

論文 道路橋RC床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響

田中 良樹^{*1}・村越 潤^{*2}・長屋 優子^{*3}

要旨：道路橋RC床版の路面側に塩害が生じた場合、かぶりの剥離が生じることがあり、RC床版の疲労耐久性にも影響が及ぶことが懸念される。このことから、RC床版の疲労損傷過程における上面かぶりの役割とかぶりが剥離したときの影響について、床版供試体2体の輪荷重走行試験により検討を行った。ひび割れの進展とともにRC床版内にアーチ機構が形成された後、圧縮部材を構成するかぶりコンクリートに、圧縮疲労による弾性係数の低下が生じることがわかった。また、塩害等によって上面かぶりが剥離した場合でも、圧縮主鉄筋がアーチ機構の保持に貢献することが確認できた。

キーワード：RC床版、輪荷重走行試験、圧縮疲労、かぶり、弾性係数

1. はじめに

国内の道路橋における、これまでの鉄筋コンクリート(RC)床版の損傷は、多くの場合、大型車の繰返し载荷に起因した疲労によるものであった。しかし、1990年代のスパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量が増加しており¹⁾、既設床版はもとより疲労耐久性が高い新設RC床版においても、今後塩害劣化対策に注意を払う必要がある。凍結防止剤に起因したRC床版の塩害劣化の事例はまだ多くはないものの国内でも既に報告されている²⁾。また、近年の道路橋と比較して、RC床版の疲労耐久性が相対的に低い傾向にある昭和30～40年代(1955～1974年)の橋梁は既設道路橋の多くを占め、今日も供用されており、塩害と疲労の複合的な劣化も想定される。路面の塩害が発生して上面のかぶりコンクリートが剥離すると、RC床版の疲労耐久性が低下すると考えられるが、その程度や疲労損傷過程に及ぼす影響は必ずしも明確でない。

RC床版の疲労による損傷機構は、輪荷重走行試験の導入によって多くの解明がなされてきた³⁾。既往の知見に基づけば、上面かぶりの剥離によって版厚が小さくなることから、上縁から中立軸までの距離が小さくなってせん断抵抗が低下し、その影響は疲労耐久性にも現れると推定される。松井の検討では、輪荷重の繰返し走行载荷によって比較的早期にはり状化が発生し、やがてせん断抵抗力が低下して押し抜きせん断破壊(抜け落ち)が発生するとしている³⁾。また、解体後の断面観察によって、せん断ひび割れは走行直角方向の断面のみで見られたと記されている³⁾。さらに抜け落ちた箇所以外の断面のひび割れ状況を見ると、その断面でも既に斜めひび割れが発生していた。せん断ひび割れ発生後、はり状化した部分にはRCはりと同様にアーチ機構が形成され、上面か

ぶりがせん断抵抗における重要な役割を果たすものと想定される。また、アーチ機構の形成によって、上面かぶりに高い圧縮力が繰返し作用することから、コンクリートの圧縮疲労による、上面かぶりとその周囲のコンクリートの剛性低下や損傷が発生することが想定される。コンクリートの圧縮疲労では、繰返し载荷とともにコンクリートの弾性係数が低下することや、作用する圧縮応力が高いほどその低下が早いことが知られている⁴⁾。

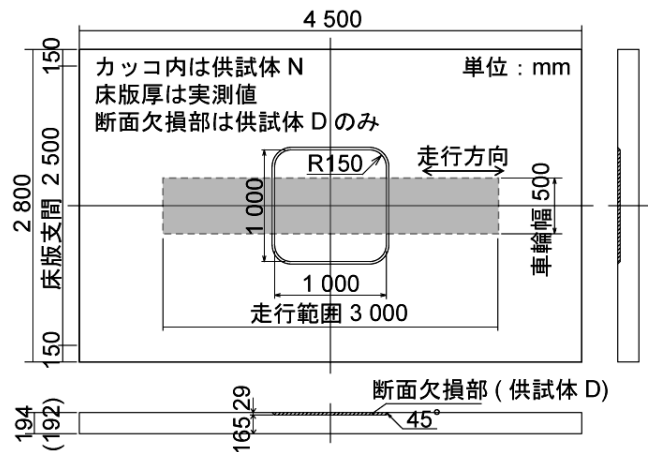


図-1 床版供試体の形状寸法

表-1 床版供試体の主な諸元

供試体		主鉄筋			配筋筋	
		呼び径 mm	間隔 mm	上縁からの距離 ¹⁾ mm	呼び径 mm	間隔 mm
N 断面欠損なし	上段	D16	300	35	D10	300
	下段	D16	150	164	D13	300
D ²⁾ 断面欠損あり	上段	D16	300	11.5 ³⁾ (36)	D10	300
	下段	D16	150	137 ³⁾ (166)	D13	300

注 1) 床版上縁から鉄筋中心までの距離、解体後実測

2) 断面欠損深さ(実測値) : 29 mm

3) 断面欠損部、カッコ内は一般部

*1 (独)土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム主任研究員 (正会員)

*2 (独)土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム上席研究員 工修

*3 (独)土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム研究員 (正会員)

これらを踏まえて、著者らは、RC 床版の疲労損傷過程における上面のかぶりの役割とかぶりが剥離したときの影響について検討するため、鉄筋ひずみや埋め込みゲージを埋め込んだ RC 床版 1 体(供試体 N)と、上面かぶりを一部欠損させた RC 床版 1 体(供試体 D)の輪荷重走行試験を実施した。また、床版に用いたコンクリートの圧縮ひずみの疲労限界値を把握するため、同じバッチのコンクリートを用いてコアの圧縮疲労試験を行った。

2. 試験方法

2.1 RC 床版の輪荷重走行試験

(1) 床版供試体

図-1、表-1 に床版供試体 N、D の形状寸法と主な諸元を示す。供試体 N は従来の輪荷重走行試験⁵⁾と同様の供試体であり、供試体 D は供試体 N とほとんど同一形状であるが、床版の中央の上面かぶりを 1 m×1 m の範囲で欠損させた(実測欠損深さ 29 mm)。断面欠損は発砲スチロールの型を設置した上で、コンクリートを打設することによって。コンクリートの練り混ぜはプラントでの実機練りとした。表-2 に、コンクリートの配合と打設記録を示す。養生シートで 10 日間養生した後、気中に放置した。表-3 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。表-4 に使用した鉄筋の引張試験結果を示す。

(2) 載荷試験と計測項目

床版供試体の支持は 2 辺(長辺)を単純支持、他の 2 辺を弾性支持とした。図-1 に示した網掛け部分に輪荷重 157kN を走行載荷させた。供試体 D の断面欠損部の走行範囲は、その形に合わせた木製の板をはめ込み(図-2)、その上に走行載荷させた。試験中、これによる載荷治具のずれや異常音は発生しなかった。

主な計測項目は、変位、鉄筋ひずみとした。また、供試体 N では、コンクリート中に小型の埋め込みゲージ(図-3、ゲージ長 50 mm)を埋め込んで、走行載荷位置直下のかぶり付近や、床版中央支間方向の上下主鉄筋間などにおけるコンクリートのひずみも測定した。測定箇所の一部では 3 軸ゲージとなるように 3 本の埋め込みゲージをあらかじめ組み合わせて、埋め込んだ。

試験終了後、床版の破壊箇所を中心に走行方向及び走行直角方向に切断して、内部のひび割れ状況の観察及び版厚、鉄筋位置の計測を行った。

2.2 コンクリートコアの圧縮疲労試験

圧縮疲労試験に用いるコア供試体にも、床版供試体と同じバッチのコンクリートを用いた。コアは直径 100 mm×高さ 200mm である。打設後 3 日で脱型した後、床版供試体の側で、シートで覆って養生した。気中において、円筒の軸方向に圧縮が作用するように繰返し載荷を行った(応力比 0.1、サイン波、7~8 Hz)。25 本の疲労試験を

表-2 コンクリートの配合及び打設記録

W/C %	Air %	s/a %	単位量 (kg/m ³)					SL cm	C.T. ℃
			W	C	S	G	AE		
73.5	3.4	49.1	188	256	609	942	2.56	20.5	33.0

セメント:普通ポルトランドセメント, AE:AE 減水剤(遅延形), 最大粗骨材寸法 $G_{max} = 20\text{mm}$, 目標圧縮強度: 25 N/mm^2

注) 埋め込みゲージの設置に配慮して単位水量を大きくした。

表-3 コンクリートの静的圧縮強度試験結果

供試体	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	ポアソン 比	圧縮試験 本数	材齢 (日)
コア	22.5	23.5	—	7 本	37, 86*
供試体 N	26.8	26.5	0.215	3 本	64
供試体 D	25.0	25.5	0.213	3 本	83

注) いずれも平均値, *) コアの疲労試験前 4 本, 試験後 3 本

表-4 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
D10	338	477	189
D13	350	504	192
D16	390	593	196

いずれも SD295A, 3 本の平均値

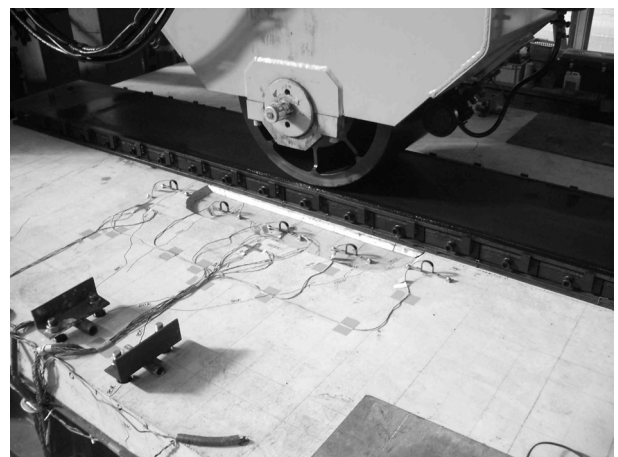


図-2 断面欠損部の載荷状況(供試体 D)

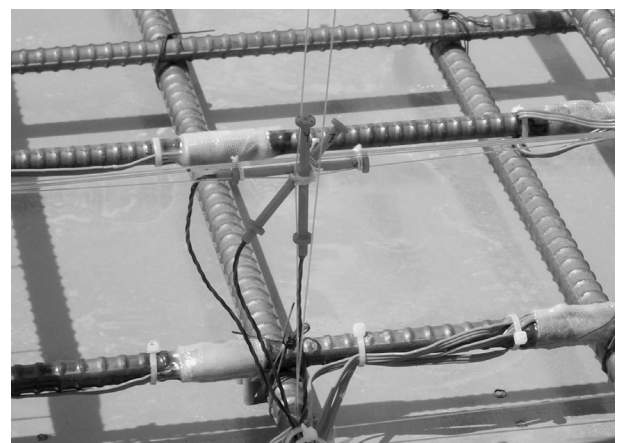


図-3 三軸埋め込みゲージとその設置状況
(走行範囲直下、走行方向に平行な面に設置した例)

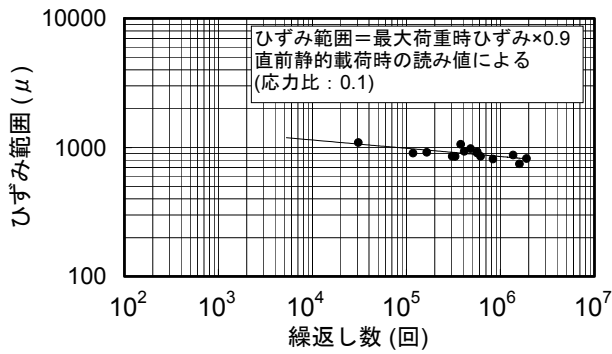


図-4 圧縮疲労試験におけるひずみと繰返し数の関係

行い、そのうち 15 本はコア側面にひずみゲージ(ゲージ長 60 mm)を載荷方向に 2 枚貼り付け、疲労試験の前に疲労試験の上限荷重まで静的載荷を行い、荷重ごとのひずみを測定した。

3. 結果

3.1 圧縮疲労試験

図-4 に、ひずみ範囲と疲労破壊までの繰返し数の関係を示す。床版供試体では 14 万回から 36 万回で破壊に至るが(図-6 に示す)、10~30 万回程度の繰返し数で圧縮疲労破壊が生じるには、少なくとも 800~1000 μ 程度以上の圧縮ひずみ範囲を繰返し作用させる必要がある。

3.2 輪荷重走行試験

供試体 N の破壊は、床版中央から走行方向に約 600 mm の位置で従来の破壊と同様のせん断破壊を起こした(後に図-8 の凡例図に示す)。供試体 D の破壊は、床版中央の断面欠損部で発生した。図-5 に供試体 D の下面及び解体後の断面観察による床版内のひび割れ図を示す。供試体 D の床版下面のひび割れ性状は供試体 N と同様に格子状のひび割れが見られたが、せん断ひび割れは、片方は供試体 N と同様に輪荷重の載荷位置の縁から生じていたが、もう一方(図中 a の位置)は断面欠損部の断面変化している箇所から発生していた。

図-6(a)、(b)に、供試体 N、D それぞれの床版中央鉛直変位の繰返し数に伴う変化を示す。供試体 N に比べて、供試体 D は断面欠損によって初期の段階から破壊に至るまで変位が大きかったが、破壊までの変位の増加の傾向は類似していた。

図-7 に、供試体 N、D の、主鉄筋ひずみに基づき計算した中立軸位置(床版上縁からの距離)の変化を示す。供試体 D については、断面欠損部のほか、走行方向に 600 mm 離れた一般部での測定結果を合わせて示す。供試体 N 及び D の一般部の場合、主鉄筋の中立軸は、最初繰返し数とともに上昇し、ある段階を境に下降し始める。供試体 D の断面欠損部では、10 回~2 万回の範囲でほとんど変化なく、明確なピークが現れなかった。供試体 N の

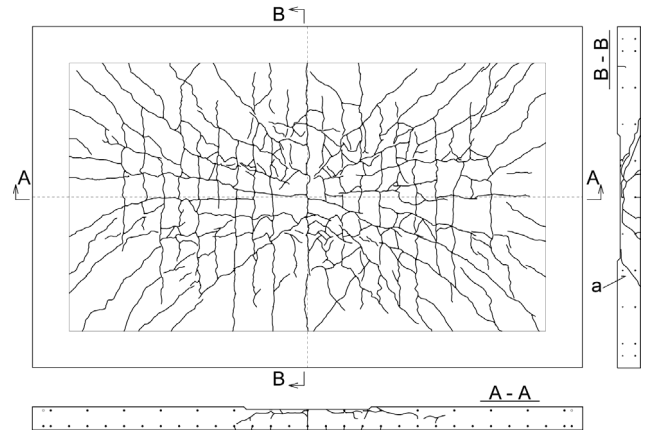
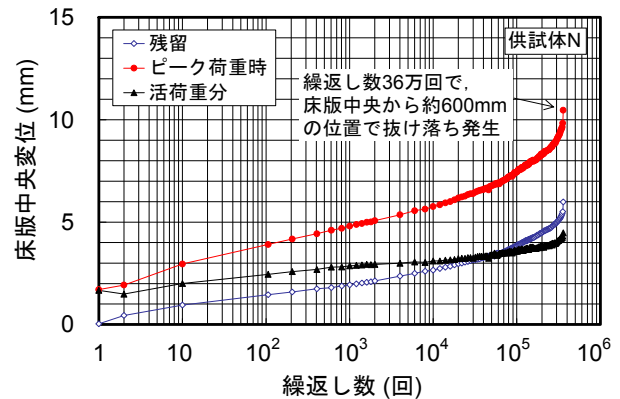
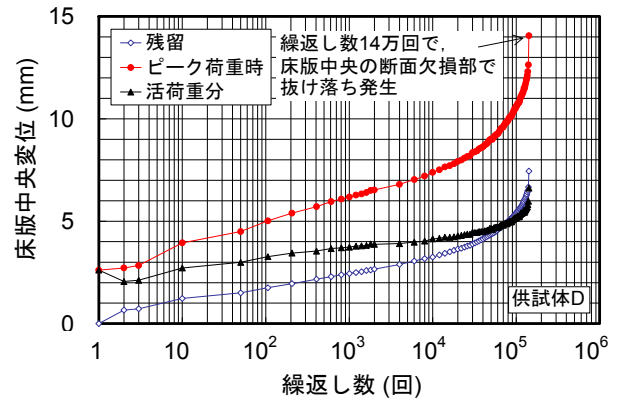


図-5 供試体 D の下面及び切断面のひび割れ図

(試験終了後に観察、下面ひび割れは上からの透視図)



(a) 供試体 N



(b) 供試体 D

図-6 床版中央変位の変化

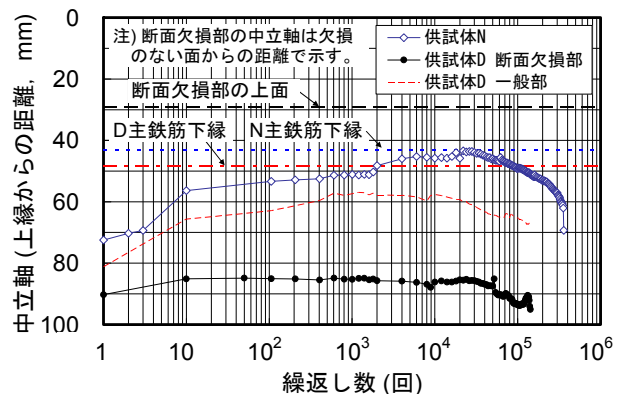


図-7 床版中央における中立軸の変化

中立軸は、その時点で、主鉄筋下縁(深さ 43 mm)まで達していたが、供試体 D の断面欠損部の中立軸は、主鉄筋下縁まで 35 mm 以上離れていた。

図-8 に、供試体 N の埋め込みゲージによるコンクリート内部の主ひずみ図の例を示す。繰返し数 5 万回では、載荷点直下において大きな引張ひずみが生じており、ひび割れがゲージ設置位置にも発生していたと考えられる。

図-9 に、比較的圧縮ひずみが大きかった、走行位置中心から 325 mm、深さ 95 mm の位置に斜め 45° に設置した埋め込みゲージの繰返し数に伴う変化を示す。この例に見られるとおり、繰返し載荷初期のコンクリートの圧縮ひずみは 500 μ 以下で比較的軽微であったが、繰返し数の増加とともに徐々に増加する箇所が見られた。また、この図のように 1000 μ の大きい圧縮ひずみが発生する箇所が確認された。

4. 考察

4.1 アーチ機構形成後の疲労性状

著者らの別途実施した検討より(供試体 N の結果による)、輪荷重走行試験下の RC 床版供試体においても、RC はりと同様、床版内部にせん断ひび割れが発生し、アーチ機構(図-10)を形成すること、その発生時期は中立軸の下降が始まる時期(そのときの繰返し数 N_s)に概ね一致することがわかった⁹⁾。それ以降、床版中央変位は加速度的に増加する傾向が見られた(図-6)。供試体 N の場合、 N_s は約 2 万回であった。

アーチ機構形成以降に見られたこれらの挙動については、アーチ機構の圧縮部材を構成するコンクリートの弾性係数の低下がその一要因として考えられる。図-10 に示す方法で、圧縮主鉄筋の軸力とアーチ機構が形成された圧縮コンクリート断面の圧縮合力を、上下主鉄筋のひずみから算定した結果を図-11 に示す。これらは、供試体 N のうち、アーチ機構を構成するコンクリートに最も大きい圧縮応力が作用すると考えられる床版中央から走行直角方向に 275 mm の位置(図-10 の a-a 断面)での実測ひずみを用いて算出した。圧縮合力は、引張鉄筋の軸力と釣り合うと仮定して算定した⁷⁾。この結果に基づき、図-12 に圧縮合力に占める圧縮主鉄筋の負担割合 $r(\%)$ を示す。アーチ機構形成までは、圧縮主鉄筋の負担はコンクリートに比べて 7~8 % であり、繰返し数 1000 回程度までは変化が小さかった。負担割合 r はせん断ひび割れの発生とともに一旦低下するが、アーチ機構が形成された約 2 万回以降は加速度的に増加していたことがわかる。

図-13 に、この r の値がヤング係数比を考慮した断面比と一致すると仮定して次式で算定した、コンクリートの弾性係数(推定値)の変化を示す。ただし、アーチ機構

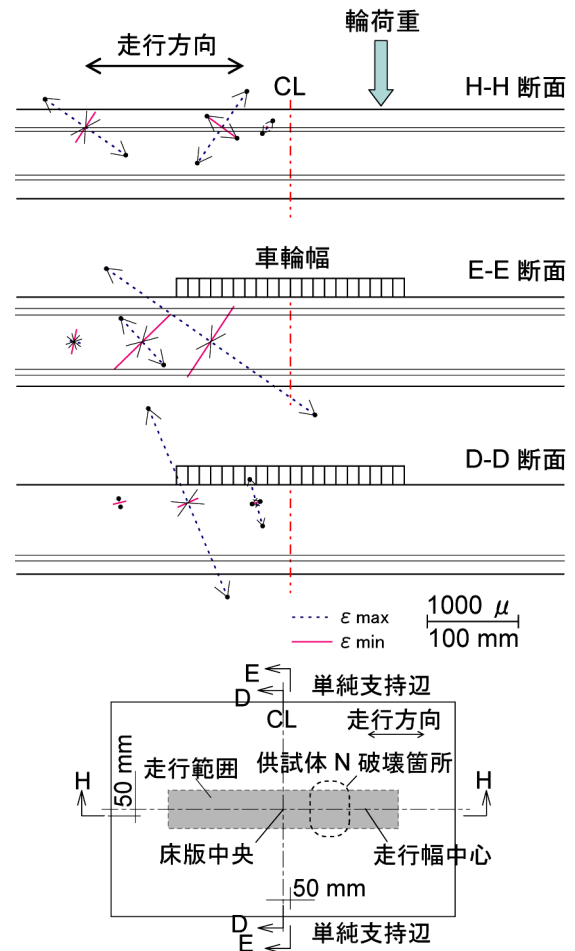


図-8 埋め込みゲージによる主ひずみ図
(供試体 N, 繰返し数 5 万回の例)

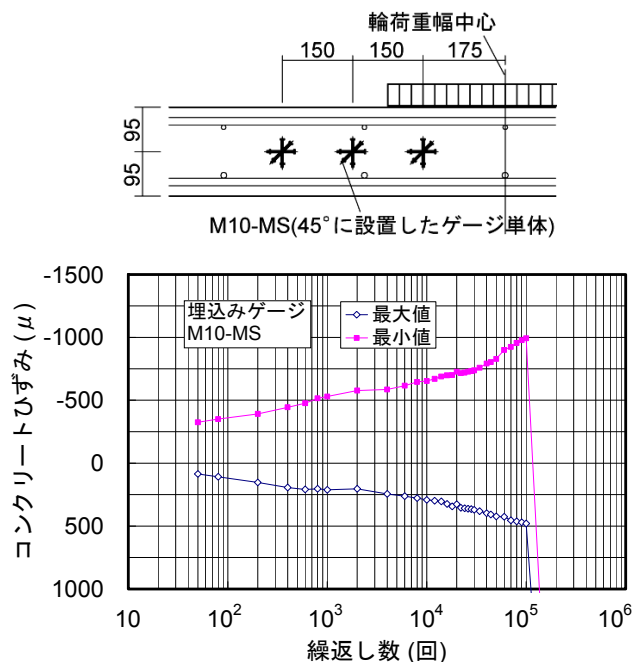
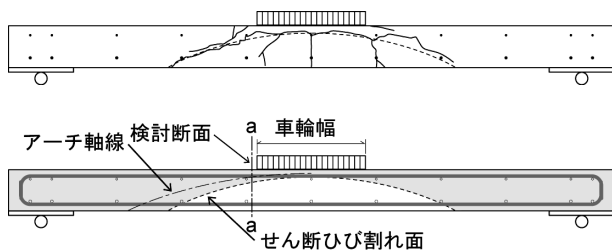


図-9 動的ひずみのうち圧縮ひずみが
大きかった箇所の測定結果例
(せん断ひび割れ発生箇所付近の斜め方向ひずみ,
E-E 断面, 走行幅中心から 300 mm, M10-MS)



検討断面：アーチ機構形成後、圧縮疲労に厳しいと想定した断面

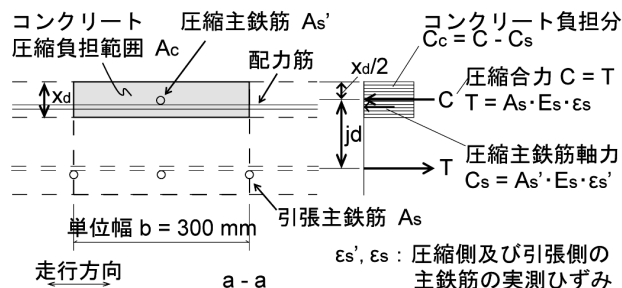


図-10 破壊箇所のイメージと計算仮定

が形成されるまでは、曲げが支配的であったと考えられるが、曲げからせん断への移行期間の挙動がかえって不明確になると考えられたことから、ここではすべての繰返し数において同じ算定方法を用いた。

$$E_c = E_s A_s' ((1/r) - 1) / A_c \quad (1)$$

$$A_c = 2 b (d - jd) \quad (2)$$

$$r = C_s / C \quad (3)$$

ここに、 E_c ：コンクリートの弾性係数

E_s ：鉄筋の弾性係数、 d ：有効高

A_s' ：圧縮主鉄筋の断面積 (1-D16)

A_c ：圧縮合力を負担するコンクリート断面積

jd ：アーム長(計算方法は文献 6)と同様に行った)

b ：単位幅、 r ：圧縮鉄筋の負担割合

C_s ：圧縮鉄筋に作用していた軸力

(圧縮主鉄筋のひずみから算定)

C ：圧縮合力 (=引張合力 T)

(引張主鉄筋のひずみから算定、2-D16 とする)

繰返し数約 2 万回までの E_c の推定値が初期の弾性係数よりも低いのは、曲げが支配的であるにも関わらずアーチ機構を仮定したことによる。アーチ機構が形成されたと考えられる繰返し数約 2 万回⁶⁾(図-13 では 2~3 万回の間)では、コンクリートの弾性係数が初期の値にまだ近かったが、それ以降、急激に低下した。この検討断面の jd は 5 万回以降、約 80mm でほとんど変化がなく⁶⁾、 E_c の推定値への影響は小さかった。この点と、式(1)と図-12 の結果から、 E_c の推定値の低下には、負担割合 r の影響が大きかったことがわかる。これらの結果から、アーチ機構形成以降、圧縮部材を構成するコンクリートの弾性係数は、圧縮疲労の影響を受けて低下することがわかった。このことは、図-9 に示した例で、 N_s の時点でコンクリート中の圧縮ひずみが 800 μ に近い状況にあり、アーチ機構形成後も徐々に増加していたことと符合する。しかし、コンクリートに作用していた平均軸圧縮応力度は、1.3~1.6 N/mm² 程度であり、この計算仮定の範囲では、図-9 で見られたような高い圧縮ひずみの領域は見られなかった。コンクリートが負担する圧縮応力は、図-10 で仮定した範囲よりもさらに狭い範囲に集中する傾向があったものと考えられる。

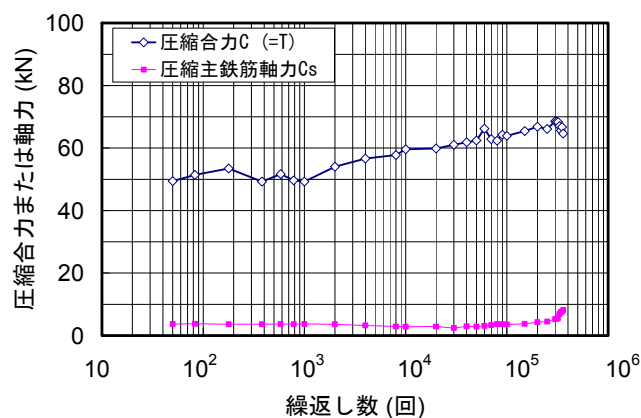


図-11 鉄筋の圧縮合力及び圧縮主鉄筋の負担

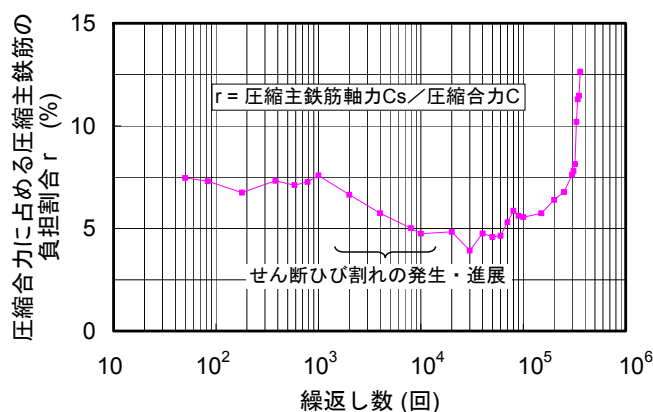


図-12 圧縮側主鉄筋の軸力の変化

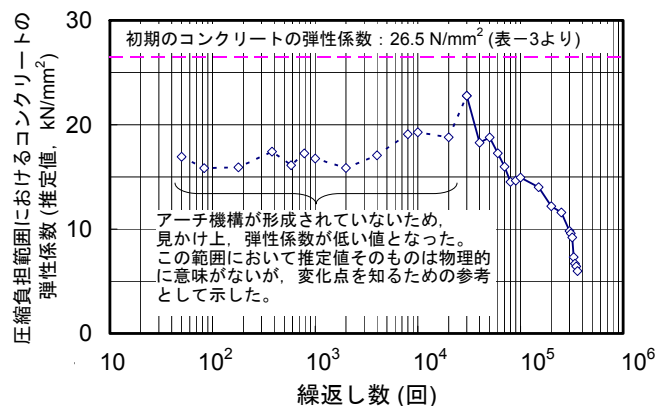


図-13 アーチ機構の圧縮負担範囲におけるコンクリートの弾性係数(推定値)の変化

4.2 かぶりがないことの影響

図-6 や図-7 から、断面欠損を有する供試体 D の疲労寿命は、供試体 N の約 40%であり、断面欠損によって明らかに短くなった。マイナーの疲労被害則に基づき供試体 N の結果から供試体 D の疲労寿命を算定すると、松井式³⁾の傾き 12 を用いた場合、破壊までの繰返し数 N_f は約 9 万回となる。しかし、実験では、供試体 D の N_f はその推定値よりは大きかった。両供試体のコンクリートは、ほとんど同じ条件で打設、養生したことから、供試体 N と D で異なる点は試験開始時の材齢と試験時の温度などであったが、表-3 に示したとおり、コンクリートの強度に顕著な差は見られなかった。版理論による計算たわみは、供試体 N と D で約 1mm 異なり(供試体 D は断面欠損部の断面諸元が全面に均一とした簡易計算)、試験の開始時の傾向(図-6)と概ね同じであったことから、部分的に断面欠損させたことの影響は小さかったと考えられる。

図-14 に、供試体 D の断面欠損部と一般部について、実測ひずみから換算した圧縮鉄筋軸力の分布を示す。断面欠損部の圧縮鉄筋の軸力負担割合は、一般部に比べて明らかに大きかった。供試体 D では、合力の釣り合いを得るため、中立軸が圧縮主鉄筋下縁よりも約 35 mm 下方に位置しており、曲げが支配的であった段階では、主鉄筋が圧縮領域の上縁に近いために鉄筋の負担割合が高かったものと考えられる。しかし、破壊直前では、一般部と同程度の値となっていた。

これらの結果より、供試体 D では、かぶりが不足する分、圧縮鉄筋がその負担を補っていたことがわかる。また、かぶりの欠損によって、版厚は小さくなるが、上下の鉄筋間隔は両供試体で同程度であったことが、供試体 D の寿命の低下をある程度抑制したと考えられる。

5. まとめ

本検討の結果から、以下の知見が得られた。

- 1) 気中におけるコンクリート(W/C=73.5%)の圧縮疲労試験において、コンクリートのひずみにより S-N 線を整理した結果、試験開始時におけるひずみ範囲が 800 ~ 1000 μ 程度の場合に、数 10 万回の繰返し載荷で圧縮疲労破壊が生じることがわかった。
- 2) 輪荷重走行試験の下で、床版内のせん断ひび割れの発生、進展とともに、RC 床版にアーチ機構が形成されると、コンクリートのひずみ範囲(埋め込みゲージによる実測値)が 800 μ (圧縮側)を超える箇所が徐々に見られ、コンクリートの圧縮疲労の影響が顕著となる状況に移行することが確認できた。
- 3) 輪荷重走行試験において、床版内にアーチ機構が形成されてから中立軸が低下する傾向は、主としてアーチ

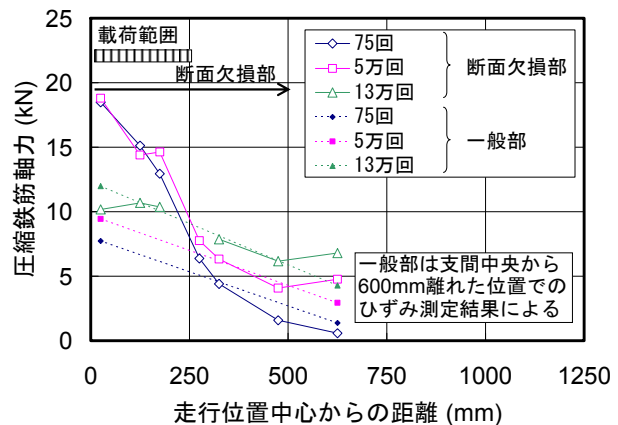


図-14 断面欠損部と一般部の圧縮主鉄筋軸力

機構を構成する圧縮側コンクリートの弾性係数が疲労によって低下することに起因すると考えられる。

- 4) 上面かぶりが部分的に断面欠損することによって、床版の疲労寿命は約 40 %まで低下した。しかし、かぶりコンクリートが剥離した場合でも、供試体 N の試験結果に基づきマイナー則にしたがって算定した値よりは、やや疲労寿命が長かった。その際、アーチ機構の圧縮軸力における圧縮主鉄筋の負担が、かぶりがあるときに比べて著しく大きくなっていた。上面かぶりに剥離が生じた場合、中立軸の低下により圧縮鉄筋下のコンクリートが圧縮に抵抗するだけでなく、圧縮鉄筋も貢献することによって、疲労寿命の低下が抑制されることがわかった。

参考文献

- 1) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究—コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査—, 土木研究所資料第 3811 号, 2001.3.
- 2) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化に関する研究委員会報告, 日本コンクリート工学協会, 1999.11.
- 3) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1985.
- 4) 藤本将行, 佐藤靖彦, 角田興史雄: 水中におけるコンクリートの圧縮疲労性状に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 22-3, pp.205-210, 2000.
- 5) 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸: 既設 RC 床版の健全度評価手法に関する実験的検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会, pp.516-517, 2000.9.
- 6) 長屋優子, 村越潤, 田中良樹: 繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 2008.(投稿中)
- 7) Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, 1975.