

積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について

Study on a Method to Extend the Life of RC Slab Structures in Cold Snowy Regions

三田村浩*, 佐藤京**, 西弘明***, 渡辺忠朋****

Hiroshi Mitamura, Takashi Sato, Hiroaki Nishi, Tadatomo Watanabe

*博士(工学), (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

** (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

***博士(工学), (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

****博士(工学), 北武コンサルタント(株) (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7 丁目)

In this study, focus was placed on both frost deterioration on the top of slabs and fatigue deterioration on the bottom; a wheel running test was conducted on a specimen that had been repaired and reinforced and on a standard control specimen. The results confirmed that the reinforced specimen was capable of regaining the initial rigidity of the newly placed standard specimen, and that a life extension effect was achieved by its high fatigue durability. The test also revealed that it was possible to evaluate the reinforcement effect almost quantitatively through experiments and theoretical equations.

Key Words: fatigue durability, frost deterioration, punching shear fracture, fiber sheet, wheel running test, life extension

キーワード: 疲労耐久性, 凍害, 押抜きせん断破壊, 繊維シート, 輪荷重走行試験, 延命化

1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版(以下, RC 床版)の疲労損傷は, 大型車による輪荷重の繰り返し作用によって生じる. 特に昭和 40 年代前後に架設された橋梁では, RC 床版の配力鉄筋が少なく, 疲労耐久性が小さいことが顕著である^{1),2)}.

北海道においてもその傾向は同様であるが, 最近, 確認されている RC 床版の押抜きせん断破壊は, 大型車交通量が多い市街地近郊だけでなく, 比較的交通量の少ない地方部においても発生している. このような RC 床版の損傷床版の現地調査を行うと, 床版下面のひび割れが橋軸直角方向の 1 方向であり, ひび割れ密度は 3m/m^2 以下と少ない. しかし, アスファルト舗装を撤去すると, RC 床版上面の上面側鉄筋のかぶりコンクリート部分がスケーリングや砂利化していることが判明している.

積雪寒冷地である北海道の橋梁では, 冬期間の除雪の際に路肩や地覆に残雪が滞積し, 日照により融雪水となり除々に RC 床版上面へ浸透して滞水する. この滞水が凍結融解作用を受け, RC 床版上面にスケーリングや砂利化などの劣化現象を発生させたものと考えられる.

著者らは, これまで, RC 床版の凍害による劣化が, RC 床版の破壊プロセスや疲労寿命に及ぼす影響を明ら

かにするために, 凍害劣化を受けた実際の道路橋 RC 床版などを用いた実験的研究を行い, RC 床版の上面が劣化により脆弱化すると, 曲げやせん断の有効断面が減少し, RC 床版そのものの疲労耐久性が大きく低下することを明らかにしてきた³⁾.

このような状況を踏まえて, 積雪寒冷地特有の劣化損傷を受けた既設 RC 床版の延命手法を策定することが急務となっている.

延命手法として, 凍害損傷を受けた部分のみを補修し, 適切な防水工の施工により凍害の損傷を抑止することで, 残存供用年数が確保できる場合は補強を伴わない工法・手法により対応する方向で研究を行っている^{4),5)}. しかし, 必要な残存供用年数を確保できない場合には, これらの補修のほかに RC 床版本体に何らかの補強を実施しなければならない.

著者らは, 現在, 残存供用年数を確保し既設 RC 床版の寿命を延命させる一手法として, RC 床版上面の損傷部を補修し, 下面を補強する方法について研究を進めている.

本研究では, 凍害劣化を受けた道路橋 RC 床版の残存供用年数を確保し既設 RC 床版の寿命を延命させる合理的な補修・補強工法の確立のため, RC 床版上面の損傷部を除去し新たにコンクリートの施工により補修し, か

つ下面を連続繊維シート等で補強する方法に着目し、RC 床版上面の凍害劣化と RC 床版の疲労劣化の両方に対する補修および補強を施した供試体を用いて輪荷重走行試験を実施した。本論文では、破壊時の走行回数や破壊状況、鉄筋および補強材のひずみなどの計測結果に基づき、その補修および補強効果に関する検討を行った。

2. RC 床版上面の凍害と押抜きせん断破壊の事例

凍害は、コンクリート内の空隙に侵入した水分の凍結融解の繰返しにより、表面部分にスケーリングが発生し、やがてポップアウト、砂利化へと進展する。写真-1～3は、北海道内における RC 床版の凍害事例である。

これらの橋梁の架設年次は、いずれも昭和 30 年代後半から 40 年代前半である。当時の橋梁では、RC 床版への防水対策は考慮されておらず、水の侵入に対する予防保全がなされていない。また、特に横断勾配や縦断勾配の低い、滞水しやすい箇所では凍害劣化現象が起りやすく、併せて活荷重衝撃が伴う場合には損傷が著しく進行することが現地調査から確認されている。

スケーリング事例を写真-1 に示す。アスファルト舗装のひび割れや剥離が輪荷重直下で顕著となり、その補修工事を行う際に確認されたものである。上面コンクリートが、スケーリングにより脆弱化していた。この RC 床版は、床版支間の中央に縦桁を増設して曲げやたわみを抑制する補強工法が過年度に実施されている。

次に、舗装直下ですでに砂利化現象まで至っていた事例を写真-2 に示す。舗装の撤去後、ハンマーの軽い打撃で容易に砂利化するほど劣化が進行しており、上面側鉄筋が完全に露出している。また、コンクリートは湿潤状態で、砂利化したコンクリート内部に滞水が確認された。撤去工事前には降雨がなかったことから、概ね常時滞水していることが想定される。また、この橋の RC 床版下面全体に鋼板接着補強が実施されており、押抜きせん断破壊には至っていないが、水抜き管等の排水設備が無かったことから、鋼板接着が滞水の主要因になっているものと考えられた。

写真-3 には、実際に押抜きせん断破壊に至った事例を示す。写真左上が外側線で、写真には納まっていないが手前側に伸縮装置がある。RC 床版下面の状況を確認したところ、ひび割れは橋軸直角方向に数本見られるのみで、押抜きせん断破壊の前兆に示される二方向ひび割れには至っていなかった。ただし、RC 床版上面については、舗装と RC 床版の境界に水の滲出が見られ、床版コンクリートは、写真-1 や写真-2 と同様なスケーリングや砂利化が発生していた。

写真-3 に示す橋梁 RC 床版のように、RC 床版下面の劣化損傷程度が小さくても、上面の劣化状況によっては押抜きせん断破壊に至る事例が発生しており、積雪寒冷



写真-1 RC 床版上面のスケーリング



写真-2 RC 床版上面の砂利化現象



写真-3 砂利化後の押抜きせん断破壊

地における橋梁 RC 床版の維持管理において、上面の劣化に対する補修判定や予防措置が特に重要であると考えられる。

3. 供試体および実験概要

3.1 供試体材料および寸法

実験は、RC 床版上面の凍害劣化部を除去し、除去部に新たにコンクリートを施工し一体化し、下面には 2 方向連続繊維シート補強を施した供試体（以下、補強供試体）と、補修・補強を施さない供試体（以下、基準供試体）の 2 体を用いて、輪荷重走行載荷実験を実施した。なお、これまでの RC 床版補強は、上面増厚や下面に多層の連続繊維シートを接着する工法等が行なわれている。既往の実験では、RC 床版下面に連続繊維シートを橋軸方向に 1 層、橋軸直角方向に 1 層貼り付けるだけで無補強の RC 床版の 5～10 倍程度の耐力が得られることが判ってきた⁶⁾。

よって、本実験においては RC 床版下面の補強に関しては、2 方向に連続繊維シートを接着する補強工法を採用することとした。

(1) 基準供試体

基準供試体は、昭和 39 年に施工された実橋梁の RC 床版をモデルとして設定し、幅 2650mm×長さ 3300mm×厚さ 160mm の RC 床版とした。コンクリートおよび鉄筋の材料特性などを表-1 に示す。なお、鉄筋については、実橋に合せて SR235 の丸鋼を用いている。供試体の形状および配筋状況、変位およびゲージの計測配置を図-1 に示す。

(2) 補強供試体

補強供試体は図-2 に示す順序で凍害劣化を受けた RC 床版の補修・補強を再現した供試体とした。

供試体の形状および配筋状況は、基準供試体と同様であり、その材料特性などを表-1 に示す。

本検討に用いた補修・補強方法は、凍害劣化を受けた RC 床版上面部の劣化コンクリートの補修と、耐疲労性の向上を目的とした補強材を用いた下面補強を組み合わせたものである。

補強供試体は、まず、最初に、予備載荷により下面側にひび割れを発生させた後、凍害劣化を模擬するため、これまで実橋調査における凍害劣化状況から、RC 床版上面から 20mm を凍害劣化による損傷領域と設定して、RC 床版上面 20mm の部分をウォータージェット（以下：WJ）で除去した。ここで想定した劣化状況は、2 章で示した写真-1 の状態を模擬したものである。次に、補修材料と既設コンクリートの一体性を確保するため、さらに厚さ 50mm を除去して、上側配力鉄筋の下面まで現れる、全厚 70mm を切削し、超早硬コンクリートで補修した。既設コンクリートと超早硬コンクリートの打継ぎ目は、WJ による切削による凹凸で、付着が十分に確保できる状態である。なお、超早硬コンクリートは、施工時間の短縮の観点から、選定したものである。

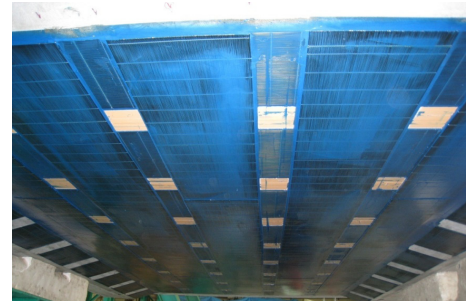


写真-4 繊維シート貼付状況

表-1 供試体諸元

		基準供試体	補強供試体	備考
床版厚	mm	160	160	
鉄筋				
上面主鉄筋	径-間隔	φ 16-260mm	φ 16-260mm	
下面主鉄筋		φ 16-130mm	φ 16-130mm	
上面配力筋		φ 13-230mm	φ 13-230mm	
下面配力筋		φ 13-230mm	φ 13-230mm	
降伏強度	N/mm ²	235	235	SR235
コンクリート				
圧縮強度	N/mm ²	43.23	45.30	
ヤング係数	kN/mm ²	25.4	26	

表-2 補修・補強材料特性

		基準供試体	補強供試体	備考
下面補強材				
使用材料	-	-	CFRPシート	ストランド型
目付け量	g/m ²	-	600	
引張強度	N/mm ²	-	3400以上	
ヤング係数	kN/mm ²	-	245	
上面補修材				
使用材料	-	-	超早硬コンクリート	
圧縮強度	N/mm ²	-	69.34	
ヤング係数	kN/mm ²	-	34.1	

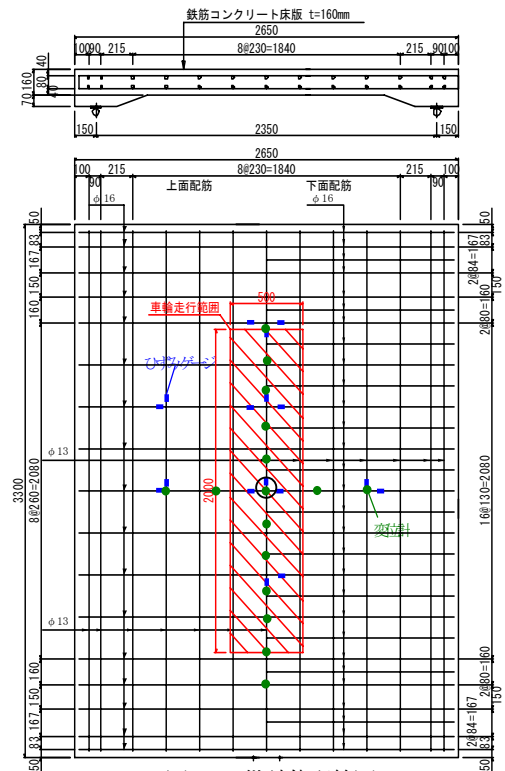


図-1 供試体配筋図

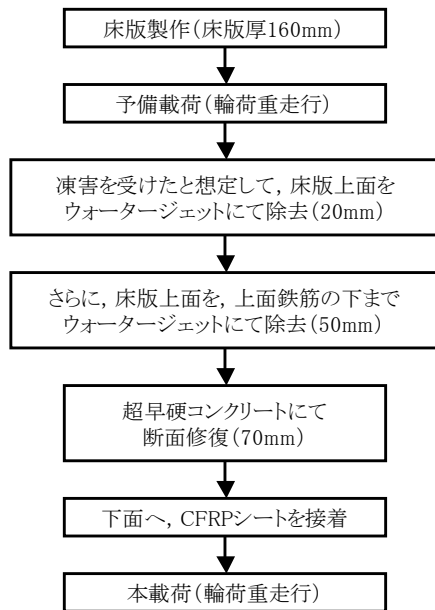


図-2 補修補強実験フロー



写真-5 輪荷重走行試験機(クランク式)

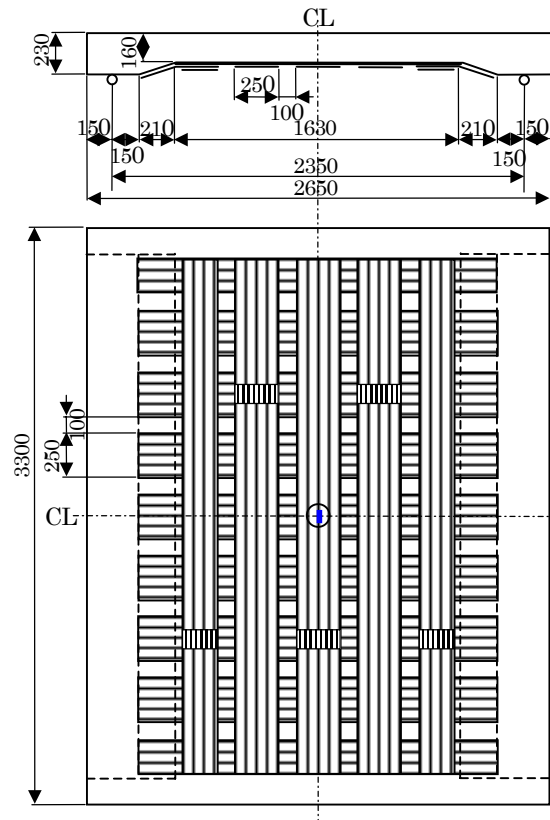


図-3 CFRP シートの配置状況

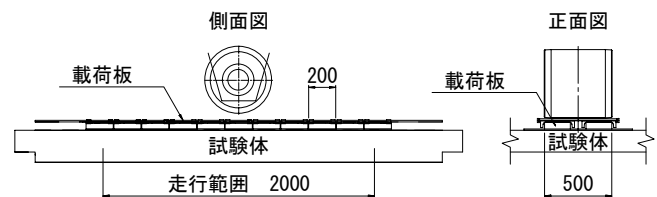


図-4 輪荷重の載荷状況図

供試体の下面側の補強は、ストランド型炭素繊維シート（以下、CFRP シート）を、格子状に 25cm 幅シートを 10cm 間隔で 1 層接着した。なお、CFRP シート 1 層あたりの、繊維の断面積から算定される厚さは、約 0.333mm である。

従来型の連続繊維シートは、施工現場で接着剤を含浸させて FRP 化する必要があり、含浸作業に手間がかかるのみでなく、含浸不良や浮き膨れの発生など工事品質の点でも課題があった。特に寒冷地においては、低温時に樹脂が増粘し含浸性が低下するため、施工性の改善が望まれていた。ストランド型炭素繊維シートは、工場で連続繊維束に樹脂を含浸して加熱硬化して FRP ストランドを製造し、これをすだれ状にシート化したもので、不陸修正工や現場含浸作業が不要で施工性がよく工期短縮が可能であり、工事品質確保の点でも優れている。

CFRP シートの配置状況を図-3 に示す。CFRP シートの材料特性を表-2 に示す。また、写真-4 に繊維シート貼付状況を示す。

3.2 実験方法

(1) 基準供試体

実験には、クランク式の輪荷重走行試験機を用いた。写真-5 に輪荷重走行試験機を示す。

供試体は 2 辺単純支持、2 辺弾性支持とし、スパン中央部の幅 500mm の載荷板上の 2000mm 範囲に鉄輪を往復させて載荷した。図-4 に輪荷重の載荷状況図を示す。補強供試体は、初期損傷を与えるために予備載荷をおこなった。なお、載荷は、図-5 に示すとおり、120 kN から荷重漸増載荷で、各荷重段階で 10 万回の繰返し載荷を行い、破壊まで実施した。

(2) 補強供試体

補強供試体では、まず、一般的に疲労劣化で補修が必要となるひび割れを再現するため、劣化度を 0.5 相当に設定し、そのたわみの目標値を設定して載荷した。なお、劣化度とたわみの関係は式 (1) により算定し、劣化度を 0.5 として、以下に示すように、たわみ 4.02mm とし

た．その結果，150 kN×2 千回载荷にて活荷重たわみが目標値に達し载荷終了とした．

$$D = (\delta - \delta_0) / (\delta c - \delta_0) \quad (1)$$

ここに，

D：劣化度 ($0 < D \leq 1$)

δ ：RC 床版中央におけるたわみ (実測値)

δ_0 ：全断面のコンクリートを有効と見なした時の RC 床版中央におけるたわみ (計算値) (=1.62mm)

δc ：中立軸以下の引張コンクリートを無視した RC 床版中央におけるたわみ (計算値) (=6.42mm)

劣化度 0.5 相当の活荷重たわみ

$$\begin{aligned} \delta &= 0.5 \times (\delta c - \delta_0) + \delta_0 \\ &= 0.5 \times (6.42 - 1.62) + 1.62 = 4.02 \text{ mm} \end{aligned}$$

なお，凍害劣化を受けたと想定した RC 床版上面部を 20mm 切削した段階，上面補修を完了した段階，および CFRP シートの接着による下面補強を完了した段階で，それぞれ，RC 床版の荷重と変位の関係調べるために，単調载荷を行った．その後，補強供試体として，本载荷を実施した．本载荷の载荷プログラムを，図-5 に示す．補強供試体は，120 kN×10 万回，130 kN×10 万回，150 kN×10 万回，170 kN×10 万回，200 kN×10 万回，230 kN×10 万回，260 kN×6.2 万回まで荷重漸増载荷にて，破壊まで行った．

4. 実験結果及び考察

4.1 走行回数とたわみの関係

基準供試体と補強供試体の走行回数とたわみ (スパン中央位置での鉛直変位) の関係を図-6 に示す．基準供試体は，120 kN から階段状漸増载荷を行い，载荷荷重を 200 kN に増加させてから，たわみが急増し，41.8 万回・活荷重たわみ 11.2mm の時点で押抜きせん断破壊に至った．補強供試体は，荷重を 260 kN に増加させてから，たわみが急増し 66.2 万回で活荷重たわみ 16.2mm の時点で押抜きせん断破壊に至った．

補強供試体は，各荷重段階での変位が基準供試体よりも小さく，荷重を上げた段階毎の増加は見られるが，荷重が一定の間はたわみの増加はほとんどなく安定していることが分かる．

4.2 走行回数と鉄筋およびシートのひずみ

走行回数と鉄筋及びシートひずみの関係を図-7 に示す．図に示したひずみ測定箇所は，それぞれ，図-1 および図-3 中に，丸で示した箇所に設置したひずみゲージによる計測値である．

補強供試体の鉄筋およびシートのひずみは，荷重の漸

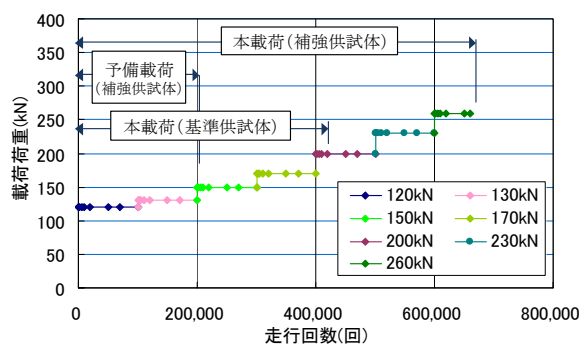


図-5 荷重载荷プログラム

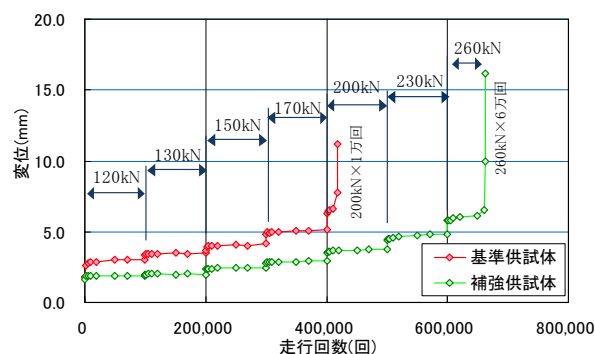


図-6 走行回数とたわみの関係

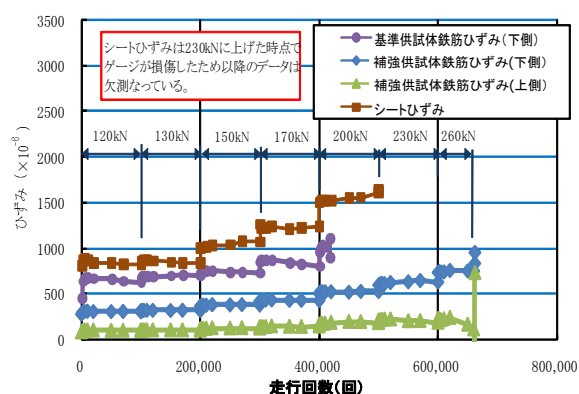


図-7 ひずみと走行回数関係

増载荷に応じて徐々に大きくなり，たわみと同様に荷重が一定の間は安定して推移する．なお，荷重を 230 kN に上げた時点でシートのひずみゲージが損傷し，以降のデータは欠測となっている．

鉄筋ひずみに着目すると，補強供試体は，基準供試体に比べて鉄筋ひずみは小さくなっており，シートによって引張を負担していることが分かる．また，補強供試体においては，ゲージが損傷するまでの計測結果によると，シートのひずみは鉄筋に比べて大きく，RC 床版に対して最も力を分担していると考えられる．特に，载荷荷重を増加させると鉄筋ひずみの増加に比べて，CFRP シートのひずみ増加が顕著であり，このことから，CFRP シートは有効に抵抗していると考えられる．

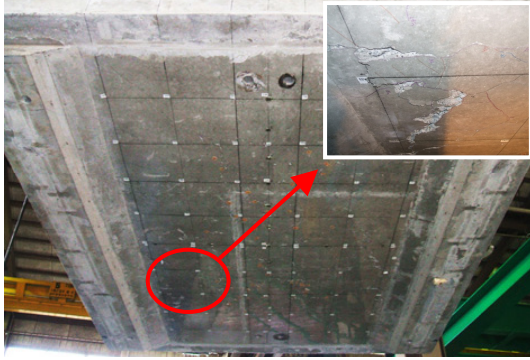


写真-6 実験終了後の基準供試体下面の破壊状況



写真-7 実験終了後の補強供試体下面の破壊状況

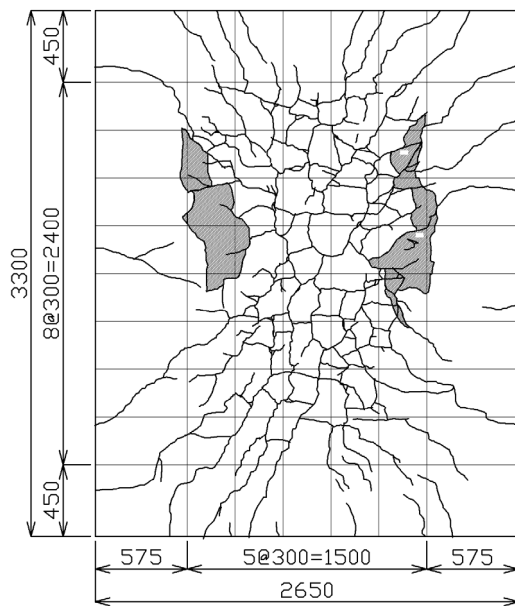


図-8 実験終了後の基準供試体下面のひび割れ図

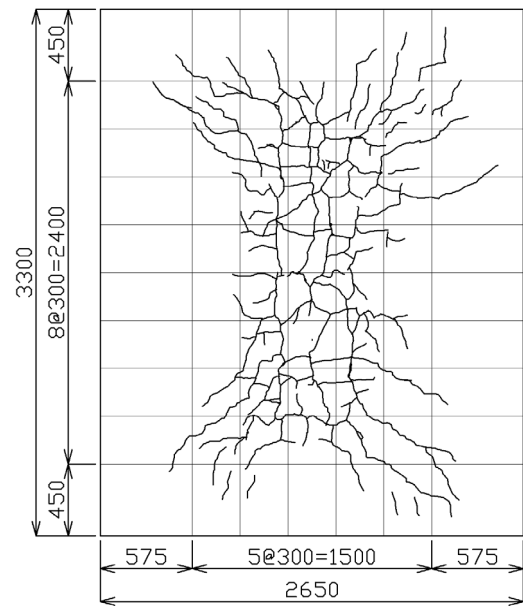


図-9 予備載荷終了後の補強供試体下面のひび割れ図

4.3 破壊状況

(1) 基準供試体

基準供試体の実験終了後の供試体下面の状況を写真-6、ひび割れ状況を図-8に示す。ひびわれは、載荷領域付近では、概ね二方向に発生し、押抜きせん断破壊が生じていた。また、押抜きせん断領域から、供試体の四隅に向かう方向に放射線上にひび割れが発生していた。

(2) 補強供試体

補強供試体の予備載荷終了時の供試体下面のひび割れ状況を図-9に示す。また、補強供試体の実験終了後の供試体下面の状況を写真-7、CFRPシートの剥離状況を図-10に示す。図-10中に示したひび割れ位置は、予備載荷終了時のものである。CFRPシートは、図-10に示すように、下面のCFRPシートが全体的に剥離して、端部のみが接着してハンモックのように吊り下がった状態で終了した。しかし、シートの破断はなく、剥離に関しても、コンクリートとシートの接着面が剥がれたのではなく、両者は接着されたままの状態、コンクリートの押抜きせん断が生じた破壊面から剥離していた。

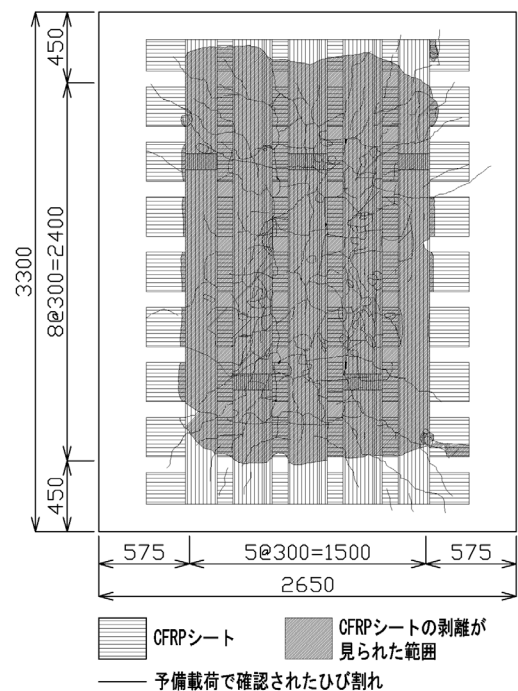


図-10 実験終了後の補強供試体のシート剥離状況

4.4 剛性

補強供試体の①初期載荷時、②予備載荷時、③上面側のコンクリートの切削時の載荷時、④上面側のコンクリートの補修後の載荷時、⑤下面側のCFRPシート補強後の載荷時の各状態別の荷重(P)とたわみ(δ)関係から算定した剛性($K=P/\delta$)を図-11に示す。

①の初期剛性に対して②の予備載荷時の剛性は大きく低下している。これは、輪荷重の繰返し載荷により下面側に発生したコンクリートのひび割れによる剛性低下の影響と考えられる。

併せて、③の凍害劣化を模擬して2cm切削した場合は、最も大きく剛性が低下している。これは、上面の切削による断面剛性の低下による影響と考えられる。また、④の上面側のコンクリートの補修後の載荷時では、予備載荷時の劣化状態と同程度の剛性に回復している。これは上面側に補修されたコンクリートが一体化していることを意味していると考えられる。本実験では、前述の通り、上面補修を行うための切削を、ウォータージェットにより行ったため、切削面に凹凸が形成されており、これにより一体化が確保されたものと考えられる。よって、上面側の補修のみでも曲げ剛性の回復により、たわみが減少することから、この状態でも、一定の補強効果は得られるものと考えられる。ただし、すでに下面側に発生したひび割れの影響が残存するため、圧縮コンクリートの健全性によるせん断力の分担のみが補強効果として現れると考えられる。⑤の下面側の補強後の載荷時では、CFRPシートにより補強することで、剛性はほぼ初期剛性まで回復することが確認された。剛性が、ほぼ初期剛性まで回復することは、載荷によるひび割れ幅の振幅が抑制され、RC床版自体の変位が減少することを意味している。すなわち、CFRPシートによって、ひび割れ面における応力振幅が減少し、前述した、はり状化から押抜きせん断破壊に至る過程における、ひびわれ面の劣化が抑制されることが、CFRPシートの補強効果の主要因として考えられる。

4.5 押抜きせん断耐力

輪荷重走行試験に関する既往の研究成果では、横軸に破壊までの走行回数、縦軸に載荷荷重(P)と試験体のせん断耐力(P_{sx})の比を示す、S-N図およびS-N式が示されている¹⁾。本実験の結果を整理するに当たり本実験に用いた試験機の仕様および載荷版が大阪大学の仕様と同じであることを考慮して、(2)の松井式¹⁾(以下：理論式)を適用することとした。

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \text{Log} N + \text{Log} C \quad (2)$$

ここに、

N：対象とする輪荷重Pの繰返し作用回数(回)

C：定数 乾燥状態では1.52

P_{sx} は次の式(3)より算出した⁷⁾。

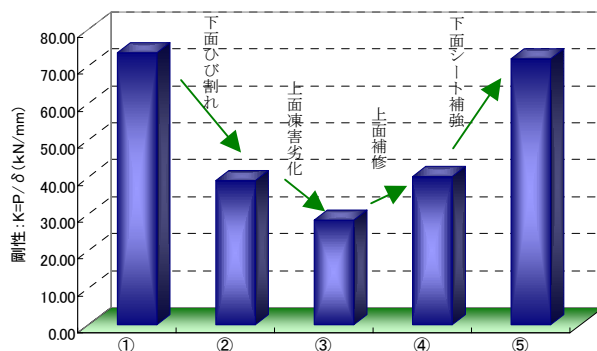


図-11 剛性の比較

$$P_{sx} = 2 \cdot B \cdot (\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (3)$$

ここに、

P_{sx} ：はり状化したRC床版の押抜きせん断耐力(N)

B：輪荷重に対するRC床版の有効幅 $B = b + 2d_d$ (mm)

b：橋軸方向の輪荷重載荷幅(mm)

d_d ：引張側配筋鉄筋の有効高(mm)

τ_{smax} ：コンクリートの最大せん断応力度
 $= 0.656 \cdot \sigma_c^{0.606}$ (N/mm²)

X_m ：主鉄筋に直角な断面の引張コンクリートを無視した中立軸深さ(mm)

σ_{tmax} ：コンクリートの最大引張応力度
 $= 0.269 \cdot \sigma_c^{2/3}$ (N/mm²)

C_m ：引張側主鉄筋のかぶり深さ(mm)

σ_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

また、一定荷重への換算は、RC床版の余寿命を交通量から推定する場合を想定し、B活荷重の後輪荷重100kNに衝撃係数と過積載車輛の混入等による安全率を付加して決定した。衝撃係数は橋梁支間により異なるが、ここでは30%とし、安全率を1.15程度と想定して一定荷重を150kNとした。

換算回数は、マイナーの線形累積被害則から、式(4)を適用して求めた⁸⁾。

$$N_{150} = \sum_{i=1}^n (P_i / 150)^m \times n_i \quad (4)$$

ここに、

N_{150} ：150kN一定荷重とした換算走行回数(回)

m：式(2)におけるS-N曲線の勾配の逆数
 $(m = 1 / 0.07835 = 12.76)$

P_i ：階段荷重載荷の載荷荷重(kN)

n_i ： P_i の走行回数(回)

ここで、実験から得られた基準供試体における破壊時走行回数を150kN荷重による走行回数(N_{150})に換算すると、

$$N_{150} = \Sigma ((\text{載荷荷重} / 150 \text{ kN})^{12.76} \times \text{載荷回数}) \\ = 1,008,600 \text{ 回} \quad \text{となる。}$$

これに対して、理論式から求められるせん断耐力および破壊時走行回数 (Nf) を、表-3 に示す。基準供試体のせん断耐力 $P_{sx}=316.5 \text{ kN}$ と 150 kN 荷重とのせん断強度比は 0.474 であるから、(2)式を展開して 150 kN 換算回数(Nf)を予測すると、

$$\begin{aligned} \text{Log Nf} &= (\text{Log C} - \text{Log} (P/P_{sx})) / 0.07835 \\ &= (\text{Log} 1.52 - \text{Log} 0.474) / 0.07835 = 6.459 \\ \text{Nf} &= 10^{6.459} \approx 2,877,600 \text{ 回} \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

この結果、実験の走行回数は、Nf に比べると約 $1/3$ 程度であった。これは、理論式のせん断耐力算定が異形棒鋼を対象としているのに対し、本実験では現橋に同定して丸鋼を選定したため、コンクリートとの付着力の差が大きく影響したものと推察される。

補強供試体は、凍害劣化により上面側コンクリートの損傷部分を除去して補修したことによる効果は、載荷実験結果により上面部分での顕著な劣化が確認できなかったことや、載荷時の剛性が予備載荷時の剛性まで回復したことから、補修後の RC 床版は、既設コンクリート部分と新設コンクリート部分は、一体化されているものと仮定できると考えられ、補修コンクリートによる断面の増加として取り扱うことが出来ると考えられる。

RC 床版の下面に CFRP シート補強を行った場合の補強効果に関して、一般に、下面に CFRP シート補強を行った RC 床版のせん断耐力は増加する。これは、①下面の CFRP シートによる引張剛性の寄与により、中立軸が深くなり、コンクリートの負担するせん断力が増加すること、②下面の CFRP シートにより RC 床版の異方性の度合いが低減され配力鉄筋方向の曲げ剛性が回復すること、③下面の CFRP シートにより、はり状化から押抜きせん断破壊に至る過程における、ひびわれ面の劣化が抑制されることなどの効果によるものと考えられる。

これらの効果は、現時点では詳細に定量化されていないが、本検討では、CFRP シート補強が、主鉄筋方向と配力鉄筋方向の二方向に行われる場合、本実験における最終破壊時でも配力鉄筋方向に貼った繊維が破断されずに引張に抵抗していることに着目した。

すなわち、CFRP シートにより、配力鉄筋によるかぶり破壊に対する抵抗性が増加していると考えた。

この場合、式(5)に示すように、松井らにより提案されている押抜きせん断破壊モデル⁹⁾に基づいた、配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮した RC 床版の押抜きせん断耐力算定方法を適用できるものと考えた。

$$\begin{aligned} P_{sx} &= 2 \cdot B \cdot (\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \\ &\quad + 2 \{ 0.25 \sigma_{tmax} \cdot C_d (a + 2d_m) \} \quad (5) \\ B &= b + 2d_d \end{aligned}$$

ここに、

P_{sx} : 配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮した RC

表-3 理論式によるせん断耐力及び破壊時走行回数

	単位	基準供試体
コンクリート強度 σ_c	N/mm^2	43.23
最大せん断応力度 $\tau_{smax} = 0.656 \times \sigma_c^{0.606}$	N/mm^2	6.43
引張側コンクリートを無視した中立軸 X_m	cm	3.928
載荷板の配力筋方向の辺長 b	cm	20.00
引張側配力筋までの有効高さ d_d	cm	10.55
梁状化したときの梁幅 $B = b + 2 \cdot d_d$	cm	41.10
最大引張応力度 $\sigma_{tmax} = 0.269 \times \sigma_c^{2/3}$	N/mm^2	3.31
引張主鉄筋のかぶり厚さ c_m	cm	4.00
$P_{sx} = 2 \cdot B \cdot (\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m)$	N	316445.67
	kN	316.45
P/P_{sx} ($P = 150 \text{ kN}$)	-	0.474
150kN換算回数予測 Nf		2,877,600

表-4 配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮したせん断耐力及び破壊時走行回数

	単位	補強供試体
コンクリート強度 σ_c	N/mm^2	45.30
最大せん断応力度 $\tau_{smax} = 0.656 \times \sigma_c^{0.606}$	N/mm^2	6.615
引張側コンクリートを無視した中立軸 X_m	cm	4.220
載荷板の配力筋方向の辺長 b	cm	20.00
引張側配力筋までの有効高さ d_d	cm	10.55
輪荷重に対する床版の有効幅 $B = b + 2 \cdot d_d$	cm	41.10
最大引張応力度 $\sigma_{tmax} = 0.269 \times \sigma_c^{2/3}$	N/mm^2	3.418
引張主鉄筋のかぶり厚さ c_m	cm	4.00
載荷板の主筋方向辺長 a	cm	50.00
引張配力筋のかぶり厚さ c_d	cm	5.45
引張側主筋までの有効高さ d_m	cm	12.00
せん断耐力 P_{sx}	kN	410.77
P/P_{sx} ($P = 150 \text{ kN}$)	-	0.365
150kN換算回数予測 Nf		80,812,000

床版の押抜きせん断耐力 (N)

a, b : 載荷板の主筋方向、配力筋方向の辺長(cm)

X_m : 引張側コンクリートを無視した場合の中立軸 (cm)

d_m, d_d : 引張側主筋、配力筋の有効高さ(cm)

C_d : 主筋、配力筋のかぶり厚さ(cm)

式 (5) によると、補強供試体の押抜きせん断耐力は、 410.77 kN であり、 150 kN に換算した破壊時走行回数は $8,081$ 万回となった。表-4 に上述する理論式より求めた補強後のせん断耐力及び破壊時走行回数を示す。なお、後述のように計算値は実験値を概ね精度よく表していると考えられる。

5. CFRP シート補強による延命効果

5.1 荷重とたわみの関係

CFRP シートを用いた下面補強においては、図-11 に示すように、CFRP シートの貼り付けにより引張剛性が大きくなり、活荷重によるたわみが小さくなる効果があ

と考えられる。なお、引張剛性の向上は、ひび割れ幅の振幅を抑制することから、ひび割れ面の劣化を抑制し、耐疲労性の向上にも影響を及ぼすと考えられる。

5.2 CFRP シート補強RC床版のS-N 線図

基準供試体と補強供試体のせん断強度比と 150 kN 換算走行回数の実験値と計算値を図-12のS-N 曲線とともに示す。図中の直線は理論式による基準値を表しており、これに対して基準供試体の理論値および補強供試体の実験値と理論値は、ほぼ理論式に近似した結果となっている。

表-5 に、CFRP シート補強による延命効果を示す。実験結果での補強効果は、基準供試体が 101 万回で破壊に至ったのに対して、補強供試体は 9,495 万回となって約 94 倍の補強効果が得られた。また、理論式から求められる補強効果は、基準供試体が 288 万回に対して補強供試体は 8,081 万回であり約 28 倍となる。

これらのことから、基準供試体は、丸鋼鉄筋の付着力の低下によって、理論式による値より少ない走行回数で破壊したと考えられる。また、補強供試体は、下面の CFRP シートによって丸鋼のひずみが減少されることで、付着力の低下が抑制され、破壊時の走行回数が増加したと考えられる。なお、異形鉄筋を前提とした理論式による基準供試体の破壊時の走行回数に比べても、破壊までの走行回数が、およそ $9,495 / 288 = 33$ 倍となっている。

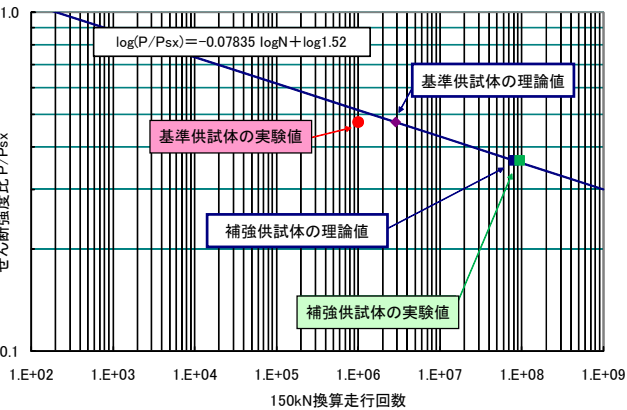


図-12 S-N 曲線

表-5 繊維シート補強による延命効果

		基準供試体		補強供試体
実 験	破壊時走行回数	回	418,000	662,000
	150kN換算破壊回数	回	1,008,600	94,950,330
	比率	—	1.0	94.1
理 論	150kN換算破壊回数	回	2,877,600	80,812,000
	比率	—	1.0	28.1
基準供試体の理論値に対する補強供試体の実験値の比率				33.0

6. まとめ

本研究は、積雪寒冷地において凍害劣化による上面コンクリートの損傷劣化部を除去・補修し、下面に CFRP シート補強を施す補修・補強工法の補強効果に関して輪荷重走行試験を実施して、その補強効果の検討を行った。以下に、本研究により得られた知見を要約して示す。

- ①凍害と疲労損傷した RC 床版について、凍害により劣化した RC 床版上側の損傷部を除去し、ウォータージェットなどにより既設コンクリートと新設コンクリートの付着が確保できるような断面修復による補修工法を用いた場合、剛性は、RC 床版の上面部が健全な状態の剛性まで回復することができる。なお、併せて、下面に CFRP シートを補強することで、さらに剛性が大きくなり、本実験では、初期載荷と同等の剛性が得られた。
- ②RC 床版上面が一体化される断面修復を行い、下面に CFRP シートを接着した工法を用いた場合、CFRP シートに、鉄筋と比べて大きなひずみが発生し、基準供試体に比べて、鉄筋に生じるひずみは減少した。
- ③RC 床版上面が一体化される断面修復を行い、下面に CFRP シートを接着した工法を用いた場合、押抜きせん断破壊によって耐力を失うが、CFRP シートとコンクリートの剥離は生じず、両者は接着したままの状態 でコンクリートの押抜きせん断が生じた破壊面から剥離していた。
- ④基準供試体に比べて、下面に CFRP シート補強した供試体は、実験結果から、約 94 倍の疲労寿命の延命効果が得られた。また、異形鉄筋を前提とした理論式(松井式)から算出される、基準供試体の破壊時走行回数の理論値に対して、補強供試体の破壊時走行回数の実験値は、約 33 倍であった。
- ⑤上面部の補修部位が一体化しているとして、理論式によるせん断耐力と破壊時走行回数算定式および CFRP シートの効果を配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮した RC 床版の押抜きせん断耐力算定式からほぼその補強効果を評価できることが確認できた。

今後は、凍害損傷と下面ひび割れおよび丸鋼と異形鉄筋に着目した、RC 床版の耐荷性・耐久性に関する実験等を進めて、積雪寒冷地における最適な RC 床版の補修・補強方法の策定を研究していく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大阪工業大学松井繁之先生にご指導を賜り、ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，2007.
- 2) 三田村浩，佐藤 京，本田幸一，松井繁之：道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1420-1431，2009.
- 3) 藤川 守，小野貴之，安達 優，三田村浩，松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の耐久性に関する研究，土木学会北海道支部 論文報告集(CD-ROM)，Vol. 63，F-4，2007.
- 4) 安達 優，三田村浩，本田幸一，松井繁之：積雪寒冷地における橋梁床版の劣化度に関する考察，第 63 回土木学会年次学術講演概要集，1-427，pp.853-854，2008.
- 5) 小野貴之，林川俊郎，三田村浩，松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性向上について，第 63 回土木学会年次学術講演概要集，1-428，pp.855-856，2006.
- 6) 小林朗，蔡 華堅，下西 勝，松井繁之：炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1513-1518. 2005.
- 7) 前田幸雄，松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.6， pp.221-224. 1984.
- 8) (社)土木学会 鋼構造委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004.
- 9) H. K. Chai : Improvement of RC slab fatigue durability by FRP sheet strengthening, 大阪大学学位論文，2005.

(2009 年 9 月 24 日受付)