

論文 下面増厚補強した RC 梁の定点载荷疲労試験

横山 和昭*1・鹿野 善則*2・福田 一郎*3・須田 久美子*4

要旨：下面増厚補強の対象となる既設道路橋床版は、橋軸直角方向のひび割れにより梁状化した後に押抜きせん断破壊することから、本研究では、梁状化後と同等の幅を有する RC 梁試験体に下面増厚補強を施して疲労特性の検討を試みた。試験体は曲げ降伏がせん断破壊に先行しないように引張鉄筋に高強度鉄筋を用いて作製した。静的試験および疲労試験を実施した結果、破壊モードはいずれもせん断破壊となり試験方法の妥当性が確認された。また、試験体の既設部と増厚部の界面に沿ったひび割れおよび剥離は認められず、下面増厚補強工法の補強効果に関する疲労特性の基礎データが得られた。

キーワード：下面増厚工法、疲労寿命、床版、せん断耐力、押抜きせん断

1. はじめに

道路橋床版の下面増厚補強工法は、交通を開放しながら施工可能であるところに特徴があり、交通量の多い都市部を対象に適用が期待されている。一方、吹付け施工などに適した下面増厚材料の開発が進んでおり、一部試験的に適用の実績もあるが、下面増厚に適した材料性能は必ずしも明確ではない。道路橋床版の疲労特性を確認するためには実物大の床版試験体により輪荷重走行試験を行うのが妥当であるが、材料および工法仕様の検討段階などで多数の実験を必要とする場合には現実的ではない。

一般的に、下面増厚補強の対象となるような既設道路橋床版は橋軸直角方向のひび割れにより梁状化し、最終的には押抜きせん断破壊する

ことから¹⁾、本研究では梁状化後と同等の幅を有する RC 梁試験体に下面増厚補強を施し、せん断破壊をするように設計した場合について、その疲労特性の検討を試みた。

2. 試験体

2.1 試験体諸元

試験体は、静的試験用 2 体、疲労試験用 1 体の合計 3 体とした。試験体形状・計測位置図および下面増厚補強部（以下、補強部）の詳細をそれぞれ図-1および図-2に示す。試験体は輪荷重により梁状化した道路橋床版を想定して梁幅¹⁾を決定した。支間長 (l) を 1,150mm とし、せん断スパン比 (a/d) を 4 とした。引張鉄筋（以下、主筋）は、せん断破壊に先行して曲げ破壊

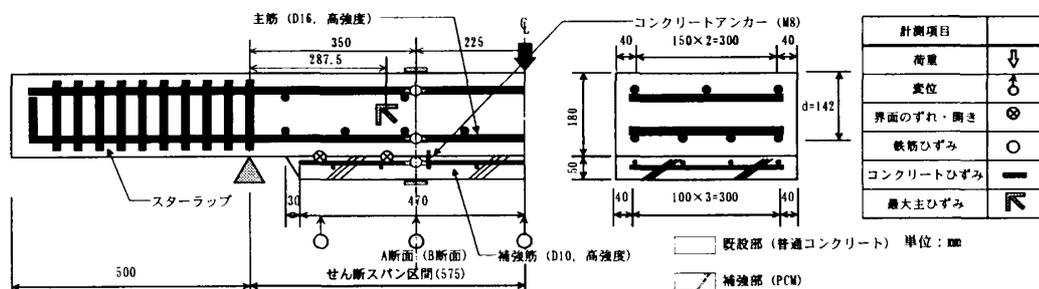


図-1 試験体形状・計測位置図

*1 日本道路公団試験研究所 道路研究部 橋梁研究室 工修 (正会員)

*2 日本道路公団試験研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)

*3 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCE グループ (正会員)

*4 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCE グループ 主管研究員 工博 (正会員)

が生じないように、降伏強度 600N/mm² 程度の高強度鉄筋とした。既往の工事では下面増厚補強鉄筋（以下、補強筋）として、格子状 D6 鉄筋を既設床版下面との間に隙間を設けずに設置し、純かぶり 10mm、増厚厚さ 22mm とするのが通例であるが、ここでは、補強筋背面への下面増厚材料の充填性に配慮して補強筋背面に隙間を設けた。また、既設床版部に相当する試験体部分（以下、既設部）のコンクリートと補強部の界面（以下、界面）におけるせん断伝達応力度の観点から、補強筋には、実績としては比較的太径の D10 鉄筋を用い、固定治具を介してコンクリートアンカーにより既設部下面に固定した。補強筋背面には補強筋径に相当する 10mm の隙間を設けて固定し、純かぶり 20mm、増厚厚さ 50mm とした。補強筋にも、せん断破壊に先行して曲げ降伏しないように高強度鉄筋を使用した。コンクリートアンカーは工事での使用実績を参考に 4 本設置した。実験時における支承等との取合いに配慮し、補強部端部は面取りした。

2.2 使用材料

既設部のコンクリートの圧縮強度は、実橋の調査結果をもとに決定した。補強部には SBR 系のポリマーセメントモルタル（以下、PCM）を使用し、吹付け施工した。表-1および表-2に材料試験結果を示す。

界面の性能試験として建研式付着試験および直接引張試験を実施した。それぞれの平均値は 2.74N/mm² および 1.91N/mm² であった。

使用した鋼材の機械的性質を表-3に示す。

2.3 試験体製作方法

試験体製作は、既設部のコンクリートを打設後、コンクリートの圧縮強度が所定の値に達した材齢で、ウォータージェット工法（以下、WJ工法）により既設部下面を表面処理し、コンクリートアンカー、補強筋を設置し、PCM を 2 層に分けて吹付けた。表面処理以降の工程は、実施工を想定して全て上向きで実施した。WJ工法は、平均処理深さが 1~2mm 程度となるように表-4に示す仕様とした。表面形状計測²⁾の結果

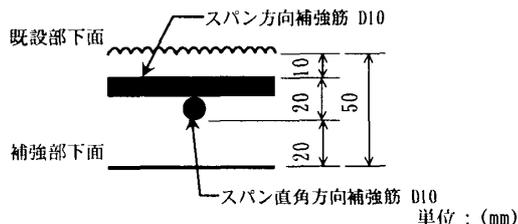


図-2 補強部詳細

表-1 既設部コンクリートの材料試験結果

項目	実施日	静的試験	疲労試験	
			開始	終了
圧縮強度 (N/mm ²)		43.5	43.6	44.6
ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)		3.30	3.29	3.43
割裂強度 (N/mm ²)		3.28	3.26	3.74

表-2 PCM の材料試験結果

項目	実施日	静的試験	疲労試験	
			開始	終了
圧縮強度 (N/mm ²)		46.2	48.7	50.9
ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)		2.10	2.18	2.27
割裂強度 (N/mm ²)		3.57	4.16	3.87
曲げ強度 (N/mm ²)		4.64	5.69	4.37

表-3 鉄筋の機械的性質

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	静弾性係数* (×10 ⁴ N/mm ²)
圧縮鉄筋	375	566	17.8
引張鉄筋	571	785	17.2
補強筋	797	985	19.9

*) ひずみゲージを貼付して求めた見掛けの値

表-4 WJ仕様 表-5 表面処理計測結果

項目	試験体 No.	平均処理深さ (mm)	面積増加率
ノズル方式	旋回		
処理回数	1	No.1 1.39	1.25
噴射圧力 (MPa)	150	No.2 1.79	1.69
ノズル径 (mm)	0.9	No.3 2.43	1.41
ノズル本数 (本)	1	No.1, No.2 静的試験	
揺動数 (回/分)	2,000	No.3 疲労試験	

を表-5に示す。

3. 静的試験

3.1 載荷方法

図-3に載荷概要図を示す。単純支持の 1 点載荷とした。

3.2 破壊性状

静的試験結果を表-6に、荷重-中央変位関

係を図-4に、ひび割れ状況を図-5に示す。表-6には計算値(3.3節参照)を併記した。

No.1, No.2ともに破壊性状は同様であり、50kN程度でスパン中央付近に曲げひび割れが発生し、150kN前後で支承付近の曲げひび割れが斜めに進展し始めた。200kN前後で支承付近から荷点に向かって新たに斜めひび割れが貫通せん断引張破壊した。

3.3 せん断耐力

既往の研究により、曲げ耐力については界面の付着性状が良好な場合には補強筋を考慮した計算値が実験値と良く整合することが知られている。そこで、棒部材のせん断耐力評価式(式(1))³⁾により表-6のVc1およびVc2を求めた。Vc1では、引張鉄筋比を既設部の主筋および補強筋の合計断面積と両鉄筋の図心位置として求めた有効高さをを用いて算出した。

$$V_c = 0.20(p_w f_c')^{1/3} d^{-1/4} [0.75 + 1.4(a/d)] b_w d \quad (1)$$

b_w : 有効幅 (mm), d : 有効高さ (mm)

p_w : 引張鉄筋比, a : せん断スパン (mm)

f_c' : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

4. 疲労試験

4.1 載荷方法

疲労試験は静的試験と同じ図-3の要領で加力した。載荷は周波数5Hzの正弦波で行った。疲労試験の設定を表-7に示す。まず、上限荷重は静的試験で得られた最大荷重(No.1およびNo.2の平均)の約0.5倍に相当する100kNとした。下限荷重は支承および荷点部に緩みがでないように14kNとした。その後、疲労破壊の兆候が見られなかったため下限荷重は変更せずに、上限荷重を120kNおよび140kNと段階的に増加させた。剛性確認のための静的試験を7回実施した。

4.2 破壊性状

図-6にNo.3試験体における繰返し回数に対する中央変位、圧縮縁コンクリートひずみ、主筋ひずみおよび補強筋ひずみの関係を示す。実

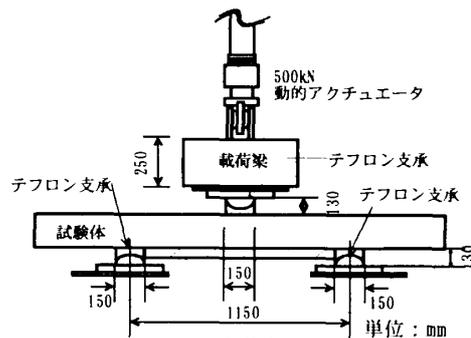


図-3 載荷概要図

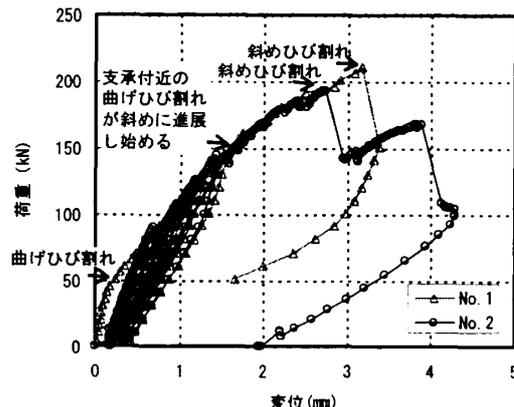


図-4 荷重-中央変位関係

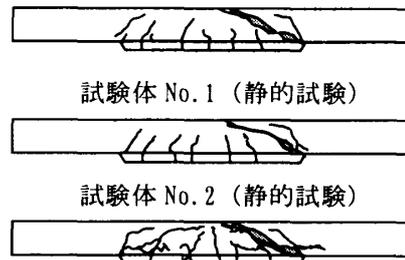


図-5 ひび割れ状況(実験終了時)

表-6 静的試験結果

試験体No.	実験値 (kN)	計算値 (kN)		実験値/計算値
	Vc.max	Vc1	Vc2	Vc.max/Vc1
No.1	210	183	154	1.15
No.2	193	183	154	1.05

Vc.max : 最大荷重

Vc1 : 補強部を考慮したせん断耐力

Vc2 : 既設部のみのせん断耐力

験後のひび割れ状況を図-5に示す。

上限荷重を100kNとした疲労載荷初期では変位およびひずみの急激な増加がみられたが、100万回程度以降は微増となり曲げひび割れ幅もほぼ安定して推移した。300万回を超えると計測値にほとんど変化が見られなくなったため430

万回で上限荷重を 120kN に引き上げた。120kN の疲労荷重によって 500 万回程度までは計測値の増加が認められ、この間に支承付近に発生した曲げひび割れが斜めに進展した。610 万回で上限荷重を 140kN に引き上げたところ、支承付近の曲げひび割れから進展した斜めひび割れがさらに進展し、ひび割れ幅が大きくなるとともに変位およびひずみが増加した。最終的には、静的試験と同様に支承から荷点に向かって新たに斜めひび割れが発生しせん断引張破壊した。

4.3 剛性の推移

表-8に剛性確認試験結果を示す。剛性は荷重-中央変位関係における下限荷重時と上限荷重時の割線剛性として求めた。全断面有効およびコンクリートの引張を無視したRC計算(以下、RC計算)のそれぞれの剛性に対する比率を併記した。100kNを載荷した20万回から430万回載荷後まで大きな変化は見られなかった。これに対し、上限荷重を120kNにした430万回~610万回の間では剛性が低下した。これは、この間

表-7 疲労試験の設定

累積回数	回数	上限荷重
1回~430万回	430万回	100 kN
430万回~610万回	180万回	120 kN
610万回~	2万998回	140 kN

表-8 剛性確認試験結果

剛性確認回数	疲労荷重回数	全断面有効に対する比率	RC計算に対する比率
1回目	1回	0.61	1.57
2~5回目	20万, 40万 70万, 120万回	0.42	1.08
6回目	430万回	0.38	0.98
7回目	610万回	0.32	0.82

に支承付近に発生した曲げひび割れが斜めに進展したためと考えられる。

5. 考察

試験終了後にスパン方向に切断した断面の状況について静的試験体(No.1)および疲労試験体(No.3)を比較して図-7に示す。いずれも界面に剥離等は見られず健全な状態であった。疲労試験体では付着割裂ひび割れが既設部の引

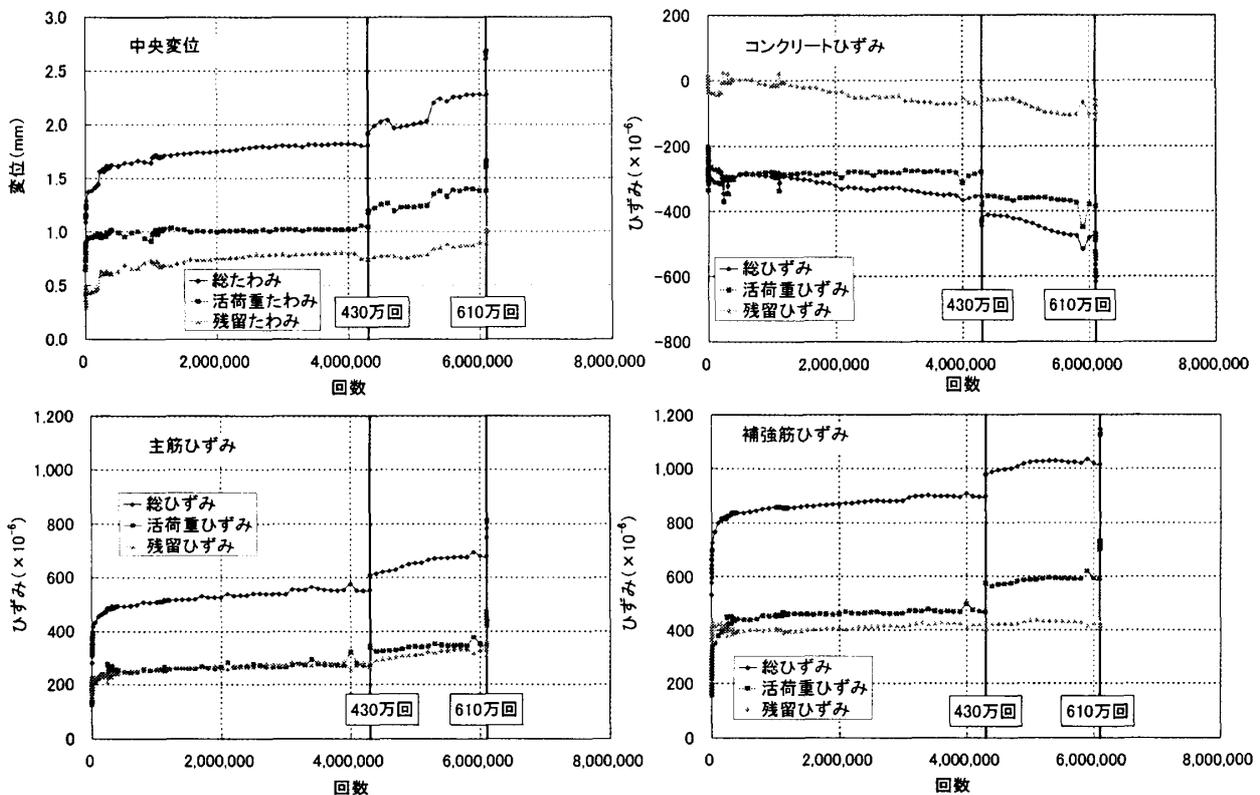


図-6 繰返し回数とひずみ・変位の関係

張鉄筋に沿って観察されており、界面が弱点にならなかったことがわかった。図-8に示すように、コンクリートアンカーに発生した軸方向荷重は静的試験および疲労試験（610万回）において非常にわずかであり、界面が健全であったことを裏付けるデータの1つである。

さらに、せん断スパン中央のA,B断面（図-1参照）におけるひずみ分布を見ると（図-9および図-10（100kN時））、平面保持の仮定により求めたRC断面解析結果を併記）、補強筋ひずみは既設部の主筋ひずみに対応しており補強部が一体化していると見なすことが可能である。表面処理の処理深さには試験体間にばらつきがあったものの、界面に変状がなかったことから、今回の場合には、表面処理の違いによる影響はほとんどなかった。図-9には静的試験においてせん断引張破壊の起点になった斜めひび割れ発生直前の荷重（200kN）も示したが、この荷重段階でも補強部が一体化していることが伺える。図-10からは疲労载荷による繰返し回数の増加とともに同一荷重時（100kN時）における中立軸が上昇する様子が確認でき、せん断抵抗

に寄与すると考えられる圧縮コンクリートの断面積の減少がせん断破壊につながったものと思われる。

以上の検討により、今回行った下面増厚補強では既設部と補強部が一体化していると考えられる。また、静的試験および疲労試験はいずれもせん断引張破壊であり、両者の実験結果をもとに下面増厚補強効果に関する疲労特性が検討可能である。

図-11に載荷荷重（破壊荷重）と繰返し回数との関係を示し、静的試験および疲労試験の実験結果をプロットした。図中には参考のため既往の疲労寿命推定曲線を併記した。図中 A-1~A-3 は土木学会の棒部材のせん断疲労耐力式⁴⁾（以下、土木学会式）から求めたもので、せん断耐力として、A-1はVc2を、A-2はVc1を、A-3は静的試験の平均値を用いて示したもの

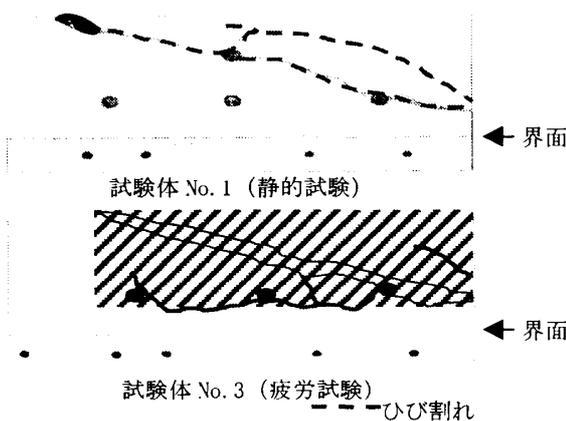


図-7 実験終了後切断面(長軸方向)

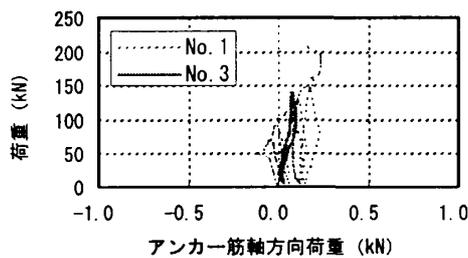


図-8 アンカー筋発生荷重

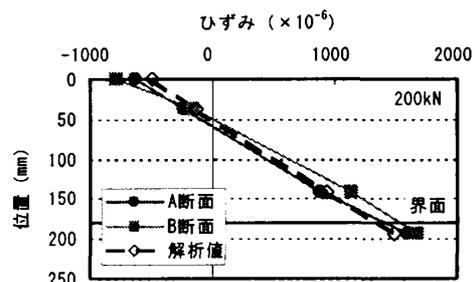
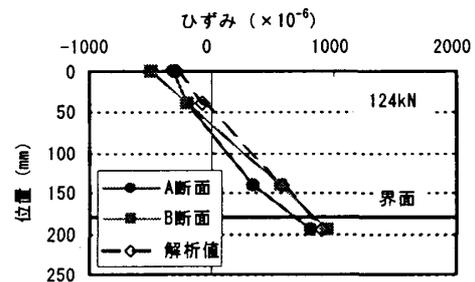


図-9 ひずみ分布(試験体 No.1)

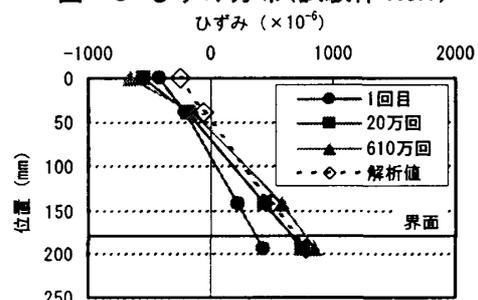


図-10 ひずみ分布(試験体 No.3)

である。B および C は床版の押抜きせん断破壊による疲労寿命推定式を基として示したもので、B は松井ら¹⁾が、C は内田ら⁵⁾が提案している式の中の梁状化した押抜きせん断耐力の代わりに今回の静的試験の平均値を用いて求めた。

実験結果は、土木学会式に比較して補強効果を考慮した疲労寿命曲線の安全側で、繰返し回数に応じた低下傾向が対応している。これは、下面増厚補強した RC 梁においても、静的試験および疲労試験の破壊モードが同一になるように設計された試験体では、界面が健全であれば、既往の疲労評価式により補強効果を考慮した疲労寿命の評価が可能であることを示唆している。

松井らの式は、繰返し回数が 200 万回程度の実験値をもとに得られた実験式であり、繰返し回数の少ない領域で耐力を過大評価している。松井らの実験値に繰返し回数の少ない実験値を加えて再評価した内田らの式⁵⁾では繰返し回数に応じた耐力低減の度合いが土木学会式とほぼ同様であることがわかる。梁のせん断耐力と床版の押抜きせん断耐力ではせん断破壊面の形状の違いや配筋鉄筋の効果により絶対値そのものは異なるが、疲労による耐力低下の傾向が同様であることから、破壊モードに配慮した梁の実験を行うことにより床版における下面増厚補強の効果を概略検討可能であると言える。すなわち、下面増厚補強に係わる材料、施工方法および補強設計の検討に当たっては、曲げ降伏しないよう設計した RC 梁による静的試験および疲労試験により基礎的データを蓄積することにより効率的な研究開発が可能になると考えられる。

6. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) 下面増厚補強した RC 梁のせん断耐力は、界面が一体化している場合には、引張鉄筋を主筋および補強筋の図心位置として既往のせん断耐力式を適用することにより推定することが可能である。
- (2) 下面増厚補強した RC 梁の疲労寿命は、界面

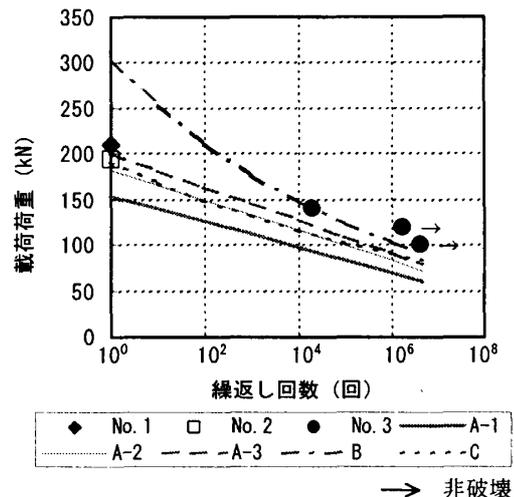


図-11 疲労寿命推定

- が一体化している場合には、既往の棒部材の疲労評価式で安全側に評価が可能である。
- (3) 曲げ降伏が先行しないよう設計した RC 梁を用いた定点荷重試験により静的および疲労試験を行い、破壊モードに配慮した実験結果が得られれば、床版の下面増厚補強効果に関する検討が概略可能である。輪荷重走行試験と併用することにより、下面増厚等に関する床版を対象とした材料および工法仕様の検討段階の有効な手法と成り得る。

参考文献

- 1) 松井ほか：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，No. 348，V-1，pp.133-141，1984. 8
- 2) 紫桃ほか：ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理，コンクリート工学，Vol. 38，No. 8，pp. 40-54，2000. 8
- 3) 二羽ほか：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No. 372，V-5，pp.167-176，1986. 8
- 4) 土木学会 コンクリート標準示方書（平成 8 年版）設計編，1996
- 5) 内田ほか：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，第 1 回鋼橋床版シンポジウム論文集，pp. 37-42，1988. 11