

論文 上面が劣化した RC 床版の押抜きせん断耐力と補修に関する評価実験

松尾 栄治*¹・横山 和昭*²・安東 敏弘*³・藤間 誠司*⁴

要旨：積雪寒冷地の高速道路橋では、凍結防止剤による塩害や漏水等の影響で RC 床版の上面側の鉄筋が腐食しコンクリートが脆弱化する現象が見られる。上面が劣化した床版の保有耐力については未解明な点もあり、合理的な補修工法についても開発が望まれている。本研究では、上面が劣化により脆弱化したコンクリート部を有する RC 床版を再現し、その押抜きせん断耐力を実験的に確認した。また、脆弱化した上面側のコンクリート部分を樹脂注入により再凝固させることで簡易に補修した場合の補修効果を実験的に評価した。

キーワード：道路橋, 床版, 塩害, 押抜きせん断耐力, 補修, 樹脂注入

1. はじめに

山間部の積雪地や寒冷地を通る高速道路橋では、冬期に散布される凍結防止剤による塩害や漏水等の影響を受けて、RC 床版の上面側において鉄筋腐食を伴う劣化が進行してきている。

RC 床版の上面側の劣化は鉄筋の腐食膨張圧によってかぶりコンクリートが浮いた状態となる。浮いた状態のコンクリートが床版上面に存在すれば、交通荷重の影響により摺磨き作用等が生じコンクリートが脆弱化および泥状化し、最終的には床版直上にある舗装の浮き（ポットホール）として現出する。このような床版上面の劣化が著しい場合は道路管理者にとって深刻な問題となり、上部断面の部分的な補修に加えて、大規模な打換えや全面的な床版取替えを行っている事例¹⁾もある。

これらの床版上面側の塩害劣化については、劣化予測に関する研究²⁾、塩分浸透予測に関する研究³⁾、鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究⁴⁾等が現地における個々の詳細調査を主体として進められている。しかし、上面が劣化した床版の残存保有耐力については、上面増厚後に撤去された床版を用いた押抜きせん断試験⁵⁾等が実施されているが、上面のみが劣化している既設床版の保有する耐力の定量的な評価については未解明な点が残されている状況である。

また、床版上面の劣化に対する補修・補強工法については、上部断面を大規模に打換えた場合の疲労耐久性に関する評価実験⁶⁾等は実施されているが、劣化部分を大規模にはつり取ることなく簡易に補修した場合の力学的な補修効果については未解明な状況である。合理性・経済性が求められる昨今の建設業界の現状を鑑みると、上面のみの簡易的な補修による部材強度の改善効果を明らかにすることは極めて重要である。

本研究では、上縁付近が劣化した RC 床版を模擬的に再現した床版を作製し、その押抜きせん断耐力を求めるとともに、樹脂による補修効果を確認した。すなわち、「健全な床版」、「上部に設けた空洞に劣化して結合力を失った状態のコンクリートを充填した床版（劣化床版）」、「その床版の劣化部に上部から樹脂注入による補修を施した床版（補修床版）」の 3 体について、静的押抜きせん断耐力を実験的に求めた。

実験では最も過酷な条件を劣化部に再現した。すなわち、「セメントペーストの結合力が完全に失われた状態」、「劣化域が圧縮縁から中立軸位置まで達している状態」、「輪荷重がアスファルトを介さず直接床版に作用する状態」を仮定した。

2. 実験方法

2.1 床版の概要

実験で作製した床版の概観を図-1 に示す。3 体の床版はいずれも 120×120×15cm の寸法であり、鉄筋は SD295A (D13) を 125mm ピッチで格子状に組んで引張補強材とし、かぶりは 30mm とした。図中にはひずみの測定位置を示しており、鉄筋とコンクリートで共通の位置にひずみゲージを設置している。なお、図-1 は前述の「劣化床版」と「補修床版」のものであり、中立軸から上側の圧縮領域における中央部に空洞を設けている。この空洞に脆弱化したコンクリートを再現した。脆弱化したコンクリートの再現方法については後述する。「健全床版」にはこの空洞を設けずにフラットな上面とした。

前述のように、塩害によるコンクリートの劣化は上縁から圧縮鉄筋までのわずか数 cm のかぶり部においてのみ生じているケースが多いが、本実験では最も過酷な条件を採用することとして、弾性状態における中立軸位置

*1 山口大学 大学院理工学研究科助教 博(工) (正会員)

*2 西日本高速道路エンジニアリング中国(株) 道路技術部調査役 博(工) (正会員)

*3 電気化学工業(株) セメント・特混事業部 担当部長

*4 電気化学工業(株) セメント・特混事業部 センター長

表-1 樹脂の物性

外観	A剤	B剤
	半透明液	紫色系液
粘度 (mPa・s)	100 (15℃)	
主成分	変性アクリル樹脂	
液比重	1.02	
可使時間 (分)	35 (15℃)	
硬化時間 (分)	65 (15℃)	
圧縮降伏強さ (N/mm ²)	52 (JIS K 7181)	
曲げ強さ (N/mm ²)	25 (JIS K 7171)	
引張強さ (N/mm ²)	16.5 (JIS K 7161)	

表-2 配合表

W/P (%)	締固め率 (%)	空隙率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水	模擬セメント		粗骨材	
				炭カル	海砂	碎石2010	碎石1505
48	100	0	125	262	988	651	435
48	90	10	113	234	889	586	392

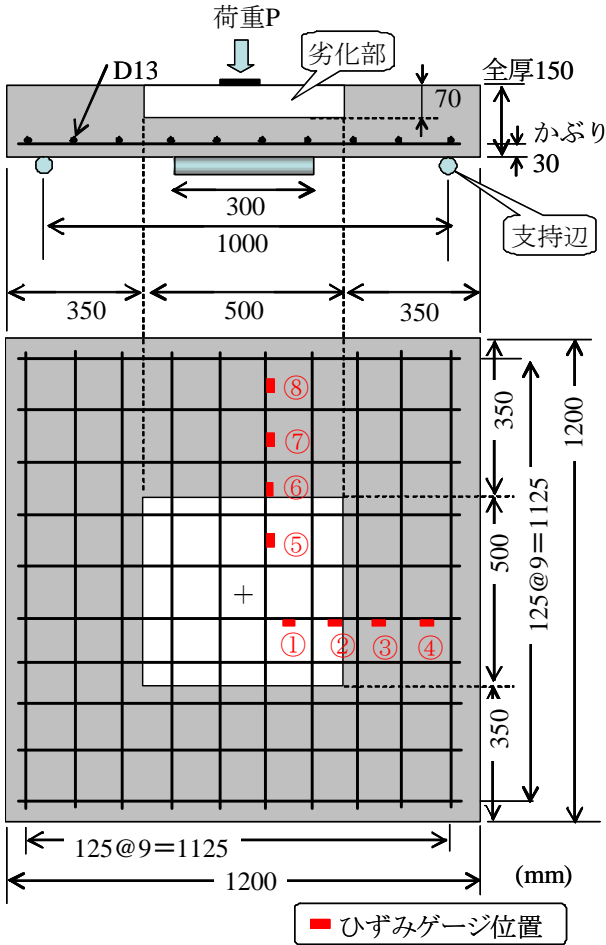


図-1 床版の外観（劣化床版と補修床版）

近くまでの深さ70mmを劣化部とした。

劣化部の横方向の広がりについては、載荷部から45°のせん断断面を想定し、その面が全て劣化部の中に入るように50cm四方とした。

2.2 使用材料

床版に用いたコンクリートは24-8-20-Nのレディミクストコンクリートである。劣化部に使用した細骨材は北九州市沖産の海砂、粗骨材は山口市宮野産の安山岩砕石である。セメントを模擬した粉体には市販の炭酸カルシウムを用いた。炭酸カルシウムを選定した理由は、水とは不活性かつ難溶性であるためである。補修剤は市販のアクリル系樹脂接着剤（低粘度型・主成分は変性アクリル樹脂、JIS A 6024 適合品）である。その主な物性を表-1に示す。

2.3 劣化部の再現方法

劣化部の配合は「劣化により結合力を失ったペーストマトリックスが塑性的に骨材を取り囲んでいるだけの脆弱な状態」を再現することを前提とした。そこで、床版に用いた配合をベースとしてセメント部分を炭酸カルシウムに体積置換した。骨材および粉体の構成比は固定し、これらと水量の比率については、硬化過程と供用

環境によって変動があると仮定し、次のような要領にて決定した。すなわち、練混ぜ水以外の材料を空練りし、徐々に練混ぜ水を加えていき、ワーカビリティ（ここでは、ハンドバイブレータによる転圧のしやすさを意味する。）が最も良好となる水量を求めた。その水量と炭酸カルシウム、骨材の量から求めた配合を表-2に示す。上段は空隙率（=空気量）を0%とした場合であり、締固め率100%と定義した。これをベースとして締固め率を設定した。本実験では後述のように、締固め率を90%（空隙率10%）と設定し、実際に劣化部として施工したが、その配合を表-2の下段に示す。試料は10×10×40cmの角柱型枠に転圧した。水和反応がないことと乾燥の影響を小さくするために転圧直後に脱型して、角柱圧縮強度 σ_{c2} を測定した。

上記で決定した配合の理論密度を算出し、それに対する締固め率を任意に決定すると、空洞部の体積をもとに材料の必要量が求まる。それらを予め計量・混練し、空洞部が床版上面までの体積に充填されるまでハンドバイブレータを用いて締め固めた。

2.4 劣化部の補修方法

「補修床版」では再現した劣化部を上面からの樹脂注入により補修した。この方法には、パイプを打ち込んでマニュアルガンで樹脂を注入する方法（マニュアルガン方式あるいは低圧注入法）と、散布して自然落下により浸透させる方法（自然落下方式）がある。本研究では両者を併用することとした。50×50cmの劣化部に対して7本のパイプをほぼ等間隔で挿入し、そのパイプを通して樹脂を低圧注入した。その状況を写真-1に示す。樹脂の注入状況は空隙率に大きく影響される。すなわち空隙率が大きい場合ほど樹脂の注入が容易となる。さらに、空隙の形態すなわち連続空隙であるか独立空隙であるか



写真-1 補修床版（劣化部へのパイプ打込み直後）

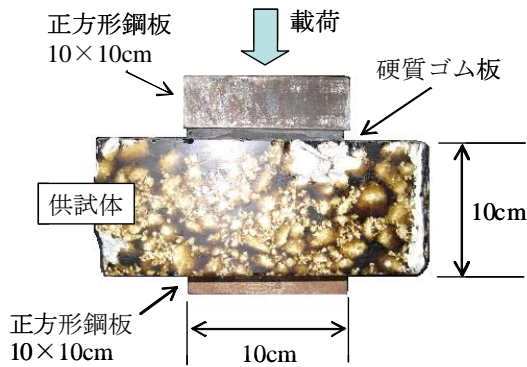


写真-2 補修部の圧縮強度測定

にも影響を受けるが、その区別は困難なため、ここでは総合して空隙率で評価することとした。

また、脆弱部の空隙率は現場によって異なるため、ここでは定量的に締固め率と樹脂の注入量を明らかにした。なお、空隙率は含水量によっても影響を受けるため、実験における乾燥状態も明らかにする必要がある。本研究では自然状態で十分に乾燥した状態を前提とした。自然乾燥により質量変化がなくなる日数を予備実験により確認し、劣化部の打設から 25 日の室内乾燥後に樹脂を注入した。十分な硬化を確保するために樹脂の注入後から 24 時間後に試験に供した。補修部の強度については、写真-2 のように、市販の容器を型枠として作製した厚さ 10cm の平板状供試体に対し、10×10cm の荷重面積にて圧縮荷重を与えた。供試体で黒く見えているのが補修剤である。破壊荷重を断面積で除して角柱圧縮強度 σ_{c3} とした。

2.5 押抜きせん断試験方法

床版は浮き上がり防止を設けない四辺単純支持とし、支持辺長 30cm、荷重スパン 100cm とした。床版上面の中央に 10×10cm の硬質ゴム板を介して集中荷重を与えた。荷重条件は 0.5mm/分の変位制御とした。劣化部を除

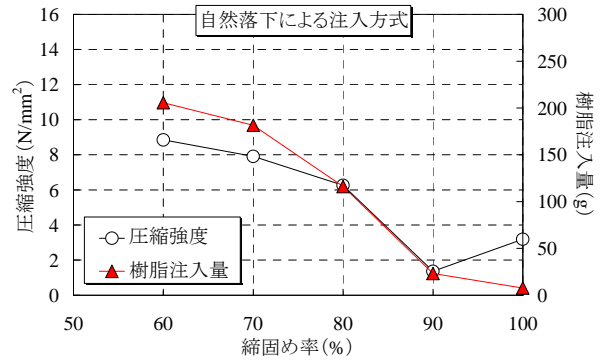


図-2 締固め率と樹脂注入量および圧縮強度の関係（自然落下方式）

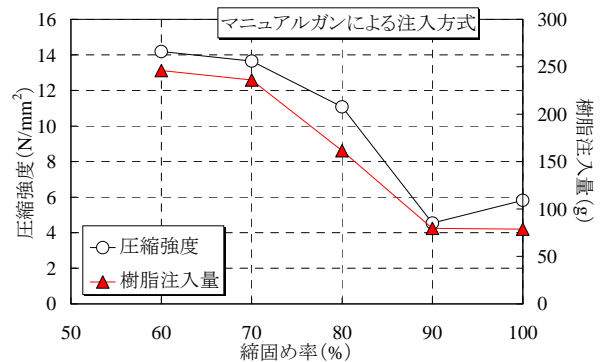


図-3 締固め率と樹脂注入量および圧縮強度の関係（マニュアルガン方式）

く床版コンクリートの材齢は約 1 年とし、十分な強度発現を前提とした。測定項目は床版中央部の変位、格子筋ひずみ、床版の上面と下面のコンクリートひずみである。

3. 実験結果

3.1 材料強度

健全なコンクリートすなわち劣化部以外の床版を打設する際に採取した供試体による材料強度は、円柱圧縮強度 σ_{c1} は 36.7 N/mm²、曲げ強度 σ_b は 6.0 N/mm²、割裂引張強度 σ_t は 3.2 N/mm²、曲げ試験後の供試体片による角柱圧縮強度は 41.0 N/mm² であった。圧縮ヤング係数は 3.84 N/mm² であった。

劣化部の角柱圧縮強度 σ_{c2} は 0.645 N/mm² と極めて小さく、これは粗骨材の噛み合わせによる抵抗力のみと考えられる。補修部の角柱圧縮強度 σ_{c3} は 6.50 N/mm² であった。実験中の目視観察によると、最大荷重より小さい荷重段階において樹脂マトリックスに亀裂が発生することで荷重荷重が一旦低下したものの、その後も荷重を続けると荷重が再上昇し、最大荷重に達した。

3.2 劣化部の物性

図-2 および図-3 に締固め率と樹脂注入量および圧縮

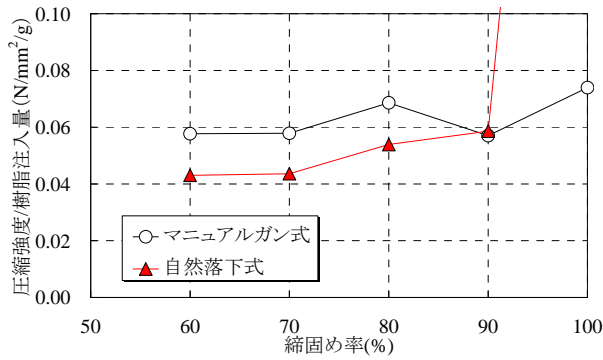


図-4 単位樹脂量による強度の比較

強度の関係を樹脂の注入方式別に示す。ここでの圧縮強度はφ10×20cmの円柱により求めた。

硬化率が100%とは、空隙率を0%として計量した試料を入念に所定の体積に締め固めた状態である。当然ながら、硬化率が小さくなるほど樹脂の注入量は大きいことが確認できる。また、樹脂量が多いほど圧縮強度も大きい傾向にある。ただし、硬化率が100%の場合は樹脂がほとんど注入できなかったにもかかわらず、骨材の噛み合わせ作用が発揮しやすい状態であるために、圧縮強度は硬化率90%の場合よりも大きくなっている。すなわち、樹脂の注入作業にとって最も過酷な条件は硬化率90%であるといえる。この傾向はどちらの注入方式においても同様であり、本研究では最も厳しい条件での効果を確認する意味から、この硬化率を採用した。

樹脂による強度改善効果を確認するため、圧縮強度を注入した樹脂の量で除した値を図-4に示す。硬化率100%における自然落下方式での樹脂注入量は極めて小さく、その値を分母にしたために特異な点が生じている。総じてマニュアルガン方式による樹脂の効果が高く、空隙の細部まで樹脂が浸透することを裏付けている。

3.3 押抜きせん断耐力

押抜きせん断耐力は、健全床版の場合が299kN、劣化床版の場合が109kN、補修床版の場合が160kNであった。破壊形式はいずれも典型的な押抜きせん断破壊を示した(写真-3~4参照)。

図-5にコンクリートの圧縮強度と代表的な算定式により求めた床版の押抜きせん断耐力の算定値^{7)~10)}の関係を示す。各式には圧縮強度に対する適用範囲が存在するものと考えられるが、ここでは参考のため全範囲で算出した。なお、式中の部材安全係数は1.0として求めている。中立軸より上側のコンクリート強度だけを小さい値で独立的に代入できるのは松井式のみである。そのように圧縮域のコンクリート強度を変化させ、引張域の強度を健全なままの一定値で求めた場合を「松井式B」としている。一方、圧縮域と引張域のコンクリート強度を

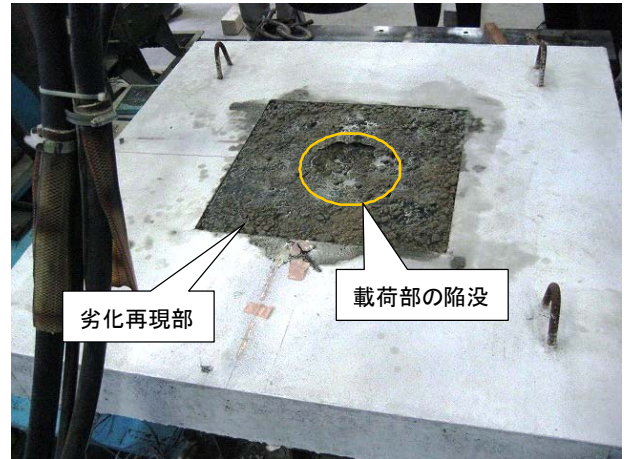


写真-3 補修床版の試験後：上面



写真-4 補修床版の試験後（下面の状況）

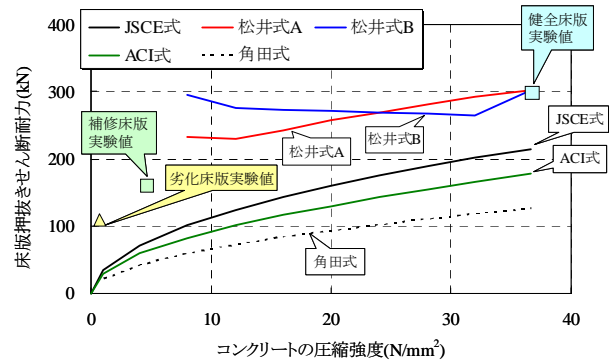


図-5 コンクリート強度と床版耐力の算定値の関係

同時に変化させた場合を「松井式A」としている。

ほとんどの算定式においてコンクリート強度が低下すると床版耐力も低下する。松井式Bにおいては圧縮域のコンクリート強度を小さくすると中立軸位置が大幅に上昇する計算となるため、床版強度は逆に大きくなる場合が生じている。

実際の材料試験で得られた圧縮強度は36.7N/mm²であり、この値を用いた場合の実験値(健全床版の破壊荷重)

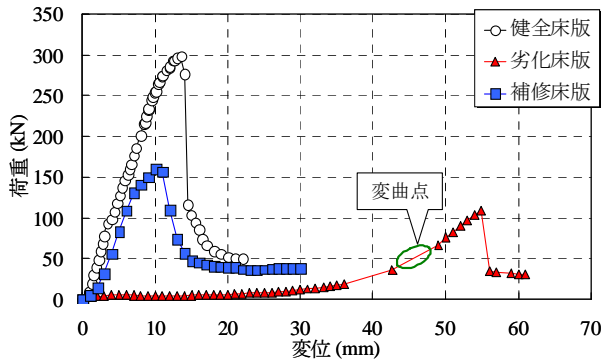


図-6 荷重と変位の関係

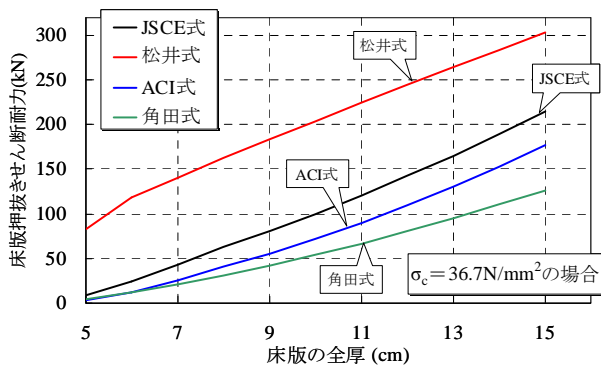


図-7 床版厚と押抜きせん断耐力の算定値の関係

は、松井式による算定値とほとんど一致した。一方で補修しない場合の劣化部の圧縮強度は前述のようにほとんど期待できず (0.639N/mm^2)、これから求めた床版耐力の算定値も数 10kN と小さいものの、実際は健全な場合の 36%に相当する 109kN の耐力は残存しており、これは「健全な下部」および後述の「劣化部における粗骨材の噛み合わせ」によって発現されたものである。

3.4 変位とひずみ

図-6 に荷重と変位の関係を示す。なお、ここで示す変位は押込み量と実際の床版変位の合計値である。劣化床版は載荷板が模擬劣化部を押し込んで周囲が盛り上がる形態での変形が大きく進行した。その後、徐々に荷重が増加したが、これは粗骨材同士の噛み合わせ作用に伴うものと推察される。

補修床版では 150kN 程度の荷重までの初期剛性が健全床版と同等まで回復している。すなわち、道路橋床版の設計輪荷重である 100kN の荷重レベルでは補修床版の鉛直変位は健全床版と同レベルまで抑制されており、床版の設計上の範囲内では樹脂補修の効果が確認できる。なお、最大荷重は健全床版の半分程度まで回復した。

図-7 にコンクリート強度を一定 ($\sigma_c = 36.7\text{N/mm}^2$) とした場合の、床版厚と押抜きせん断耐力の関係を示す。劣化床版の耐力である 109kN に相当する床版の全厚は算



写真-5 劣化床版の試験後（下面の状況）

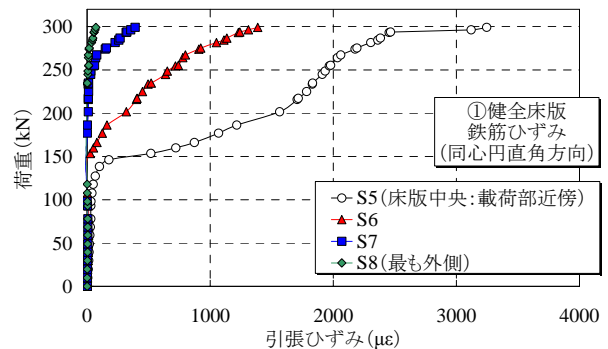


図-8 健全床版の鉄筋ひずみ

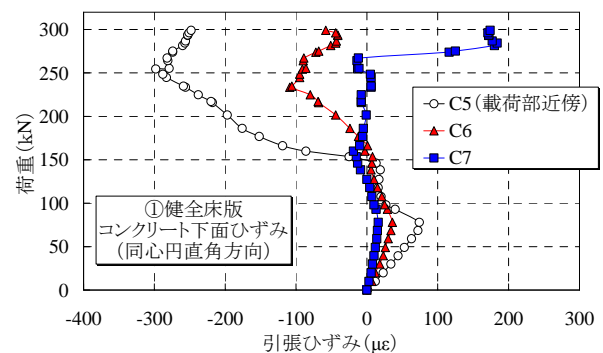


図-9 健全床版のコンクリートひずみ

定式によって異なり 5.8~13.9cm となる。例えば JSCE 式の場合は 10.5cm であり、粗骨材の噛み合わせ効果が発揮されるまで劣化部コンクリートが圧縮されるために、その分床版厚が減少したとすると、変形による減少量が 4.5cm となる。すなわち、図-6 における変曲点とはほぼ一致する。したがって、減少後の床版厚を設計床版厚として算定値を求めることが可能と推察される。その場合、実際の路面ではアスファルト被覆によって変形に対する拘束効果も期待できるため、見かけの耐力は本実験よ

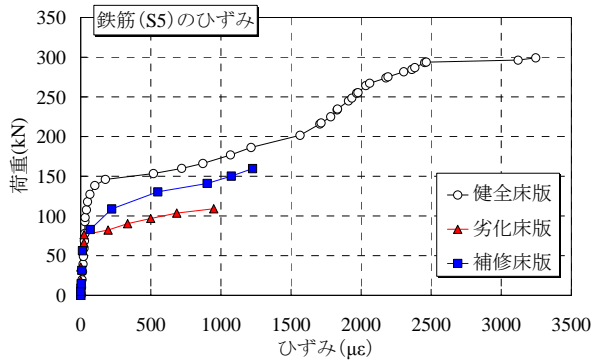


図-10 載荷部近傍における鉄筋のひずみ

りも大きくなると考えられる。

写真-5 に劣化床版の試験後の下面を示すが、写真-2 と比較すると押抜き部が小さいことが確認できる。載荷面積は一定であり、せん断破壊面の角度が同じと仮定すると、実際に耐力を発揮した床版部分の厚みが薄いため、破壊面の広がり小さくなったことを意味する。

図-8 に健全床版の引張鉄筋ひずみを、図-9 に下面のコンクリートひずみを示す。いずれも床版中央から同心円直角方向のひずみ量を測定している。測定位置 8 番のデータがないのは、載荷時に支持辺位置と重なるためである。凡例における数字は図-1 の測定位置を示している。引張鉄筋のひずみは床版中央に近いほど大きく、はりの場合と同様の傾向が確認できる。

一方でコンクリートのひずみは挙動に一定の傾向がなく、曲げひび割れの発生に伴って局所的に挙動が大きく変化したことがうかがえる。そこで、床版間の比較としては S5 の鉄筋ひずみを対象とした。その結果を図-10 に示す。いずれも最大荷重までの挙動を示している。初期剛性はいずれも同等に大きいものの、それぞれに変曲点が存在し、そこから剛性が顕著に低下している。これらの変曲点は下面のひび割れ発生荷重あるいは進展荷重と推察される。健全床版では 150kN 付近が変曲点であるのに対して、劣化床版と補修床版ではいずれも同程度の約 80kN である。変曲点以降の挙動を劣化床版と補修床版と比較すると、補修床版の剛性が高い。すなわち、樹脂注入による補修により補修部の剛性が高まり、鉄筋が負担する応力を軽減しているため、床版の設計輪荷重である 100kN 程度の荷重レベルでは、樹脂注入による補修効果があると考えられる。

4. まとめ

本研究では圧縮領域の上面のみが劣化した床版およびその劣化を補修した床版を模擬的に作製し、押抜きせん断耐力を求めた。その結果、以下の知見が得られた。(1) 上面劣化による床版耐力は、劣化部の変形量を差し

引いた床版厚さを対象に、土木学会の算定式を用いて求めることが概ね可能である。

- (2) 樹脂注入による補修は、床版の部材耐力を健全な状態まで回復させるのは困難であるが、剛性の回復は可能であり、特に載荷位置近傍における床版の変位と鉄筋ひずみを抑制する範囲内の物性回復においては補修効果が期待できる。

本実験では、諸条件の中で最も厳しい条件での補修を想定して試験体を作製した。実際の補修現場では、劣化深さ、樹脂注入量などが緩和され、載荷条件もアスファルトを介することにより荷重が分散される。したがって、樹脂の注入および含浸による簡易補修の効果は期待できる。劣化量と補修効果の関係を求めるには劣化量の定量評価が必要であり、今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 関口武一, 笹井幸男, 石塚喬康: 塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事, コンクリート工学, Vol.32, No.5, pp.41-49, 1994.5.
- 2) 松富 繁, 平野毅志, 渡辺健次, 金子雄一: 塩害を受ける道路橋床版の劣化予測, 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 3 巻, pp.371-376, 2003.10.
- 3) 横山和昭, 稲葉尚文, 山根立行: 凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透の予測手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.881-886, 2006.7.
- 4) 横山和昭, 本荘清司, 葛目和宏, 藤原規雄: 道路橋 RC 床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, pp.1687-1692, 2008.7.
- 5) 稲葉尚文, 本間淳史, 今村壮宏, 徳光 卓: 増厚された RC 床版の静的載荷試験による検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.403-408, 2007.7.
- 6) 横山和昭, 本間淳史: 上面を補強した RC 床版の疲労耐久性に関する評価実験, 第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.179-184, 2006.7.
- 7) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書設計編, 本編第 9 章, 安全性に関する照査, p.141
- 8) 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp.105-115, 1974.9.
- 9) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号/V-1, pp.133-141, 1984.8.
- 10) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), ACI, 1983.