

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	未損傷部への選択的な鉄筋配置が定着部損傷を有するRC部材の耐荷機構に及ぼす影響
Title(English)	
著者(和文)	千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一
Authors(English)	Nobuhiro Chijiwa, Koichi Maekawa
出典(和文)	土木学会論文集E, Vol. 66, No. 2, pp. 179-192
Citation(English)	, Vol. 66, No. 2, pp. 179-192
発行日 / Pub. date	2010, 5
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2010 Japan Society of Civil Engineers.

未損傷部への選択的な鉄筋配置が定着部損傷を有するRC部材の耐荷機構に及ぼす影響

千々和 伸浩¹・川中 勲²・前川 宏一³

¹正会員 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: chijiwa@concrete.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 鹿島建設(〒107-8388 東京都港区元赤坂1-3-1)

E-mail: kawanaki@kajima.com

³フェロー会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: maekawa@concrete.u-tokyo.ac.jp

RC部材の主鉄筋定着部に発生する腐食ひび割れは部材耐荷力を大きく低下させ、損傷定着部の直接的な修繕の効果は一般に低い。そこで、腐食ひび割れ先端近傍からせん断ひび割れが脆性的に誘発されることを鑑み、せん断ひび割れの貫通が想定される健全部に限って予防保全的な補強を施すことを検討した。鉄筋をせん断スパン内に局所的に配置する補強は剛性急変点を形成するため、ひび割れは付加した補強材を回避して進展し、部材耐力を回復することが困難であることを実験で示した。この機構が数値解析でも再現可能であることを確認した後に感度解析を実施し、劣化の未だ及んでいない部位に対する予防保全的な補強行為が部材耐力の回復に有効となる条件について検討した。実験から本補強が有効に機能することも確認された。

Key Words : damage, anchorage zone, steel corrosion, strengthening, sheet strengthening, friction

1. 序論

鉄筋コンクリート構造に生ずる劣化・損傷のなかで、鋼材腐食と腐食ひび割れは構造安全性を損なう要因となる場合があることから、鋼材断面の欠損や腐食ひび割れの発生が部材性能に及ぼす影響に関して研究が行われてきた。武若・松本¹⁾やOkadaら²⁾は主鉄筋の腐食に着目し、腐食が部材全長にわたって発生した場合の挙動に関して先進的に研究を行っている。佐藤らはせん断補強筋を電食により腐食させた場合と、全スパンの主圧縮鉄筋を電食によって腐食させた場合のせん断耐力の変化を分析している³⁾。その報告では、せん断破壊型の部材では著しく影響を与えること、さらに定着部が健全な状態で主筋が腐食した場合には、アーチ的な耐荷機構が形成されて耐荷力が増加するとともに、エネルギー吸収能が高まるということが明らかにされた。鋼材腐食モデルを用いたToongoenthong・Maekawaによる研究⁴⁾や、格子解析モデルを用いた鈴木らによる研究⁵⁾でも、鉄筋腐食が進むにつれてせん断耐力が相対的に増加し、曲げモードでの破壊に至ることが報告されている。松尾らは部分的に鉄筋を腐食させた構造部材の耐荷特性について、断面減少と付

着の低下を考慮することで実験結果を解析で再現可能であることを示している⁶⁾。

一方、鉄筋の引張力とコンクリートの圧縮合力が集中・連結する主鉄筋定着部に劣化損傷が発生すると、トラス機構自体が成立せず、部材安全性が大幅に劣化することが想像される。事実、2006年にカナダ・ケベック州で崩落した道路橋梁では、部材端張出部の腐食劣化と局部的なせん断破壊が疑われている⁷⁾。定着部の損傷に着目した研究として、澤田らは軸方向鉄筋破断や付着強度低下によって定着部機能不良を評価し、その残存特性を解析的に検討している⁸⁾。千々和らは定着領域に腐食ひび割れが生じると、鋼材断面欠損が微小であっても部材耐荷力が大幅に低下すること、定着部内の損傷位置に直接、鋼材を配置して補強を行っても有効な補強効果が期待できないことを実験・解析から示している⁹⁾。

これまで既設構造物の構造性能を向上させる目的で、多くの補強方法が開発されてきた。軽量かつ断面増加が少ない炭素繊維シートによる補強法^{10),11),12)}や靱性の高いSRFシートを用いた補強法¹³⁾などがその代表例といえる。シートの定着が困難な場合は、せん断補強鉄筋¹⁴⁾や連続繊維補強材¹⁵⁾、繊維補強筋¹⁶⁾をあと施工で設置すること

で性能向上が可能なことも明らかにされている。構造物が損傷を有する場合についても、鋼板巻き立てや緊張材の追加設置などの方法^{17),18)}によって性能向上が期待できることが報告されている。これらの補強法はせん断スパン内で損傷が生じる、或いは生じたものを前提としている。定着部損傷が発生し、主鉄筋の引張力とコンクリートの圧縮合力の交点が維持されない場合には、これらの補強法の有効性は現時点で明確にされていない。

定着部に損傷ひび割れがある場合の破壊形態は、その先端近傍からせん断ひび割れが脆性的に進展するものである⁹⁾。損傷部位への直接的な修繕では定着部に集中する力を十分に負担できず、脆性的な破壊進展を抑制することは容易でない。本研究では着目点を変え、損傷部位を残した上で、せん断ひび割れの貫通が想定されるせん断スパン内の健全部に予め鋼材を配置する方法(予防保全的な補強)を検討することとした。

2. せん断ひび割れ進展領域における鋼材補強

(1) 定着部にひび割れ損傷を有する部材の耐荷特性

本節ではモデル損傷面を導入した千々和らによる実験結果⁹⁾から、定着部にひび割れ損傷を有するRC梁の破壊モードをまとめ、主たる事象であるせん断ひび割れの進展抑制の対象部位を検討する。

a) ひび割れ分布

図-1に示すように、定着部への補強の有無にかかわらず、モデル損傷の内側先端を起点として、せん断スパン内に斜めせん断ひび割れが発生する。補強がなければ斜めひび割れ発生とともに部材は終局を迎えるが、補強がある場合は以降も耐荷力が発揮され、載荷点を挟んだ反対側にも斜めひび割れが形成されるとともに、定着部の補強拘束度に応じてひび割れが形成される。無補強の場合とせん断筋による補強の場合は、定着部の損傷面上で斜めせん断ひび割れの開口量とほぼ同じ大きさの相対ずれがみられる。このずれを定着部の修復補強で阻止することは容易でないことは以下の通りである。

b) 耐荷力

載荷点位置でのたわみと荷重の関係を図-2に示す。定着部が補強されていない場合、耐荷力は無損傷のそれと比較して半減している。損傷した定着部へのあと補強として、せん断補強筋を配置した場合を検討した(補強筋はモデル損傷と同時に打設前に事前に配筋)が、耐荷力は改善されなかった。通常のせん断補強筋で得られないような強力な定着部補強が施された場合を仮想して、主筋が定着部で曲げ上げられた梁でも実験を行ったところ、タイドアーチ的な機構が形成され、補強効果は得られた

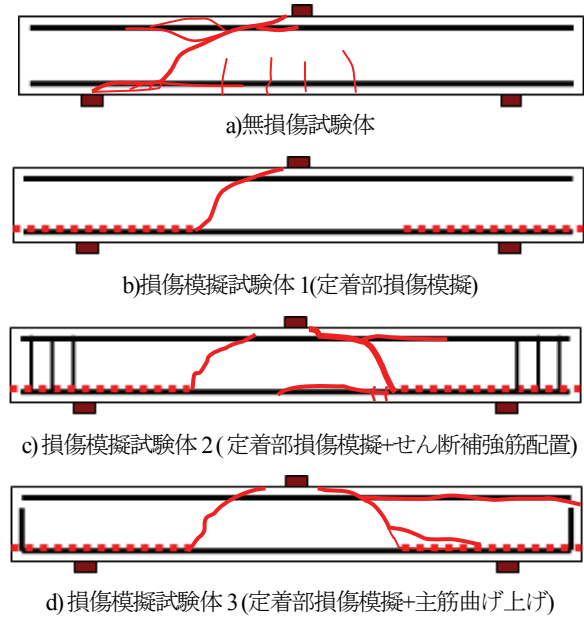


図-1 載荷試験結果 ひび割れパターン⁹⁾

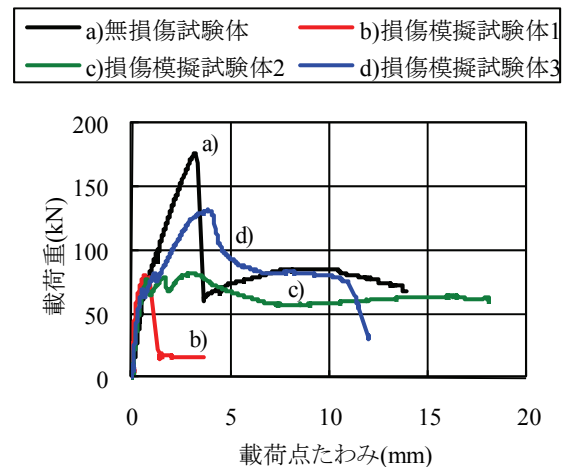


図-2 載荷試験結果 荷重たわみ関係⁹⁾

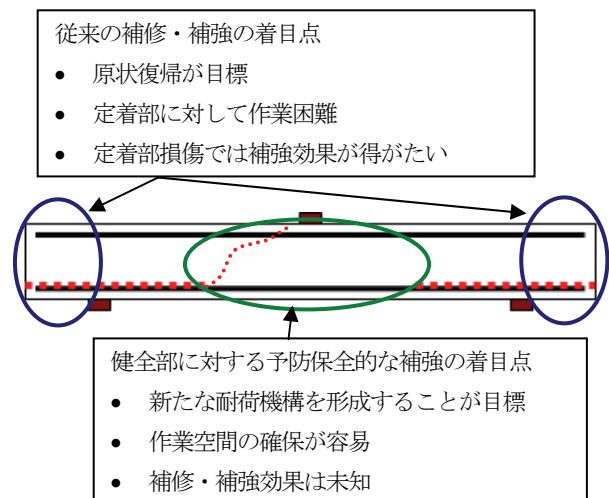


図-3 健全部に対する予防保全的な補強の考え方

が、無損傷の水準にまで耐力を回復させることはできなかった。

c) 変形

部材耐力の回復は得られなかったが、定着部損傷面の上下を鋼材で結合することで靱性は向上した。残存耐力を比較的、安定に維持することは可能となった。

(2) 補強方法の検討

a) 定着部への直接的な補強

(1)で示したように定着部に発生した損傷に対して、鋼材の配置で定着機能の回復を図るには、かなりの補強量が必要であり、タイドアーチ的な耐荷機構の形成に成功しても、斜めひび割れと圧縮鉄筋交差部でコンクリートの圧縮破壊が併発され、原状にまで耐力を回復させることができない。部材端部には杓や隣接桁が存在するため、定着損傷部の修復や補強は、一般に困難な施工を要する。定着部は隣接桁などで狭隘な空間となり、外部からの目視による点検も難しい。

b) 未損傷部への予防保全的な補強の可能性

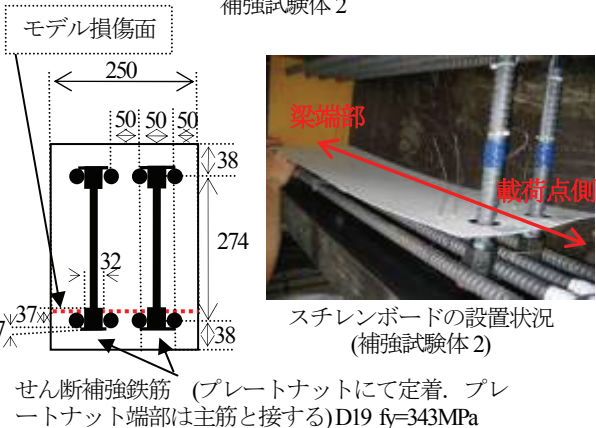
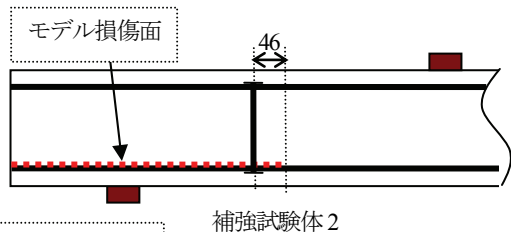
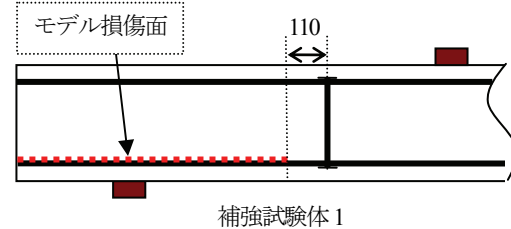
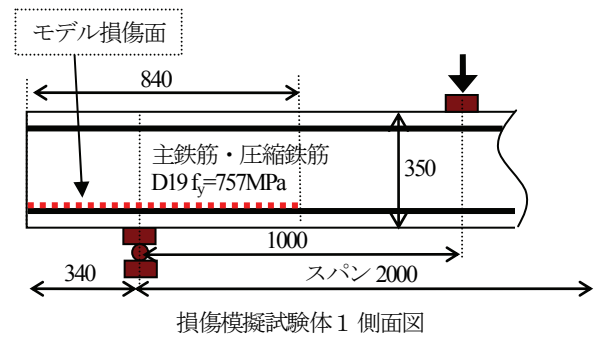
前述のとおり、損傷部を起点とする斜めせん断ひび割れの進展が限界状態となって、部材は終局に至っている。これを定着部の修復・補強で拘束することが困難ならば、進展が想定される健全部に先回りして予防保全的に補強材を配置し、補強材に進展する損傷による負荷を負担させることで構造性能を向上することが対案として考えられる(図-3)。この補強は建設時への原状回復ではなく、耐荷機構自体を当初設計から変えるものである。そのため、適切な設計を行わなければ、部材性能の補修・補強とならず、却って強度を落とす結果にもなり得る。本研究は耐荷機構の転換に視点をあてるものである。せん断スパン内での桁下部はオープンスペースである場合が多く、付帯機器も通常は設置されない。本研究の背景には、予防保全的な補強工法の高い施工性に寄せる期待感がある。

3. 劣化の及んでいない健全部に予防保全的な補強を施したRC部材実験

(1) 载荷実験

a) 試験体概要

補強対象とするRC梁部材は、定着損傷挙動が既知の損傷模擬試験体1とした(図-4)⁹⁾。この梁は定着部の主鉄筋上面に1mm厚のスチレンボードを設置することで、実際の腐食ひび割れ以上に厳しい定着部損傷(モデル損傷)を人工的に導入したものである。コンクリートの腐食ひび割れに比べてせん断伝達強度と剛性が極端に小さいた



梁断面図(補強試験体)

図-4 試験体配筋図

め、定着部損傷の梁全体挙動に対する影響を強調して再現することを目したものである。このモデル損傷の長さは定着端からせん断スパンの半分までとした。梁の寸法諸元は降伏強度345MPaのD19主鉄筋4本と、降伏強度345MPaのD10せん断補強筋が桁高の半分の間隔(示方書規定)で梁端部まで配置された梁を想定して決定した。ただし、本実験では確実にせん断破壊させるため、せん断補強筋は設置せず、主筋は降伏強度685MPaの高強度鉄筋を用いるよう設計を変更している。

図-4のような2通りの補強形態を設定した。モデル損傷面スパン内側先端付近で、モデル損傷面に直接触れない位置にせん断補強鉄筋を配置したものを補強試験体1、

モデル損傷面に直接触れるようにせん断補強鉄筋を配置したものを補強試験体2とする。補強試験体1は、モデル損傷面の先端部を起点として発生する斜めせん断ひび割れがせん断補強鉄筋と交差し、補強筋の拘束効果で耐力の回復を期待したものである。補強試験体2は、モデル損傷面先端の鉛直開口をせん断補強鉄筋が拘束することで、損傷の発生部位をスパン内側の健全部へ移動させることを目したものである。

せん断補強鉄筋の降伏強度は343MPaであり、奥行き方向に2本配置した。あと施工でフック定着を用いるのは一般に困難である。実際の補強施工では、円孔を開け、端部にプレートナットによって機械的に鉄筋を定着するせん断補強を設置し、隙間をグラウトで充填するのが有力である。そこで、あと施工後の状況を模擬して実験供試体を作成することとし、あと施工後の配筋詳細を事前に製作した後、コンクリートを打ち込んだ。せん断補強鉄筋の径については、補強効果を確保した上で補強の施工箇所が少なくなるように、D19を採用した。荷重は打設から28～29日後に行い、その材齢での圧縮強度は50.1MPa、引張強度は3.89MPaであった。

b) 試験条件

軟化領域を含め、一定の変位速度0.2mm/minで単調荷重した。荷重板と支承板は幅100mm、厚さ10mmの鋼板である。試験機から離れた床面を絶対変位の基準面とし、荷重点直下の鉛直変位、両支点上の梁高さ中央位置における鉛直変位を計測した。梁の剛体変位を差し引くため、荷重点直下の変位から両支点上の平均変位を差し引き、荷重点たわみ量を得た。荷重時の両支点は回転と並進を許すヒンジとし、水平方向の剛体変位は、荷重点での水平摩擦で拘束した。

(2) 補強効果

a) 補強試験体1

荷重を60kNまで作用させた段階で、斜めせん断ひび割れが圧縮鉄筋位置まで立ち上がり、耐力力が20kN程度に急落した(図-5)。無補強の損傷模擬試験体1と同様に、斜めせん断ひび割れはモデル損傷面の先端から進行した(図-6)。せん断補強鉄筋と交差する箇所ではひび割れの進展方向は大きく変化し、補強鉄筋を避けてせん断ひび割れは部材鉛直方向に進展し、圧縮鉄筋に達した。せん断ひび割れは補強鉄筋と交差していないので、拘束効果は発揮されなかった。最大耐力以後は圧縮鉄筋の上面は圧縮、下面は引張状態となり、曲げ変形が局所化した。

b) 補強試験体2

荷重重とたわみの関係を図-7に示す。初期剛性を維持したまま荷重が60kNに至り、せん断補強鉄筋設置位置よりも支点側から斜めせん断ひび割れが生じた。モデル

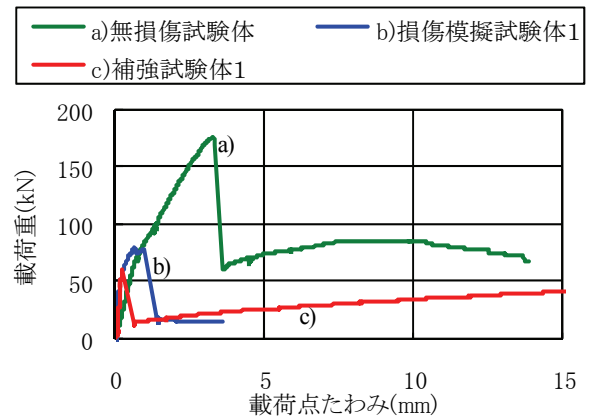


図-5 補強試験体1-荷重試験 荷重たわみ関係

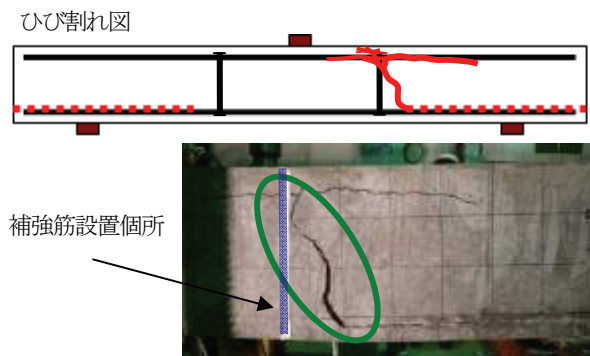


図-6 補強試験体1-荷重試験 ひび割れ状況

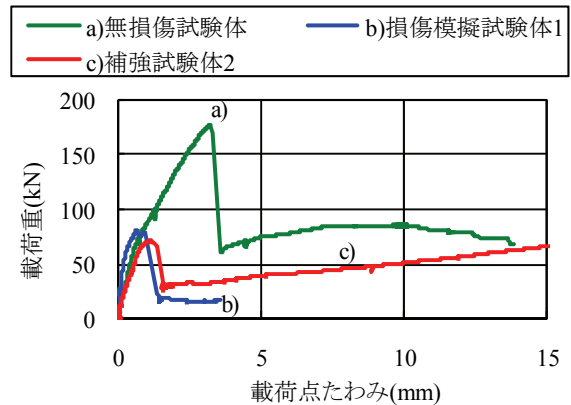


図-7 補強試験体2-荷重試験 荷重たわみ関係

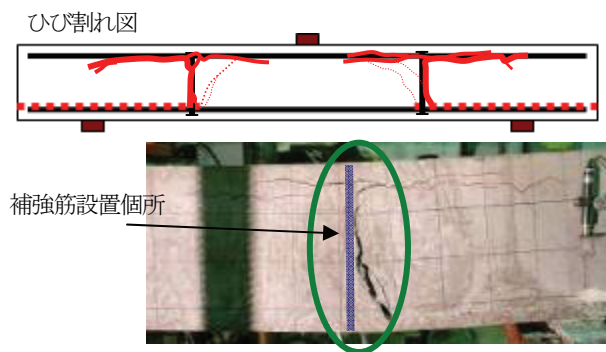


図-8 補強試験体2-荷重試験 ひび割れ状況

損傷面の先端からは発生しなかった。ここで耐荷力が急落し、若干の残存耐力を維持しつつもひび割れがせん断補強筋に沿って鉛直に進展し、ひび割れが圧縮鉄筋と交差した時点で終局に至った。このケースでも、ひび割れは補強鉄筋を回避したため、補強鉄筋の効果が発揮されなかった。圧縮鉄筋と鉛直ひび割れの交差点のひずみデータから、補強試験体1の場合と同様に、圧縮鉄筋の上面は圧縮状態、下面は引張状態に至った。

(3) 考察

a) 補強試験体1

ほぼ同諸元で無損傷の場合の梁部材に比して、初期剛性は若干低い。薄厚のスチレンボードでモデル損傷面を作成したため、この面に圧縮変形が発生して部材両支点変位を増加させたためと考えられる。

鋼材による集中的な補強の結果、コンクリートの引張破壊を拘束する効果が局所的に高まり、せん断ひび割れがこの領域に進展せず、より剛性の小さい方向にひび割れが進展した。斜めひび割れを拘束するために予防保全的に鋼材を配置しても、そこに損傷を誘導できなければ、構造的に補修・補強したことにならない。ひび割れと圧縮鉄筋が交差した個所に曲げが局所的に集中しており、ポストピークの残存耐荷力はこの箇所の曲げ抵抗性で維持されたと思われる。

b) 補強試験体2

この実験では斜めせん断ひび割れは、モデル損傷面の先端ではなく、せん断補強鉄筋とモデル損傷面とが交差する個所よりも支点側で発生した。モデル損傷面先端部付近にせん断補強鉄筋を配置したことにより、この部位の鉛直開口は有効に拘束されたものと思われる。しかし、その所産として鉛直開口が生じやすい部位が移動し、斜めひび割れの位置が無補強のそれと比較して変化した。斜めひび割れがせん断補強鉄筋と交差する個所まで延伸しても、ここから方向を変えて部材鉛直方向に向かってせん断ひび割れが伸びた。この場合も、せん断補強鉄筋自体が剛性の急変点を作ってひび割れの回避を生み、部材断面を貫通して終局に至ったものである。主たるひび割れが圧縮鉄筋と交差した後は、曲げ変形がこの箇所に集中して安定化した。いずれも残存耐力は回復からおよそ遠い状況であった。

4. 耐荷機構分析

耐荷機構の転換を期待した鋼材の集中配置では、部材内での局所的な補強行為が部材構造性能の補修・補強に必ずしもつながらず、あるいは害となることすらあり

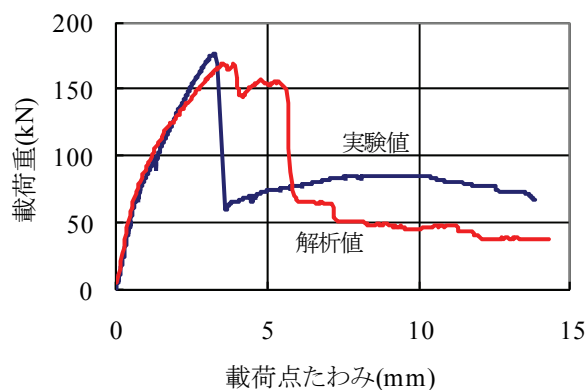


図-9 本研究で用いる解析手法による無損傷試験体再現結果荷重たわみ曲線

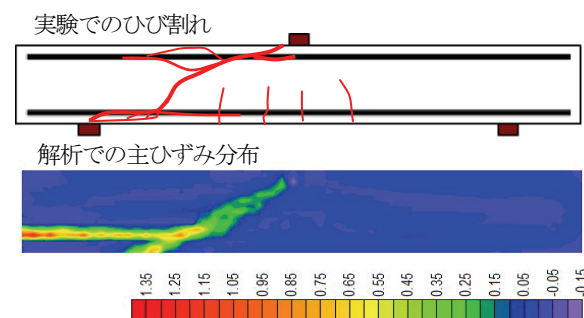


図-10 本研究で用いる解析手法による無損傷試験体再現結果主ひずみ分布

得ることを3章は示している。この耐荷機構の転換に対して非線形応答解析による分析は有効と期待されるため、本章ではその適用性を3章の実験を用いて検証したうえで、耐荷機構の転換をもたらすような予防保全的な補強が実現する条件を、感度解析等によって検討することとした。

(1) 解析手法

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¹⁹⁾を使用した。ひび割れ面でのせん断伝達には、李らによる接触面密度関数(基本)モデル²⁰⁾を拡張したBujadham(拡張)モデル²¹⁾を採用した。これは接触面密度関数モデルの接触点での機構をより詳細にモデル化し、ひびわれ幅とせん断滑り量が過大な領域でも適用性が検証されているからである。本解析モデルを用いた無損傷梁(図-2)の静的載荷試験結果の再現結果を図-9、図-10に示す。

モデル損傷面の力学的な特性には、既報²²⁾に倣って摩擦接合要素モデルを使用した。摩擦接合要素の特性は軸方向拘束力の程度を決定する。ここでは見掛けの平均摩擦係数を感度解析から求め1.1とした。完全平面同士での摩擦係数は一般に0.1~0.3程度だが、ここではス

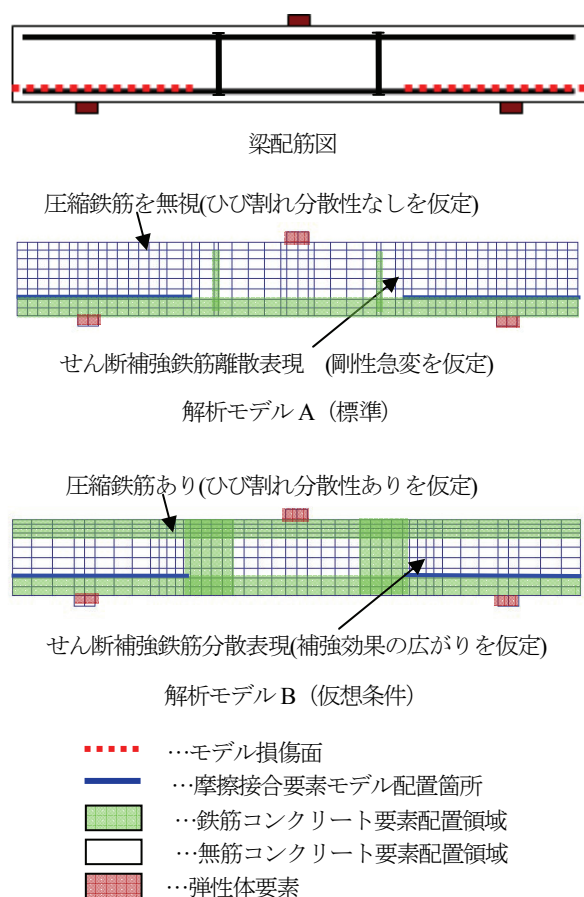


図-11 補強試験体1 解析モデル

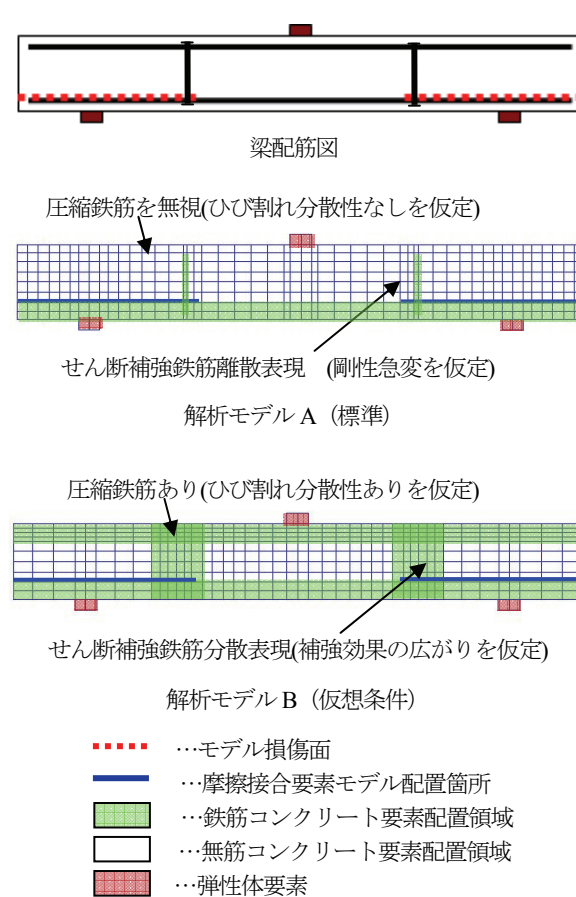


図-12 補強試験体2 解析モデル

チレンボードによる損傷面が施工の影響で完全平面ではなく、若干の歪みを含んでいるため、見かけの値として大きくなっていると考えられる。損傷面が実ひび割れのように凹凸面であれば、見かけの摩擦係数はさらに大きく4程度に評価されることが報告²³⁾されており、摩擦係数 1.1 は相対的には十分小さな値といえる。なお、損傷部位のモデル化と精度評価の詳細は同参考文献^{23),24)}に詳しい。

(2) 解析条件設定

補強効果を検討するため、2通りの数値解析モデルを用いて感度解析を行った。図-11、図-12に各モデルの具体的なメッシュ図を示す。この図において、赤点線はモデル損傷面の位置を、青の実線はモデル損傷面を解析表現するための摩擦接合要素の位置を示し、緑の領域は鉄筋コンクリート要素としてひび割れ分散性が十分にあると想定する領域、白の領域は無筋コンクリート要素としてひび割れ分散性を小さく想定する領域を示している。なお、本補強法はあと施工を想定したものであるが、実験供試体ではせん断補強筋を初めから組み込んで供試体を作成したため、あと施工部と周辺部との付着の影響等はここでは考慮しない。

a) 解析モデルA (標準)

補強が局所的であるため、せん断補強鉄筋および圧縮鉄筋周辺でコンクリートのひび割れ分散性は小さい。解析Aは、せん断補強鉄筋を線材要素で代表した有限要素モデルである。実際の鉄筋径に相当する幅の要素内だけに鉄筋の剛性を集中させ、周囲の要素にはtension-stiffness効果を期待しないことで、ひび割れ分散性に幾分劣る実条件に対応させた。せん断補強筋軸方向についても、鉄筋の位置に応じて要素分割を行い、鉄筋軸剛性の位置が現実のせん断補強筋位置に一致するようにした。

圧縮鉄筋は、斜めせん断ひび割れが曲げ圧縮縁を貫通するのを阻害する効果、及び斜めひび割れを曲げ圧縮領域で分散させる効果を併せ持つ。そのため、定着部が健全な場合、部材のせん断耐力と軟化挙動は圧縮鉄筋の影響を受ける。しかし、定着部が損傷している状況では、斜めひび割れの曲げ圧縮部への貫通前に定着部破壊が先行し易くなる。そこで、数値解析では圧縮鉄筋を無視し、せん断ひび割れが曲げ圧縮域を貫通し易い条件を意図的に設定した。この条件であってもなお、損傷定着部とその周辺に破壊が進展する実験事実が解析で再現されたとすれば、高い信頼性のもとで損傷定着部の非線形性が検証されたこととなる。換言すれば、過剰に圧縮鉄筋拘束

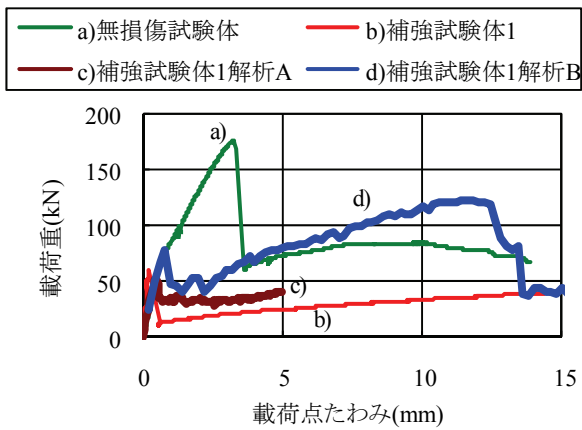


図-13 補強試験体1 解析結果(荷重たわみ関係)

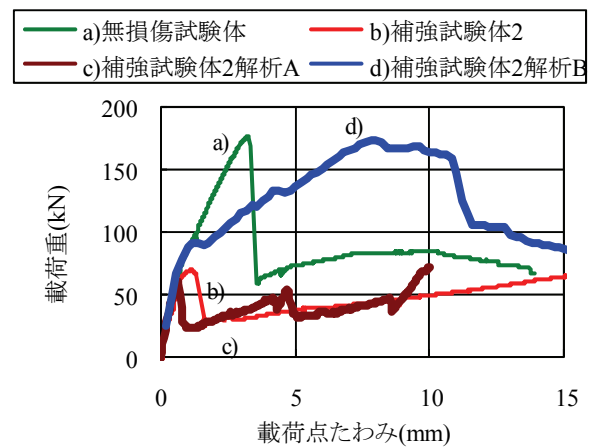


図-15 補強試験体2 解析結果(荷重たわみ関係)

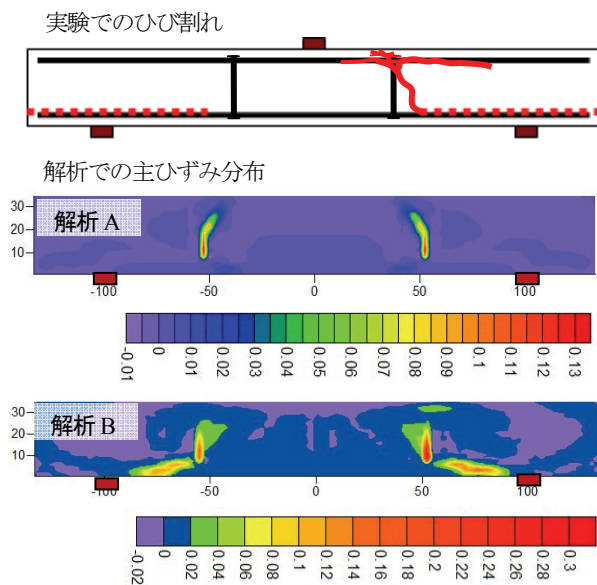


図-14 補強試験体1 解析結果(主ひずみ分布図)

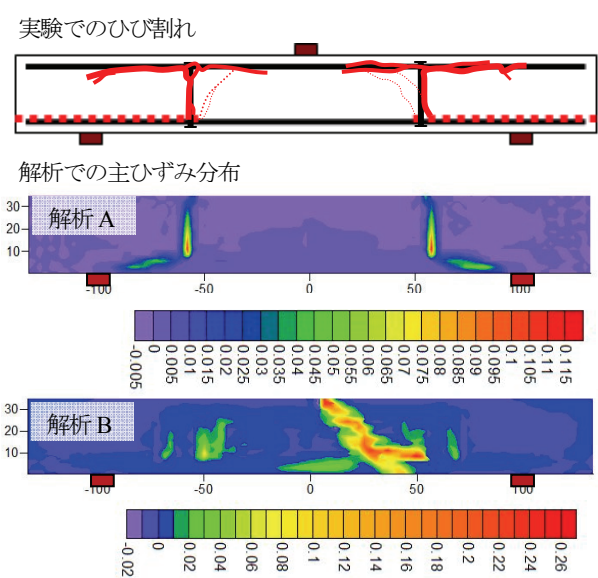


図-16 補強試験体1 解析結果(主ひずみ分布図)

を仮定すれば、定着部損傷は容易に解析で再現され得るため、定着部非線形性の検証にならないのである。主筋については従前通り、分散ひび割れモデルを適用して、高い主筋のひび割れ分散性を表現し、かぶりの2倍の範囲にtension-stiffness効果を与えている。

b) 解析モデルB (理想的な条件)

解析Bはせん断および圧縮鉄筋共に、分散ひび割れモデルを適用したものである。小径の鉄筋が多数、要素内に分散して配置されている理想的な状態に対応する。鉄筋軸剛性が空間的に分散して配置され、ひび割れ幅如何に関わらず、付着応力が期待できると想定するものである。補強効果を引き出すうえで、理想的な条件を仮定したものといえる。圧縮鉄筋の範囲は主鉄筋と同様、重心位置を一致させた上でかぶり厚の2倍の範囲を、また、せん断補強鉄筋の分散範囲は鋼材降伏強度とコンクリートの引張強度の比から算定される有効面積係数¹⁹⁾ によ

り幅を286mmとした。鋼材総量は実験に一致する。

(3) 解析モデルA (標準) による機構分析

a) 補強試験体1

補強試験体1の荷重たわみ関係の解析結果を図-13に示す。最大耐力とそれに至る変形は、再現可能であった。図-14に示す主ひずみ分布図で変形が局所化している部分はひび割れ位置に相当する。モデル損傷の先端付近で鉛直開口が生じ、ここを起点として斜めせん断ひび割れが発生している。斜めせん断ひび割れが補強部位に至ると、補強に沿った鉛直方向に方向を変え、圧縮縁を貫通することで反力の急落を迎える点でも、実験とほぼ整合する結果を再現できている。

b) 補強試験体2

補強試験体2の荷重たわみ関係の解析結果を図-15に示す。最大耐力と荷重変位曲線の特性が再現されている。

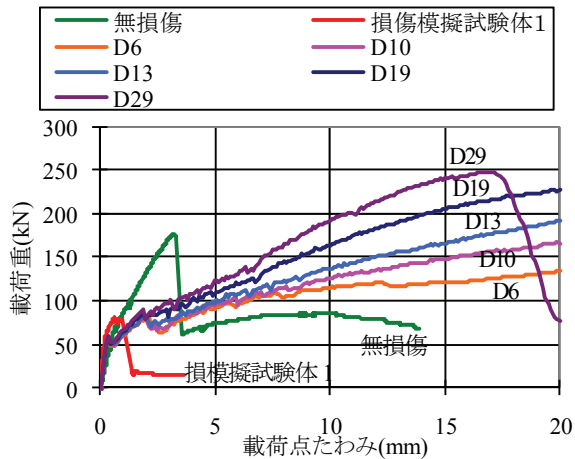


図-17 有効なひび割れ分散性を仮定した場合の補強試験体1
解析結果 荷重たわみ関係

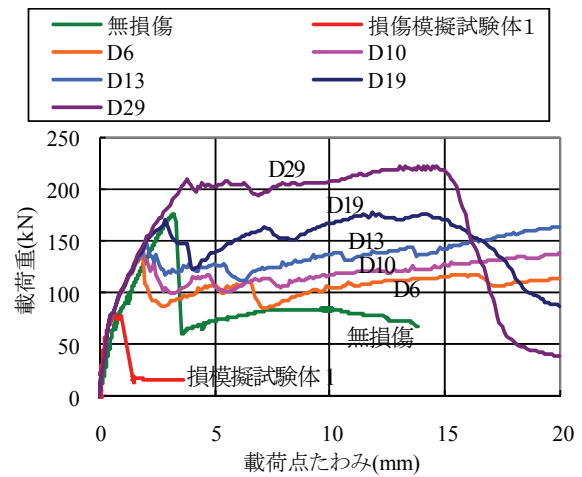


図-19 有効なひび割れ分散性を仮定した場合の補強試験体2
解析結果 荷重たわみ関係

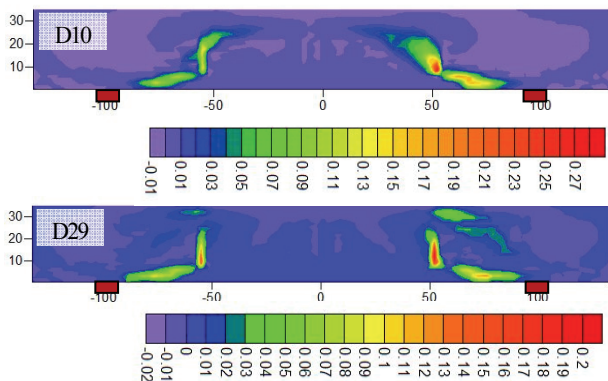


図-18 有効なひび割れ分散性を仮定した場合の
補強試験体1解析結果 主ひずみ分布

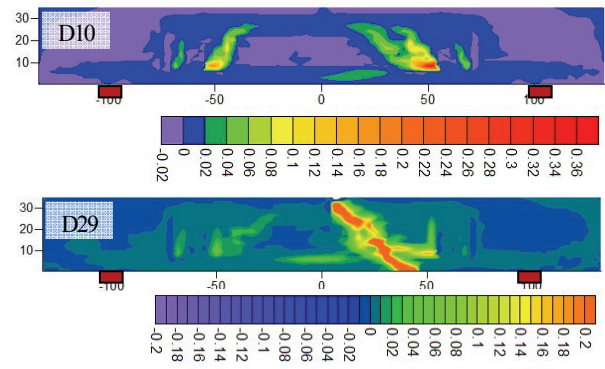


図-20 有効なひび割れ分散性を仮定した場合の
補強試験体2解析結果 主ひずみ分布

図-16に示す主ひずみ分布からは、モデル損傷面先端からではなく、補強部位とモデル損傷面とが交差する箇所よりも支点側を起点としてひび割れが発生する実験同様の特徴がみられる。このひび割れが補強部位に沿って鉛直に延伸し、圧縮縁を貫通することで終局を迎えた点でも、実験の挙動をほぼ追跡できている。

(4) 補強鋼材を分散配置した解析モデルBIによる機構分析

a) 補強試験体1

図-13に示す解析結果では、実験とほぼ同じ荷重(80kN)でモデル損傷先端から斜めひび割れが発生した。載荷重が一時低下した後、斜めひび割れが進展し、せん断補強鉄筋部位と交差して、補強効果が発揮されることで荷重が増加に転じ、約130kN程度の最大耐力を示す結果が得られた。終局状態では補強部位の外側、モデル損傷面の先端付近でせん断破壊が生じる(図-14)。補強効果の及ぶ範囲がモデル損傷面に多く重なっておらず、モデル損傷面先端に生じる応力集中を分散できなかったため、ここでせん断破壊を生じた。

試験的に補強鉄筋の径をパラメータとして解析を行っ

た結果も図-17にあわせて示す。ひび割れパターン(図-18)では径の影響はみられない。荷重変位関係は補強量に関わらず、同様の傾向を示した。

b) 補強試験体2

図-15に載荷点たわみと荷重関係の解析値を示す。補強試験体1と同様に、無補強の場合とほぼ同じ荷重(90kN前後)でモデル損傷面の先端部から斜めせん断ひび割れが発生した。荷重の急速な低下は見られず、若干の剛性低下は生じつつも、無損傷のものと同程度の約170kNにまで終局耐力は増加した。現実の試験体が本解析で設定したひび割れ分散性を確保できたとすれば、大きな補強効果が期待できることを示唆している。図-16に示すように、このケースでの終局状態は、補強部位より内側で起きるせん断破壊による。モデル損傷面上での滑りに伴う端部のずれに着目すると、同仮定を設けた場合の補強試験体1の結果よりも小さい。これは補強行為が効果的に働き、補強前の劣化部材ではモデル損傷部先端付近に集中する応力を有効に分散することができ、モデル損傷面をはさむ上下の部位を連続的に連結できたためと考えられる。

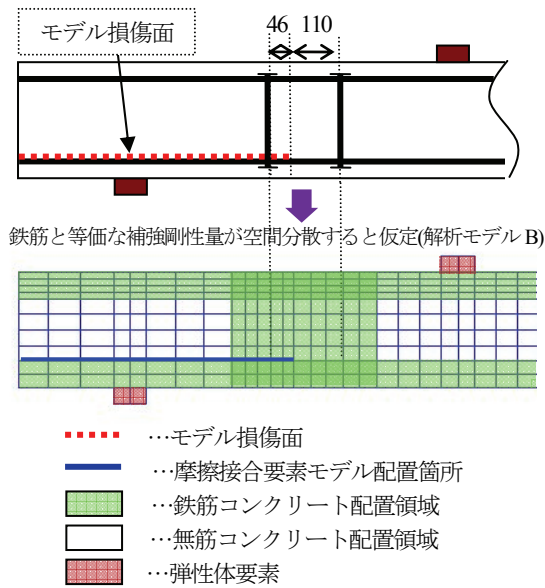


図-21 試験体配筋図および換算補強図(補強試験体3)

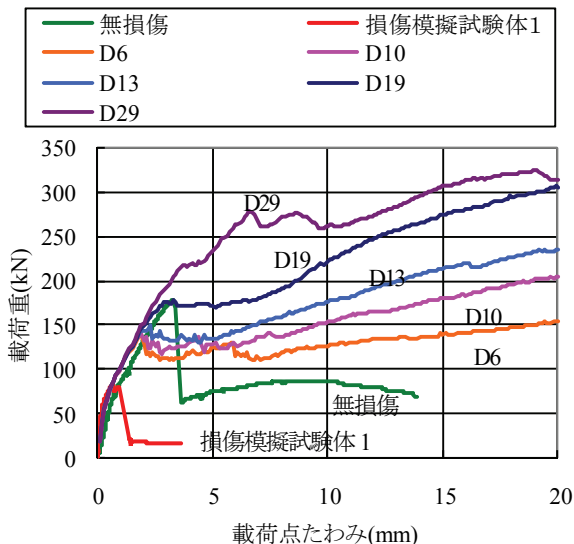


図-22 解析モデルBによる補強試験体3 解析結果 荷重たわみ関係

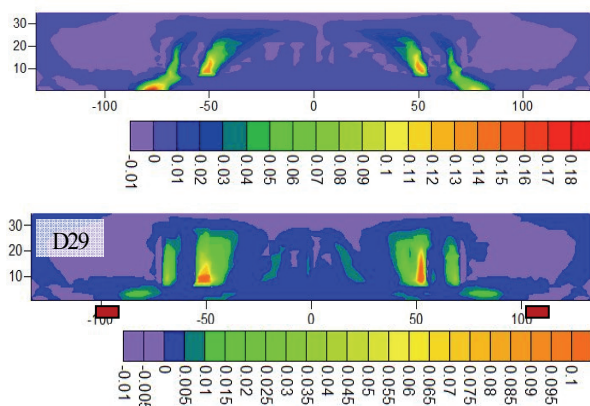


図-23 解析モデルBによる補強試験体3 解析結果 主ひずみ分布

図-19, 図-20はこの試験体配筋でせん断補強鉄筋の径をパラメータとした解析結果である。径を増すことで梁の剛性が高くなり、無損傷の梁部材でせん断補強を施した場合の耐力に近づくことが示された。

(5) 要因の考察

解析モデルA, Bでは、それぞれ同じ補強鋼材量でありながら、部材性能に対する効果が大きく異なる結果を示した。この違いは補強により添加された剛性の空間分布に依る。補強材の剛性が集中する場合、その個所を避けてひび割れが進展するように構造が転換され、補強行為そのものがむしろ害となった。しかし、補強材の剛性が空間的に広く分散する場合は、ひび割れが補強部材と交差するように進展することで補強材が耐力機構に組み入れられ、構造性能の改善が果たされた。これは耐力機構の転換を伴う予防保全的な補強の必要条件と解釈される。

以下に試験体ごとに解析モデルによる違いを詳細に比較する。

a) 補強試験体1

補強試験体1の解析Aでは、モデル損傷面先端に補強が掛からないので、無補強の場合と同じく、モデル損傷面先端部で損傷面の鉛直開口が生じ、斜めせん断ひび割れが生じる。ひび割れは補強材との交差を避けて進展するため、補強行為は部材性能において逆効果を生んだ。

解析Bでは、モデル損傷面の先端にも補強領域が掛かり、損傷面先端部の鉛直開口を斜めひび割れの発生を阻害しない程度に拘束する効果が働く。発生した斜めひび割れはスパン内側にある補強材と交差して進展するため、高い補強効果が得られた。図-17は解析Bの状態での補強量を増やした場合、斜めひび割れの発生後、開口をそれと交差する補強材が強力に拘束するほど、ひび割れが圧縮縁を貫通することを阻害する作用が強くなり、高い部材耐力が得られることを示している。

b) 補強試験体2

補強試験体2の解析Aでは、せん断補強鉄筋でモデル損傷先端部の開口は拘束されているが、拘束力が高過ぎるため、補強部からさらにスパン外側のモデル損傷面上を起点としてひび割れが発生した。このひび割れは配置した補強材との交差を避けるように進展し、皮肉にも補強行為は部材の破壊を加速する結果となった。

解析Bでは補強に広がりがあるため、モデル損傷面先端部付近の鉛直開口が広い範囲で面的に拘束される。集中補強のように鉛直開口が強く拘束されていないので、コンクリートに斜めひび割れは発生する。しかし斜めひび割れ進展と同時に交差する補強材が応力を負担するため、補強材による補強効果が効果的に発揮される。その

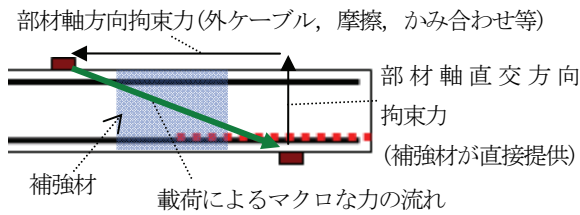
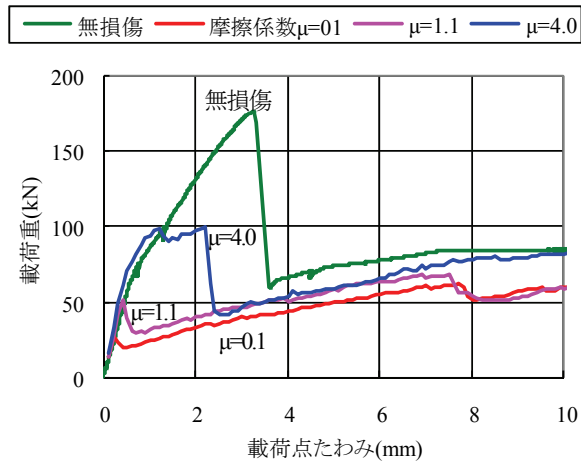
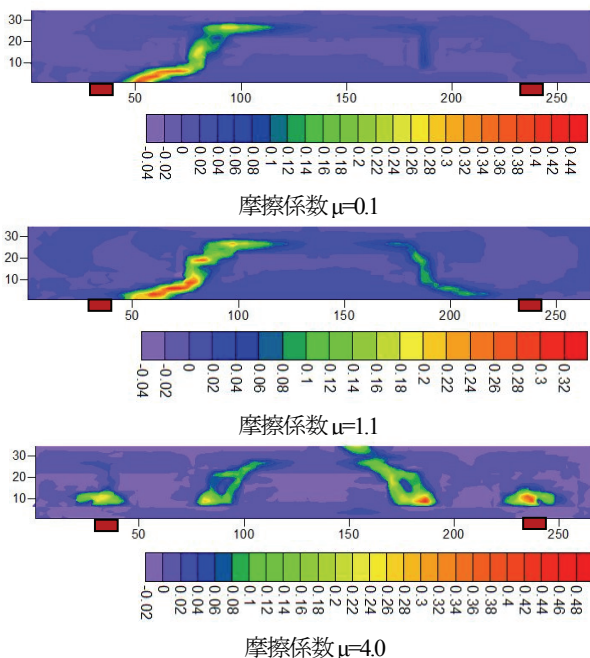


図-24 補強による力の流れ

図-25 定着部損傷面上のせん断伝達特性の変化に伴う
残存耐荷性能の解析予測 荷重たわみ関係図-26 定着部損傷面上のせん断伝達特性の変化に伴う
残存耐荷性能の解析予測 主ひずみ分布

結果、損傷先端付近に集中する応力が広く分散するように構造系が転換されるため、これまで損傷の発生しなかったせん断スパン内側においてもせん断変形が生じるようになった。モデル損傷面先端よりスパン内側の部位で

は、トラス的な機構によってせん断力が伝達されている。図-19に示すように、この構造システムに転換されることを前提として補強量を増やした場合、補強材の剛性が空間的に分散すると、補強鉄筋量が増えるほどに斜めせん断ひび割れ上面下面の乖離が抑制されるようになり、高い補強効果が期待される結果となった。

(6) 解析モデルBに基づく複数の補強点を有する部材の感度解析

a) 想定対象部材

等価な補強剛性が解析モデルBのように空間分散する仮定のもと、図-21に示すように補強箇所がさらに増えた損傷RC部材(補強試験体3)を想定し、その補強量に関する感度解析を実施した。

b) 補強効果

解析結果を図-22に示す。補強効果は補強試験体1, 2よりもさらに大きくなり、補強量を増やすほど、部材に対する補強効果が現れる結果となった。最終的にはモデル損傷面の先端から生じた斜めせん断ひび割れが圧縮鉄筋と交差し、その個所に局所的な曲げ変形が集中する破壊モードを呈した(図-23)。

c) 要因の分析

本想定部材では補強材の剛性が一層広く分布し、補強材の剛性も、モデル損傷先端での開口とそれに伴う斜めせん断ひび割れの発生を阻止するほどには高くない。モデル損傷面の先端補強材は鉛直開口を拘束し、斜めひび割れの発生荷重を高めつつ、ひび割れ発生後もひび割れ上下面を一体化している。モデル損傷面先端よりスパン内側にある補強材は、交差した斜めひび割れの開口を拘束し、ひび割れを介した上下部材の一体性を保つ。これらの相乗効果が高い効果をもたらしたと考えられる。

5. 定着部損傷を有する梁部材に対する予防保全的な補強法に求められる要件

以上の検討から定着部損傷を有する梁部材に対して予防保全的な補強を適用する際の必要条件を以下にまとめる。

(1) 補強材料

a) 剛性

劣化損傷の及んでいない部位に予防保全的な補強を施し、部材耐力の回復や向上を得るには、あと補強した健全部位にひび割れが生じるようにする必要がある。補強材の付加で剛性の急変が生じないように、付加剛性を分散することが肝要となる。たとえばD19鉄鉄筋を1本配置

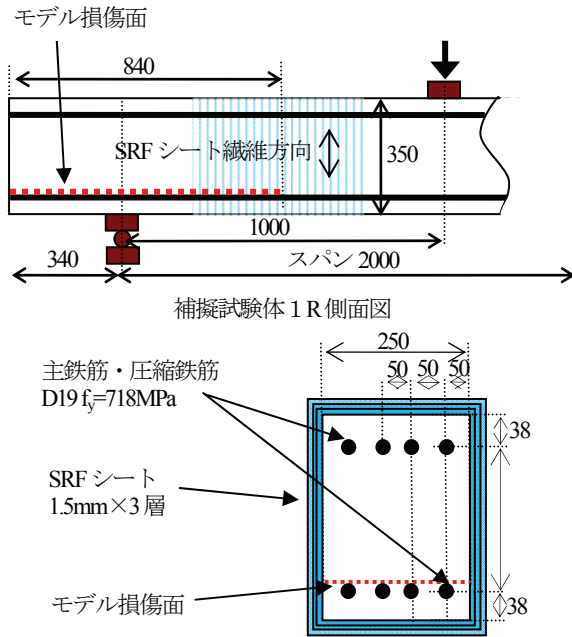


図-27 補強試験体 1R 配筋図

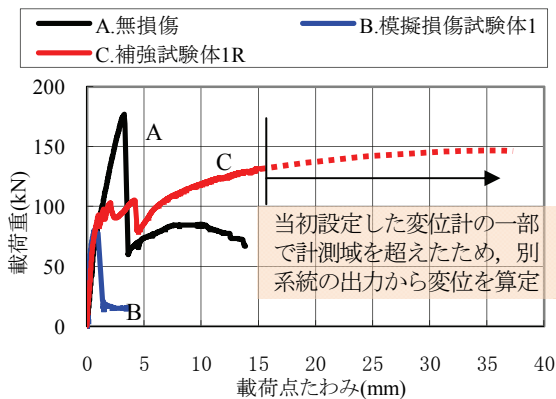


図-28 補強試験体 1R の実験結果 荷重たわみ関係

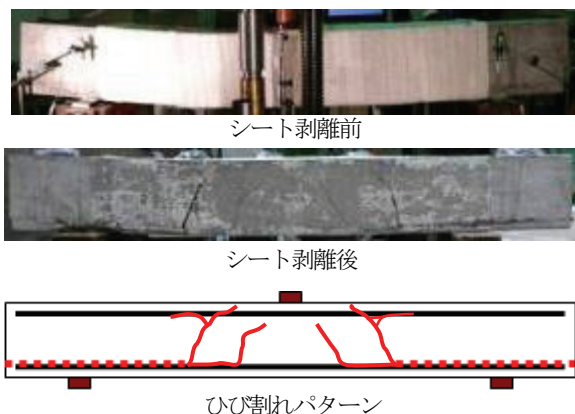


図-29 補強試験体 1R の実験結果 ひび割れパターン

した場合は応力集中が発生し、それを回避してひび割れが進展した。同量の補強でもD6鉄筋10本をスパン方向に広がりを持って分散配置すれば補強効果が得られるものと推定される。剛性が広く均一に分散するシート材による巻立て補強はこの要件に合致する。境界面での剛性の急変を避ける意味で補強材の剛性は低いものが有利となる。

b) 靱性

RC梁部材において鉄筋定着部に損傷が発生すると、損傷先端から生じる斜めせん断ひび割れが大きく開口し、そのひび割れと圧縮鉄筋とが交差した個所での局所変形を伴いながら荷重を維持する機構に転換する。この場合、確実に補強効果を得るためには補強材が破断しない程度に靱性が高いことが求められる。

(2) 部材軸方向の拘束力

a) 部材軸方向拘束力の確保

本研究で扱う劣化部材に対しては、劣化部からの損傷の進展が予測される部位に補強を施すことで部材性能改善の効果を得た。これは部材軸方向には拘束力を与えず、載荷点から支点到に流れる圧縮ストラットの部材軸方向分力に対して直接的な作用を与えるものでない(図-24)。部材軸方向拘束力を増加させることで、さらに部材耐力の向上効果が期待される(トラス機構の補強)。

部材軸方向拘束力を付加する方法として、補強材の増量による部材軸方向拘束力の付与、損傷面上での部材軸方向拘束力の増加が考えられる。外ケーブルの設置は前者に相当する。ひび割れ面への樹脂注入による損傷面のずれに対する摩擦係数の増大、ひび割れ面と直交する方向へのプレストレス導入、シートやせん断鉄筋配置による損傷面上でのダイレタンシー変形拘束による受動的な部材軸方向拘束力の増進などが、後者の補修補強法として考えられる。

b) 定着部損傷面の部材軸方向の擦れに対する拘束効果

図-25、図-26は損傷面の見掛けの摩擦係数をパラメータとして、感度解析を行った結果である。見かけの平均摩擦係数1.1はモデル損傷面程度の摩擦特性、摩擦係数4.0はコンクリートの実ひび割れ面²³⁾、摩擦係数0.1は摩擦が殆ど期待できない仮想面を想定している。摩擦係数の増加に伴い、部材軸方向の損傷面上でのずれ拘束力が増加するにつれて耐荷力が増加し、斜めせん断ひび割れの進展方向は、より部材軸方向へと傾斜している。損傷進展が予想される個所に部材軸直交方向の補強材を配置する予防保全的な補強では、ひび割れ進展方向がより低い角度に傾斜し、部材軸直交方向の開口成分が増えるほど、補強の効果も高まることが推定された。

6. 検証実験

5章で示した要件を満たしつつ、これから損傷の進展する個所に先行して補強を行った場合、定着部に着目する従来型の補強(例えば損傷模擬試験体2)より高い補強効果が得られる可能性の有無について、実験による検証を行った。

(1) 試験体概要および試験条件

補強対象は損傷模擬試験体1と同じ諸元の梁とした(図-27)。定着部損傷についても1mm厚スチレンボードによるものである。載荷実験時のコンクリート圧縮強度は34.3MPa、引張強度は2.70MPaであり、圧縮鉄筋・引張鉄筋は降伏強度718MPaのD19鉄筋である。

補強は1.5mmのSRFシート¹³⁾を3層巻き立てることで行った。使用したSRFシートの物性はそれぞれヤング率4.5GP、破断強度400GPa、破断ひずみ10%、1層厚さ25mmであり、5章で示した補強要件を満足するものである。補強材はSRF補強指針に則り、面取りを行わず直接ポリウレタン系の接着剤をコンクリートに塗り、1本のベルト状のSRFシートで梁を3層にわたり巻き立てるようにして行った。各層の間にも接着剤を塗り、補強材同士も接着させている。

ここでの補強範囲は定着部を除く全せん断スパンとした。補強個所を局所に限定せず、敢えてせん断スパンとしたのは、定着機能を発揮すべき定着部の機能回復を放棄し、せん断スパン内側に補強を施すことで構造性能を回復するという、定着部予防保全的な補強の有効性自体を検証することを目したためである。

試験条件についても、3.(1) b) に示したものと同一ものを適用した。

(2) 載荷試験結果

載荷試験結果をそれぞれ図-28、図-29に示す。

無補強の場合(損傷模擬試験体1)よりも約20kN高い95kNまで荷重の増加を見た後、荷重が急落・再上昇、再下落を経て安定的な荷重再上昇に入った。この間までの荷重の急落はそれぞれ両損傷面先端からの斜めせん断ひび割れの形成に対応している。この証左として、荷重の急落後、形成された斜めひび割れと交差すると思われる付近の圧縮鉄筋に取り付けたひずみゲージのうち、梁下面側のものが圧縮側から引張側に転じたことが挙げられる。これは斜めひび割れが圧縮鉄筋と交差するところまで進展し、交差箇所の鉄筋に、局所的な曲げ変形が現れたことを意味する。以降は荷重の漸増に伴いたわみ量は伸び続け、載荷点たわみが35mm程度で最大耐力150kNを迎えた。この前後でたわみに対する荷重の伸び

がほとんど見られないことから、ここで載荷を終了した。

ひび割れは無補強(損傷模擬試験体1)の場合と同じく、損傷面の先端からのひび割れが卓越して開口していたが、よりせん断スパン内側にもせん断ひび割れが発生していたのが認められた。このせん断ひび割れはせん断補強筋を設置した通常のRC梁で見られるものと類似したパターンであった。梁端部の損傷面上下の相対ずれは載荷点たわみが7mmの時に2mm、載荷点たわみが11mmの時に3mm、載荷点たわみが18mmの時に6.5mm、載荷点たわみが24mmの時に9mm、載荷点たわみが35mmの時に10mmであった。シートの剥離領域について観察を行ったところ、剥離域はひび割れ近傍の数cm範囲の限定的なものであった。

(3) 考察

無補強の場合よりも約20kN高い95kNにおいて斜めひび割れが生じたのは、補強材によって斜めせん断ひび割れの開口が拘束されたためと考えられる。このケースでの補強は補強試験体1のように鉄筋のように高剛性が集中しているのではなく、低剛性の補強が広く分散しているため、無補強の場合とほぼ同じひずみ分布状態となり、結果モデル損傷の先端から同様の斜めひび割れが形成された。モデル損傷面の先端から生じた斜めせん断ひび割れは、損傷面が十分に滑らかで部材軸方向拘束力が小さいことから直ちに圧縮鉄筋に達し、以降はこの交差箇所と損傷面先端の主鉄筋の2か所に局所曲げが集中する。仮に補強材がなければ、モデル損傷面を境とした上面下面は容易に分離され、それぞれ鉄筋径程度のアーム長しかないこの2か所のモーメント抗力で外力に対抗することになる。実際には補強材がモデル損傷面を境とする上面下面を結束したため、全断面で外力に対抗するような曲げ耐力機構が形成され、高い荷重を維持し続けることができたと考えられる。両定着部損傷先端から斜めせん断ひび割れが発生した後はこの耐力機構に移行し、最終的には曲げモードで終局を迎えた。モデル損傷先端よりもさらにせん断スパン内側の部位では鉄筋とコンクリートの一体性が十分に確保されているため、せん断ひび割れも普通のRC梁で見られるようなひび割れパターンが見られたものと考えられる。なお補強後の梁の最大耐力150kNは無損傷の場合の最大耐力にほぼ等しいものである。

7. 結論

RC梁部材において定着部に損傷が発生した場合、引張を受け持つ主鉄筋と斜め圧縮力を伝達する部材腹部コ

ンクリートの結合が維持されなくなり、耐力力の大幅な低下が生じる。損傷のある定着部に直接、鋼材等を配置することで原設計時の耐力機構を回復しようとしても、効果は高くない。本研究では補強効果が得られにくい損傷部の修復を行わず、健全部に鋼材の集中配置を行うことで構造系を意識的に転換し、予防保全的な補強を検討した。以下に得られた結論を列記する。

- (1) 既存のひび割れ等の損傷から進展すると考えられる領域に予防保全的に鋼材を集中配置し、原設計とは異なる新たな耐力機構を形成することで耐力性能の回復を期する先行補強の可能性を検討した。このとき、剛性集中を生じるような補強方法ではせん断ひび割れが補強箇所を避けるように進展するため、補強行為が逆効果になることが判明した。この特性は既往の非線形解析によって概ね挙動追跡が可能であることを示した。
- (2) しかし、同じ補強量でも補強剛性を空間的に分散し、無補強状態の応力分布をなるべく保存するようにして配置すれば、高い補強効果が期待できることが機構分析の過程から明らかになった。後者のような補強材の分散配置を再現するには鉄筋を分散させて配置すること、あるいは低剛性シートの利用などが適切と考えられる。
- (3) 本研究における議論を検証するため、低剛性・高靱性のシートを補強材として、損傷した定着部ではなく、全せん断スパンに対して補強した梁の載荷実験を行った。結果、既往の研究により報告されていた定着部への直接的な補強よりも耐力の回復が期待できることが実験的に示された。

謝辞：本研究の実験遂行にあたりE. Gebreyouhannes博士、藤山知加子氏に多大なご協力を頂いた。試験体の作成にあたっては、鉄筋およびプレートナットを東京鉄鋼(株)より提供いただき、入部工業(株)には試験体の作成にご協力頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 武若耕司, 松本 進: コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 6, pp. 177-180, 1984.
- 2) Okada, K., Kobayashi, K. and Miyagawa, T.: Influence of longitudinal cracking due to reinforcement corrosion on characteristics of reinforced concrete members, *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.2, pp. 134-140, 1988.
- 3) 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 部材のせん断耐力特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp. 821-826, 2003.
- 4) 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, 2005.
- 5) 鈴木暢恵, 三木朋広, 二羽淳一郎: 格子モデル解析による損傷 RC はり部材のせん断耐力機構の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp. 235-240, 2006.
- 6) 松尾豊史, 松村卓郎, 岩村暁如, 玉田潤一郎: 鉄筋腐食した RC ボックスカルバートのせん断耐力に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp. 1075-1080, 2008.
- 7) Commission of Inquiry into the Collapse of a Portion of the de la Concorde Overpass, Government du Quebec http://www.cevc.gouv.qc.ca/UserFiles/File/Rapport/report_eng.pdf
- 8) 澤部純浩, 上田尚史, 中村光, 李相勲: 軸方向鉄筋の定着不良を生じたせん断破壊する RC はりの挙動解析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第4巻, pp. 409-416, 2004.
- 9) 千々和伸浩, Esayas Gebreyouhannes, 藤山知加子, 前川宏一: 定着部に損傷を有する RC 梁のせん断耐力機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp. 709-714, 2007.
- 10) 萩尾浩也, 勝俣秀雄, 木村耕三, 小島克朗: 炭素繊維シートにより補強された梁のせん断設計に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp. 503-508, 1998.
- 11) 柳下和男, 千葉脩, 鳥谷利夫, 山内茂一, 大井貴之, 向井幸一: 既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する実験研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 657-658, 1997.
- 12) 有留義朗, 金久保利久, 古田智基, 松井雅明: 既存 RC 構造物の新しい耐震補強方法に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 551-552, 1997.
- 13) 五十嵐俊一: 部材表面を包絡する伸展性補強材の補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp. 171-178, 2002.
- 14) 小林靖典, 小林 亨, 清宮理: 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関する梁の載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No.2, pp. 1549-1554, 2002.
- 15) 小林朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕: あと施工差し込み型連続繊維補強材により補強された RC はりのせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp. 1585-1590, 2007.
- 16) 木村耕三, 小島克朗, 岡野素之: 炭素繊維およびアラミド繊維を補強筋とした梁部材のせん断実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp. 1135-1140, 1990.
- 17) 山川哲雄, 宮城敏明: 緊張力を導入した PC 鋼棒と鋼板を用いたせん断損傷 RC 梁の応急補強法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 586, pp. 171-178, 2004.
- 18) 長濱温子, 山川哲雄, 中田幸造, 那仁花: せん断損傷 RC 柱に緊張ラッシングベルトを利用した応急補強法, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp. 175-180, 2008.
- 19) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press (London), 2003.
- 20) 李 宝祿, 前川宏一: 接触密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.123-137, 1988.

- 21) 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.
- 22) Maekawa, K., Fukuura, N. and Soltani, M.: Path-dependent high cycle fatigue modeling of joint interfaces in structural concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.6, No.1, pp.227-242, 2008.
- 23) Chijiwa, N.: Rational retrofitting method for reinforced concrete beam with damage at their anchorages zones, *7th International PhD Symposium in Civil Engineering*, Stuttgart, chapter 12, pp.3-14, Sept. 2008.
- 24) 千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一: 定着部に損傷を有する RC 梁への予防的補強の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, pp. 1399-1404, 2009.

(2009. 7. 15 受付)

THE EFFECT OF STRENGTHENING THE DAMAGE EXPECTED ZONE IN A RC MEMBER WITH DAMAGED ANCHORAGE

Nobuhiro CHIJIWA, Isao KAWANAKA and Koichi MAEKAWA

When an anchorage zone of RC member is damaged, the remaining loading performance drops significantly with a few typical diagonal cracks. The loading performance recovery by strengthening the damaged part directly sometimes becomes absolutely difficult because the diagonal cracks develop from the tips of the existing crack at the anchorage zones. One practicable effort is strengthening the expected zones where the diagonal cracks will develop. There is no effect is observed in the experiment result when steel bars are adopted as the strengthening material due to the stiffness increases abruptly and the cracks avoid to across these bars. A numerical analysis which could simulate the experimental work was used also to perform a sensitivity analysis. By using this verification, the requirements to recover the loading performance by strengthening the expected zones became clear. The effect by this strengthening method is verified by the experiment.