態に至る部材が見られた。この場合、低拘束・大ひび割れ幅にも対応可能なせん断伝達モデルが求められることから、既往の拡張接触面密度関数モデルを数値解析に導入した結果、初期損傷部材の耐荷力がほぼ予測可能となった。ただし、最大耐力以後の残存耐荷機構は幾分、過大評価される傾向にあることが判った。

**キーワード**：せん断伝達，定着部損傷，鋼材腐食，RC 梁

## 1. はじめに

設計供用期間中にわたって初期設計性能が発揮され続けることを担保した上で、構造設計が行なわれるのが一般的である。そのために耐久設計を構造設計とあわせて実施することを、コンクリート標準示方書は規定している。

しかし、種々の要因から、設計では想定していない劣化損傷が進行している実構造物も少なく無い。劣化進行の著しいものでは、供用期間半ばにも関わらず、設計構造性能が発揮できなくなってしまうケースも稀であるが発生しつつあり、事後の補修・補強がなされる。多くの補修・補強対策では、劣化損傷要因を取り除き、性能を元通りに回復することを主眼として行われてきたといえよう。

しかし、構造性能が発揮される前段階で導入されたひび割れなどの損傷が、条件によっては構造性能をさほど低下させず、かえって耐力等の性能向上が得られる場合もある<sup>1),2)</sup>。劣化損傷を除去あるいは修理するだけではなく、損傷を許容してそれを構造体の一部として制御することも、擁壁と柱との分離工法などでは考案されている。

損傷の存在を含めた部材の維持管理の可能性を拡張するには、部分的な損傷が構造系の性能に与える影響度を定量化し、その評価結果を有効利用する方法を整備することも、今後の維持管理の多様性を鑑みれば肝要と思われる。従来 of 構造解析手法は、初期状態において無損傷を前提として開発されたものといつてよいであろう。事前に損傷を有する構造部材の性能評価手法は、今日、開発の端緒にあるものと認識している。

初期損傷を有する構造の性能評価に関する研究の1つとして、Toongoenthong らによる研究<sup>2)</sup>では、せん断スパン内において鉄筋腐食が生じたケースを扱っている。これを受けて、本研究では鉄筋定着部に腐食等によるひび割れ劣化が発生し、定着能力が著しく損なわれたとみなせる模擬損傷を有する RC 梁を数種作成し、これに曲げ・せん断力を作用させる実験を行って、挙動解析の適合性と精度について検討を行なった。本研究は同内容の既往研究<sup>3)</sup>による実証結果をもとに、解析モデルの適合性に関して検討を深めたものである。

\*1 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

\*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

\*4 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授 工博 (正会員)

## 2. 実験詳細

### 2.1 供試体

定着部に鋼材腐食等の損傷を有する部材を模して、**図-1**で示す RC 梁を作製した。使用したコンクリートの骨材の最大寸法は 20mm であり、実験時の圧縮強度は 34.37MPa，引張強度は 2.70MPa であった。1mm 厚のスチレンボードを主鉄筋上に設置した状態でコンクリート打設を行い、模擬損傷面を構築している。

本研究では主筋のみの構造を基準とし、せん断スパン内にはせん断補強が無い 3 種類の供試体を用意した。供試体 1(s0cr1=せん断補強筋無，模擬損傷面有)は，定着部に損傷のみを有する梁，供試体 2(se1cr1=定着部にせん断鉄筋配置，模擬損傷面有)は，定着部の模擬損傷部にせん断補強筋が配置されているもの，供試体 3(sb1cr1=主鉄筋単部折曲げ定着有，模擬損傷面有)は全て両端を曲げ上げた主筋が配置されているものである。せん断筋などが定着部に鉛直配置される場合は，スチレンボードに穴を開けて貫通させている。

なお供試体 1 について損傷がないとした場合 s0cr0=せん断補強無)，土木学会コンクリート標準示方書式に従って導出したこの梁の曲げ耐力は 409kN，せん断耐力は 154kN である。

### 2.2 実験

荷重実験は中央 1 点荷重で変位制御によって行った。荷重速度は 0.2mm/min である。支点条件は**図-1**の供試体 1 で示すように，両端が回転を許容するローラー支持であり，荷重点の摩擦により水平方向を拘束している。

### 2.3 実験結果

損傷が無いとした場合の梁(s0cr0)の解析結果を含めた，全実験結果を**図-2**に示す。

#### (1) 供試体 1 (s0cr1)

無損傷と仮定した場合の耐力推定値 154kN の 52%に相当する 80kN で，片側の模擬損傷の先端と荷重点との間にひび割れが貫通(**図-3-①**)し，ほぼ同時にせん断破壊して終局に到った。破壊までは，損傷のない場合の荷重-変位関係(解析値)と同じ経路を通り，破壊後は反力が 15kN まで急

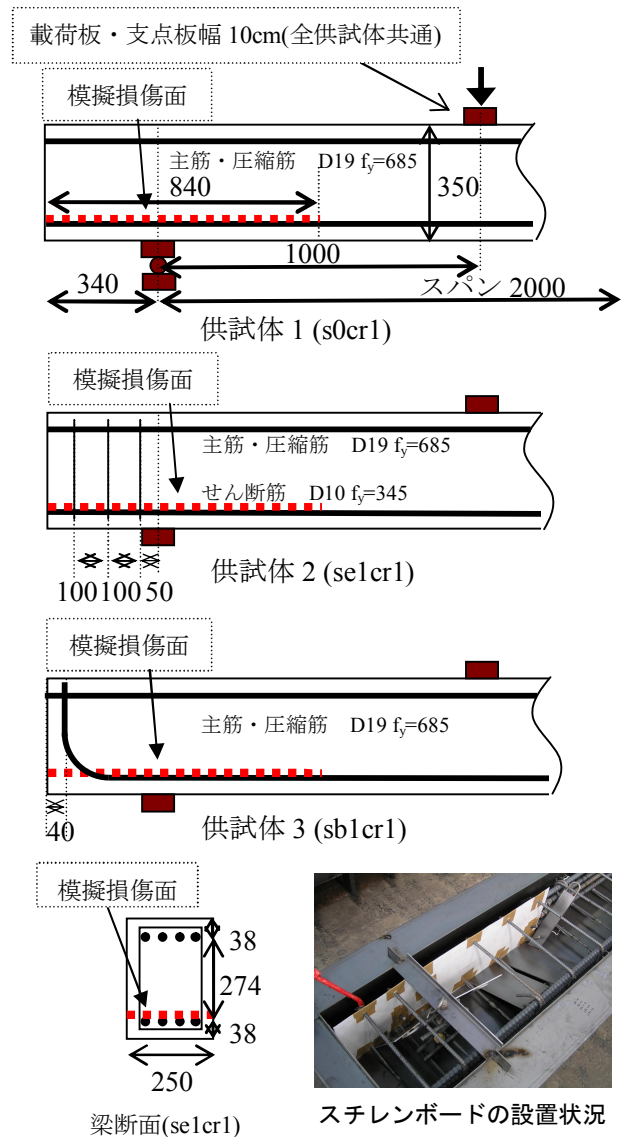


図-1 供試体配筋図

落した。

#### (2) 供試体 2 (se1cr1)

供試体 1 と同様の挙動で 80kN まで達した後，片側の人工損傷の先端と荷重点との間にひび割れ(**図-3-②**)が貫通し，反力が部分的に急落したものの，再び反力が増加に転じ，再び 80kN まで達したときに，先にひび割れが貫通した側と逆側でひび割れ(**図-3-③**)が進展し，再度反力が急落した。その後もまた耐荷力が漸増し，約 80kN まで達したあたりで横ばい状態となり，以降は 60kN 程度の反力を維持しながら 18mm 程度までの非常に大きな終局変位を示した。この間には**図-3-④**に示すひび割れが進展している。最終的には実験機器の計測範囲を超えるため実験は途中で中止したが，この段階においても，耐荷機構は

安定していたと思われる。

最初に表れる最大耐力 (80kN)で斜めひび割れの貫通と、それに伴う模擬損傷面でのせん断ずれが発生したが、このずれがせん断筋によって拘束され、耐荷機構が直ちに再構築されることで、再び反力が増加しはじめたと考えられる。しかし再度、最大耐力 (80kN)に達すると、先にひび割れが貫通したスパンとは逆側の端部でひび割れが貫通し、ここでもせん断筋による耐荷機構の再構築が行われたと推定される。以降はせん断筋の模擬損傷面でのダボ作用によって、この面での大きなずれを許容しながら耐荷機構を維持し、梁全体は大きな鉛直変位を許容しながら反力を約 60kN 前後で維持し続けたと考えられる。なお最大変位時の最大ひび割れ開口幅は、模擬損傷面先端付近で 5mm 程度であった。

### (3) 供試体 3 (sb1cr1)

70kN 程度で斜めひび割れが貫通(図-3-⑤)し、多少剛性は低下するものの、反力は漸増し、80kN で反対側にも斜めひび割れ(図-3-⑥)が貫通した。再び剛性回復と反力の増加を迎え、最終的に無損傷の場合の最大耐力と推測される 154kN の約 84%である 130kN に達した。最大耐力以後は反力が 80kN まで落ちた後、なだらかに反力を低下させながら 12mm 程度の変位に達し、そこで圧縮筋が座屈を起こして、圧縮筋に沿ったひび割れ(図-3-⑦)が発生し反力の急落を迎えた。

一連の経過を機構の観点から推察するに、まず 70kN で斜めひび割れの貫通とそれに伴う模擬損傷面でのずれが発生した。このときひび割れが発生した側の端部では曲げ上げられた主筋がずれを強力に拘束しており、それによって反力をほぼ維持したまま、耐荷機構が速やかに再構築される。この機構により再度、反力は増加に転じ、80kN 達したところで、今度は先にひび割れが貫通したのと逆側でひび割れが貫通する。こちらの端部でも曲げ上げた主筋の強力な拘束による速やかな耐荷機構の再構築が行われ、結果として両端の主筋曲げ上げ部の拘束力によってタイドアーチ機構が構成されることになる。こ

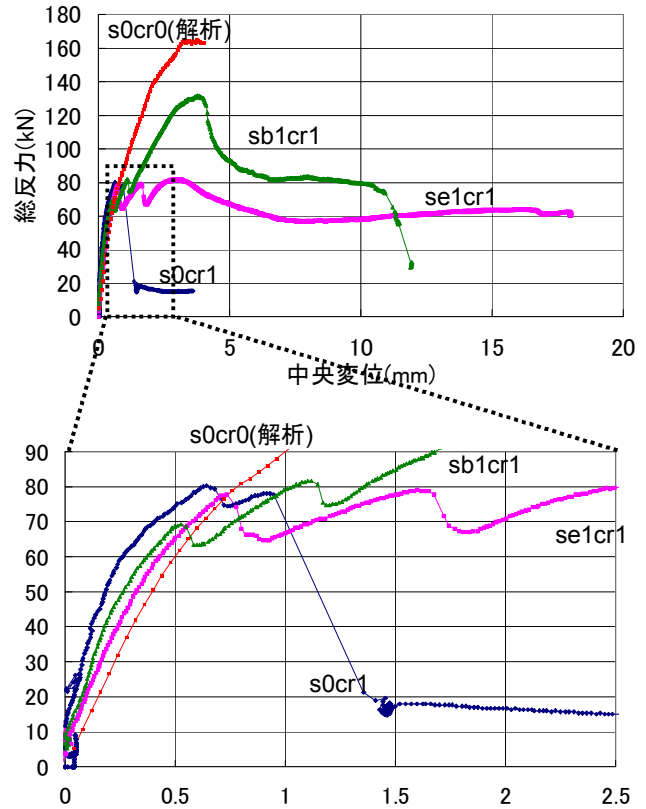


図-2 荷重変位グラフ(下は部分拡大)

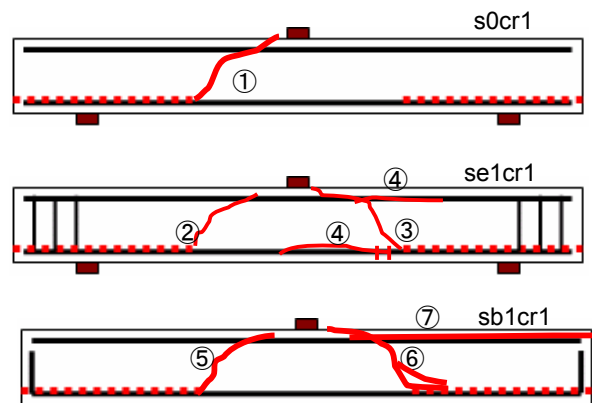


図-3 ひび割れ状況

の機構により反力はさらに増加し、ついにピーク荷重 130kN に到るものの、この点で主筋曲げ上げ部が限界に達し、ずれ拘束力が低下したことでタイドアーチ機構が徐々に崩壊したと思われる。供試体 2 でせん断筋のダボ作用によってずれを拘束して反力を発揮したように、この梁では主筋曲げ上げ部の模擬損傷面でのダボ作用によって、中央変位が伸びながら反力を発揮する形になる。最後は主筋曲げ上げ部のずれ拘束力が大きかったことで圧縮筋が座屈を起こし、上面コンクリートが破壊されたことで反力が急

速減少する。これに対し、先に述べた供試体 2 ではずれの拘束力が小さかったため座屈モードに入らなかった。

なお最大変位時の最大ひび割れ開口は模擬損傷面先端付近で幅は 2mm 程度である。ただしその箇所は模擬損傷途中からひび割れが分岐しており、供試体 2 のような厳密な損傷の先端からではない(図-3-⑥)。

## 2. 解析

### 2.1 解析モデル

解析には多方向非直交ひび割れ群を考慮可能な鉄筋コンクリート 2 次元非線形有限要素解析 WCOMD<sup>4,5)</sup>を使用し、本実験を数値解析で再現することを試みた。本解析における鍵は、①模擬損傷の数値解析上での再現と、②大開口ひび割れ面でのせん断伝達特性の考慮である。

#### (1) 模擬損傷面の再現

模擬損傷面の再現には、柱と基礎の接合部におけるせん断ずれを扱うため、体積 0 の仮要素としてモデル化された摩擦接合要素モデルと、RC ひび割れ面を表現する RC 接合要素モデルとを用いた。ここで述べる摩擦接合要素とは、クーロン摩擦力をベースとした境界面でのずれの表現や、境界面のひび割れ開口による応力伝達の消失を表現できるものである。RC 接合要素とは、せん断筋が交差する境界面での鉄筋引き抜け(ひび割れ開口)や、凹凸を有するコンクリート破壊面上のせん断ずれへの抵抗性が表現できるものである。RC 接合要素はせん断筋や曲げ上げた主筋が模擬損傷面と交差する箇所に、摩擦接合要素はそれ以外の箇所の模擬損傷面に対応して配置することとした。

なお本実験でスチレンボードによって模擬損傷面を構築しており、現実の鉄筋腐食で発生する損傷面よりも極端に滑らかでせん断伝達も小さい。解析ではこの仮要素を構成するコンクリートの最大骨材粒径を非常に小さくし(0.1mm)、モデル上での骨材の咬み合わせを小さくすることでも、極小のせん断伝達を表現する

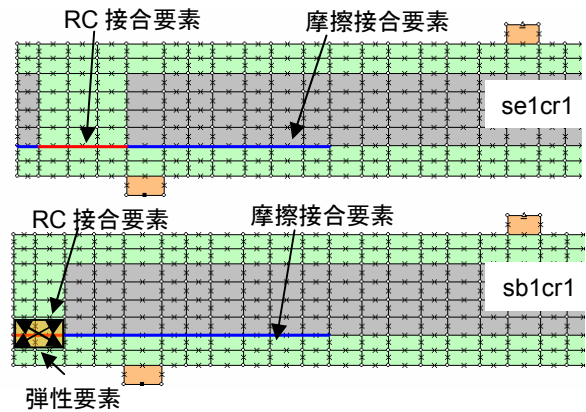


図-4 解析メッシュ(部分)

ようにした。容易にひび割れが入るように、この仮要素を構成するコンクリートの強度も 1MPa として解析を行なった。

#### (2) 大開口ひび割れ面でのせん断伝達表現

大開口ひび割れ面でのせん断伝達の表現には、Li らによる接触面密度関数(基本)モデルを拡張した Bujadham(拡張)モデル<sup>6)</sup>を採用した。このモデルは既往の接触面密度モデルの適用範囲を拡張し、ひびわれ面での一般化応力伝達に関して高精度化を図ったものである。従来モデルで陽な形でモデル化されていなかった接触点での摩擦異方塑性・局所破壊を、ひびわれ面の接触点近傍の変形モデルとして採用することで、モデルの適用範囲が拡張されたものである。従来モデルはひび割れ直交方向に強い拘束力があり、ひび割れ開口が比較的拘束されているケースで適合性が高いが、本研究のように拘束力が小さく、ひび割れ開口が極端に大きくなるケースでは、この拡張モデルがより高い精度を保持する。

### 2.2 解析結果

解析結果を図-5 に示す。

#### (1) 供試体 1(s0cr1)

このケースでは端部に損傷があるだけで、定着部に一切の補強がない。従って模擬損傷面は摩擦接合要素のみで代表した。解析と実験ともに、ほぼ同じ総反力で終局強度に至り、耐力以後は急速に耐力が低下する挙動が再現された。ただしピーク後、実験では 10kN 程度まで反力が低下するのに対して、解析ではピーク後に約 50kN の反力を維持しており、有為な差が生じている。

解析によるひび割れは図-6 に示すようにほぼ実験と同様の位置と方向を示している。また、A 部に示すように、模擬損傷面でのずれを再現できていることもわかる。

### (2) 供試体 2(se1cr1)

このケースでは端部の模擬損傷を貫通してせん断筋が配置されている。模擬損傷面は摩擦接合要素と RC 接合要素を併用して表現した。実験と同じ最大耐力点で剛性が大きく変わり、反力をほぼ維持したまま、変位が伸びていく、という類似の挙動を示した。ただし、ピーク後も中央変位が 10mm あたりになるまで、反力が高い水準を維持しており、実験値よりも耐荷システムを過大に見積もっている。しかし 15mm ほど変位した状態では実験解析ともに適合性が高い。

解析によるひび割れは図-6 に示すようにおおよそ同様の方向を示しているが、ひび割れの分布範囲が実験より幾分広い。なお、B 部では模擬損傷面でのずれを、C 部では模擬損傷先端部に特に集中的して鉛直方向のひび割れが開口していることが再現できていることが確認できる。

### (3) 供試体 3(sb1cr1)

このケースでは端部で曲げ上げられた主筋が人口損傷面を貫通して配置されており、これにより模擬損傷面におけるずれが強力に拘束されている。模擬損傷面は接合要素を組み合わせる表現するとともに、主筋による拘束効果を明確に表現するため、有限要素による離散化法として、模擬損傷面をまたぐ形で弾性体要素(鉄板に相当)を重ね、端部の 4 要素を拘束することとした。このケースでも実験と近い最大荷重値を示す結果を得た。ただしピーク反力における中央変位量が約 1mm 程度異なり、また最大耐力後の反力の低減率も実験ほどは高くなかった。

解析でのひび割れは図-6 に示すように分布範囲は実験よりも広がっているものの、実験同様にひび割れが模擬損傷面の途中から分岐して発していることを捕らえている。D 部では模擬損傷面の広い範囲に鉛直変位があることが認められるが、これもひび割れの分岐に対応している。

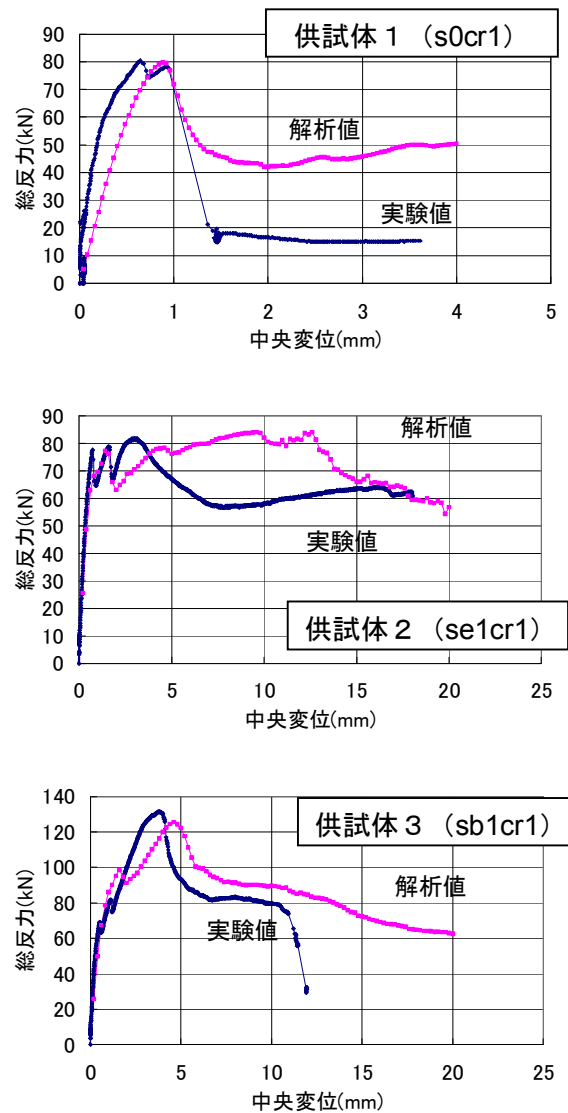


図-5 解析結果と実験結果の比較

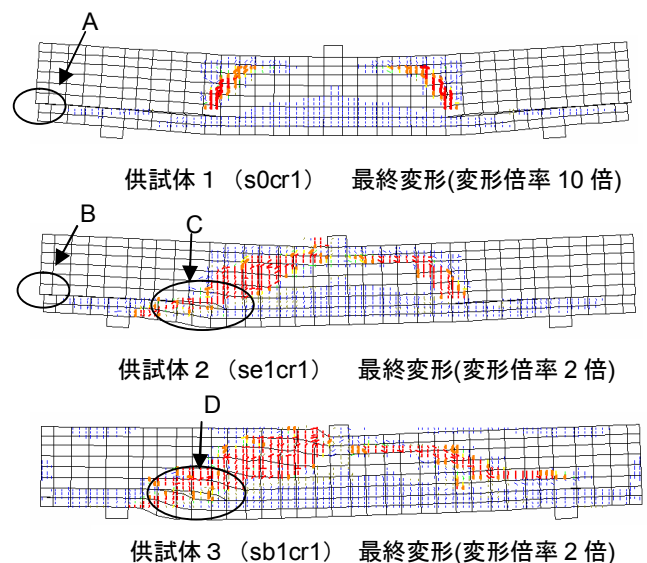


図-6 解析によるクラック分布と変形図

このケースでは端部に顕著なずれは見られない。

### 2.3 解析に対する考察

拡張モデル導入により、端部に損傷を要する3種の梁の静的載荷挙動を再現することができた。しかし、最大耐力後の耐荷力は、実際よりも過大側に予測する傾向が伺える。推定される一因として、拡張型接触面密度関数モデルで扱われている粗骨材の最大寸法の影響が過大に評価されていることが考えられる。Bujadhamらによる拡張接触面密度関数モデル(せん断伝達)は、適用範囲が広い特徴を有しつつも、実験によって検証されているひび割れ幅の上限は1mm程度までである。数mmまで、ひび割れが安定して開口する状況は、健全な部材においては稀であるが、損傷を有する既設構造物では起こり得ることが、本実験によっても確認された。本稿で対象とした部材のように、ひび割れ幅が数mmになるケースで、接触面密度関数モデルの精度検証と改良を検討する余地は十分にあるものと思われる。今後の検討課題としたい。

### 3. 結論

本研究では端部に損傷を有する梁を作成し、静的載荷実験と、解析による非線形挙動の追跡を行った。実験では定着端部における補強の違いで最大強度とピーク後の変形挙動に大きな差が生じることが確認された。このことから、以下のことがいえる。

- (1) 事前に損傷がある場合、大開口ひび割れが出現し、それに対応できるモデル化が必要となる。
- (2) 外観上同程度の損傷でも、鉄筋の配置によって残存する耐力は大きく異なり得る。
- (3) 損傷の位置と規模によっては無損傷部材よりも大きな変形能を呈する場合がある。
- (4) 主筋の曲げ上げなど梁端部を強力に拘束し一体性を保持できるような鉄筋配置がなされていた場合、タイドアーチ機構が構成され、耐荷力が増進する。

初期欠陥・損傷を有する梁では、ひび割れ開口

が過大となり、より精度の高いせん断伝達モデルを必要とした。損傷を有する実構造物の解析で残存耐力の推定する場合、この点に考慮した解析モデルを選定する必要がある。

本研究は、文部科学省科学技術振興調整費による委託を受けて行う研究開発(活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案、研究代表者：小長井一男)の一環として実施したものである。

### 参考文献

- 1) 佐藤吉孝, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: せん断補強筋および主筋の腐食がRC部材のせん断耐荷特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.821-826, 2003
- 2) Toongoenthong, K. and Maekawa, K.: Multi-mechanical approach to structural performance assessment of corroded RC members in shear, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.1, pp.107-122, Feb.2005
- 3) Chijiwa, N.: Time dependent simulation of reinforced concrete subjected to coupled mechanistic and environmental actions, 6th International PhD Symposium in Civil Engineering, Zurich, pp.40-42, Aug.2006
- 4) 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.
- 5) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press (London), 2003
- 6) Bujadham, B., and Maekawa K.: The universal model for stress across cracks in concrete proceeding of JSCE, No.451/V-7, pp.277-87, Aug.1992