

論文 下面増厚したRC床版の輪荷重走行試験による疲労耐久性の評価

横山 和昭^{*1}・鹿野 善則^{*2}・紫桃 孝一郎^{*3}

要旨：道路橋RC床版の下面増厚工法は，主に曲げに対してRC床版を補強する補強工法として設計施工されているが，道路橋床版の最終的な破壊形態である押抜きせん断破壊に対する疲労耐久性を評価する目的で，下面増厚したRC床版試験体の輪荷重走行試験を実施した。試験体は，昭和39年の鋼道路橋設計示方書に基づいて設計されたRC床版の下面に補強鉄筋を配置し，ポリマーセメントモルタルを用いて吹付け工法によって22mmおよび50mmの厚さで下面増厚したものである。実験の結果，下面増厚工法によってRC床版の疲労耐久性が向上し，22mmと比較して50mmの増厚構造が補強効果に優れることが確認できた。

キーワード：RC床版，補強，下面増厚，輪荷重走行試験，疲労耐久性

1. はじめに

昭和48年以前の基準で設計された道路橋鉄筋コンクリート床版（以下，RC床版）は，現行の基準で設計されたものに比べて，主桁間隔が広く，床版厚が薄く，配力鉄筋が少ない構造となっているため，疲労損傷による劣化が顕著である。また，平成5年11月の車両制限令の改正による通行車両の大型化に伴い，特に，輪荷重を直接支持するRC床版の劣化は加速していくものと考えられる。

このため，RC床版の補強工法としては，上面増厚工法に関する研究がなされ，設計施工マニュアル¹⁾が整備された。その結果，日本道路公団（以下，JH）においては，上面増厚工法がRC床版の一般的な補強工法として採用されているが，交通規制が不可能である等の理由で上面からの施工が困難な場合には，下面からの補強が必要とされている。

下面増厚工法は，既設床版コンクリートの下面に鉄筋等の補強材を設置し，接着性に優れたセメント系材料で増厚することにより，主に曲げに対して床版を補強する工法であり，本工法の曲げ補強効果に関しては多くの研究成果²⁾が

報告されている。

一方，既往の研究により，下面増厚補強の対象となるような既設道路橋床版は輪荷重の繰返し載荷に伴って橋軸直角方向のひび割れが発生した後に梁状化し，最終的には押抜きせん断破壊することが明らかになっている。このため，押抜きせん断に対する下面増厚工法の補強効果については，実物大の床版試験体により輪荷重走行試験を実施するのが望ましい。

そこで，本研究では，実物大規模のRC床版に下面増厚補強を施した供試体を用いて輪荷重走行試験を実施し，下面増厚補強されたRC床版の押抜きせん断破壊性状および無補強試験体と比較した疲労耐久性に関する補強効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の諸元

輪荷重走行試験で用いたRC床版試験体は，昭和39年の鋼道路橋設計示方書に基づいた表-1に示す諸元のものとした。表-1に示すように，床版Aは無補強床版であり，床版Bおよび床版Cは50mmおよび22mmの厚さで下面増厚した

*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（正会員）

*3 日本道路公団試験研究所 道路研究部橋梁研究室長（正会員）

表 - 1 R C床版試験体の諸元

試験体種別	寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋 (mm)	配力鉄筋 (mm)	補強方法 (増厚部の使用材料)	補強鉄筋 (mm)	表面処理工法
床版 A	3000	2500	上側(圧縮側) D16@300	上側(圧縮側) D10@300	無補強	-	-
床版 B	7000				厚さ 50mm の下面増厚 (ポリマーセメントモルタル)	D10@100	ブラスト工法
床版 C	180		下側(引張側) D16@150	下側(引張側) D13@300	厚さ 22mm の下面増厚 (ポリマーセメントモルタル)	D6@45	ブラスト工法

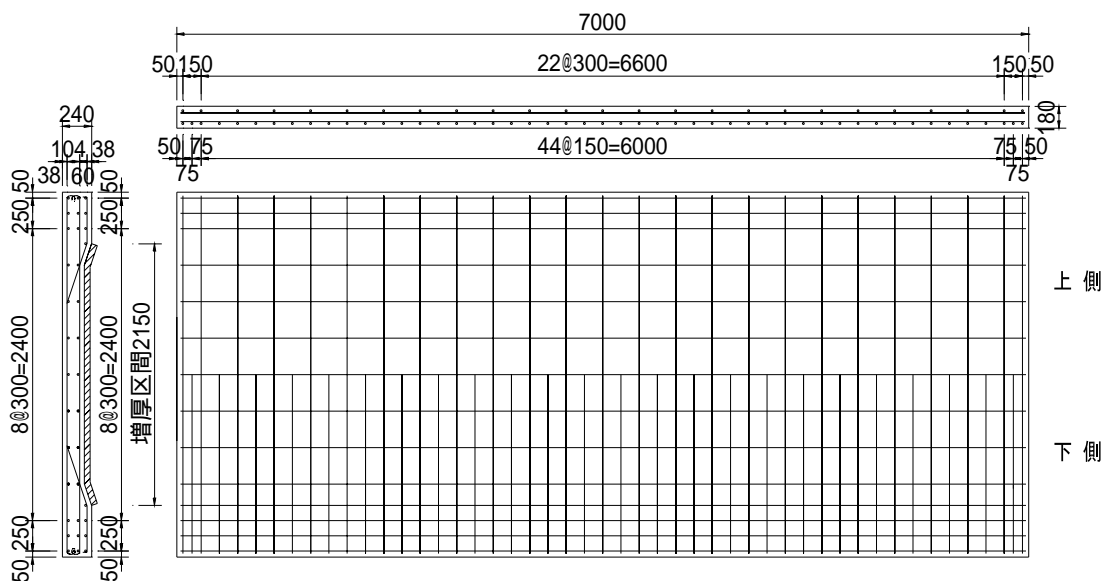


図 - 1 R C床版試験体の形状 (mm)

床版である。既設床版と下面増厚部との打継ぎ界面については、実橋での施工を想定してブラスト工法で表面処理した。また、下面増厚部に設置する補強鉄筋量は、床版 B と床版 C で等しくなるように補強鉄筋間隔を調整した。

図 - 1 に床版試験体の形状を示す。既往の輪荷重走行試験³⁾では床版厚を 190mm とし支点部にハンチを設けていないが、実橋では主桁位置でハンチ部を有していることから、今回の実験では、実橋を想定して床版厚を 180mm とし、支点部にハンチを設けた。

増厚部の使用材料はポリマーセメントモルタルとし、現場での施工を想定して吹付け工法で施工した。試験時の鉄筋、コンクリートおよび増厚部モルタルの強度試験結果を表 - 2 ~ 表 - 4 に示す。

表 - 2 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
D6	427	545	19.2
D10	380	532	18.9
D13	358	516	19.2
D16	352	520	19.0

表 - 3 コンクリートの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
床版 A	32.6	2.96	2.38
床版 B	33.6	2.82	2.25
床版 C	34.3	2.75	2.35

表 - 4 増厚部モルタルの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
床版 B	47.4	3.85	2.52
床版 C	43.5	3.07	2.48

2.2 試験方法

輪荷重走行試験は、RC 床版試験体の上面に 500mm×200mm の載荷ブロックを 1 列に並べた軌道上を幅 500mm の鉄輪が 3m の範囲(±1.5m)を往復して載荷するものとした。載荷荷重の設定は、既往の階段状荷重漸増載荷による方法³⁾と同様に 157kN から開始し、表 - 5 に示すように、1 ステップあたり 4 万回の輪荷重走行毎に載荷荷重を 20kN ずつ増加させる方法とした。

表 - 5 載荷荷重の設定

載荷ステップ	載荷荷重 (kN)	総走行回数 (万回)
1 N	157	4
2 N	177	8
3 N	196	12
4 N	216	16
5 N	235	20
6 N	255	24
7 N	275	28
8 N	294	32
9 N	314	36
10 N	333	40
11 N	353	44
12 N	373	48
13 N	392	52
14 N	412	56

3. 実験結果

3.1 破壊時走行回数の比較

図 - 2 に階段載荷における載荷荷重と破壊時走行回数の関係を示す。図 - 2 には、建設省(現国土交通省)土木研究所(以下、土研)で行われた同様の輪荷重階段載荷試験結果⁴⁾も併せて記載した。

床版 A と諸元が類似している土研の供試体は「RC39 土研」として表記しているが、床版 A が 255kN の 21.54 万回で破壊しているの対して、「RC39 土研」は 157kN の 2.7 万回で破壊している。試験結果が異なっている要因は、輪荷重走行試験機の構造上の違いとハンチ構造の有無による影響であると考えられる。また、平成 8 年の道路橋示方書に基づいて設計された土研の供試体は「H8 土研」と表記しているが、「H8 土研」

は 275kN の 25.6 万回で破壊しており、床版 A は「H8 土研」に近い結果となっている。一方、下面増厚した床版 B および床版 C は、それぞれ、373kN の 45.1 万回と 412kN の 53.4 万回で破壊しており、無補強の床版 A と比較して、疲労耐久性が向上していることが確認できる。

さらに、土研において実施された FRP グリッドを補強筋とした下面増厚工法を施した供試体の試験結果を「FRP グリッド土研」と表記しているが、「FRP グリッド土研」は、「RC39 土研」の 4 段階上で破壊している。一方、今回の試験結果では、鉄筋を補強筋に用いた下面増厚工法を施した床版 B および床版 C は、無補強試験体である床版 A に比べて 6 段階以上で破壊している。以上より、階段状荷重漸増載荷による輪荷重走行試験の結果、無補強床版に比べて下面増厚した RC 床版は疲労耐久性が向上することが確認できた。

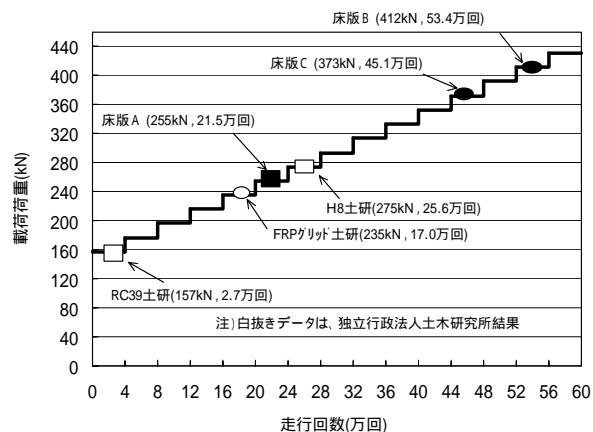


図 - 2 破壊時走行回数と破壊荷重の関係

3.2 走行回数と活荷重たわみの関係

図 - 3 に、走行回数と各床版中央の活荷重たわみとの関係を示す。図 - 3 より、活荷重たわみが 4mm を超えると急増して破壊に至るという傾向を示している。また、載荷ステップ 3 N (総走行回数 12 万回)以下で、床版 A と比較すると、床版 B および床版 C は、たわみ量が 3 ~ 4 割に低減しており、下面増厚による補強効果が確認できる。

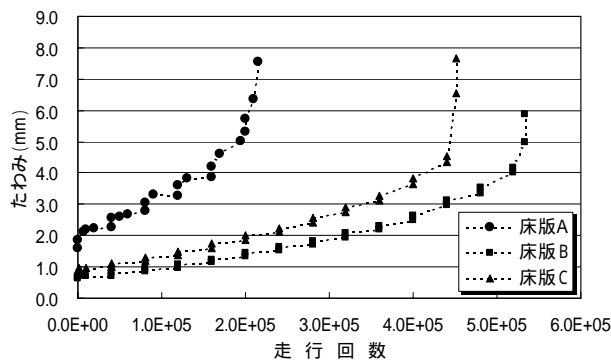


図 - 3 走行回数と活荷重たわみの関係

3.3 床版供試体の破壊性状

図 - 4 に、破壊時の床版下面のひび割れ発生状況を示す。いずれの試験体も、破壊時の床版下面のひび割れは亀甲状であり、同様な傾向を示している。なお、破壊時の無補強床版（床版 A）の床版上面の載荷範囲では、上側主鉄筋に沿って約 300mm の等間隔で橋軸直角方向ひび割れが発生しており、移動輪荷重の走行繰返し載荷によって床版が梁状化している状況が確認された。

床版試験体は、試験終了後に橋軸方向および橋軸直角方向に切断した。橋軸直角方向の切断面のひび割れ図および切断面の左側半分のひび割れ状況写真を図 - 5 および写真 - 1 に、橋軸方向のひび割れ図を図 - 6 に示す。橋軸直角方向は、押抜きせん断破壊した範囲のほぼ中心を切断し、橋軸方向は、鉄筋位置を避けるため床版中心から 50mm ずらした位置を切断した。

図 - 5 および写真 - 1 に示すように、橋軸直角方向の切断面を見ると、載荷幅（500mm）の直下で上側圧縮鉄筋に沿って水平方向ひび割れが発生している。これは、載荷直下の鉄筋かぶりに発生する輪荷重走行試験特有のひび割れである。

いずれの試験体も橋軸直角方向の押抜きせん断ひび割れは、概ね左右対称に発生しており、せん断破壊面の角度は 30～40° 程度であった。無補強の床版 A は押抜きせん断破壊により、床版下面に数 mm のひび割れ段差が見られたが、

下面増厚した床版 B および床版 C では、押抜きによる床版下面のひび割れ段差は見られず、増厚部が面的に剥離する特徴を示し、せん断ひび割れが増厚界面に沿って支点側へ進展し、増厚部が載荷位置を中心にしてドーナツ状に剥離する破壊性状を示した。

図 - 6 に示すように、橋軸方向の切断面を見ると、切断位置から左右 900mm（計 1.8m）の範囲で上側圧縮鉄筋に沿ってひび割れが発生している。これは、輪荷重走行範囲（台形波の上限荷重範囲 1.8m）にほぼ一致している。

また、押抜きせん断ひび割れは、片方（右側）の切断面にのみ発生しており、せん断破壊面の角度は 30～40° 程度であった。

なお、下面増厚した床版 B および床版 C では、せん断ひび割れが増厚界面に沿って外側へ進展していた。

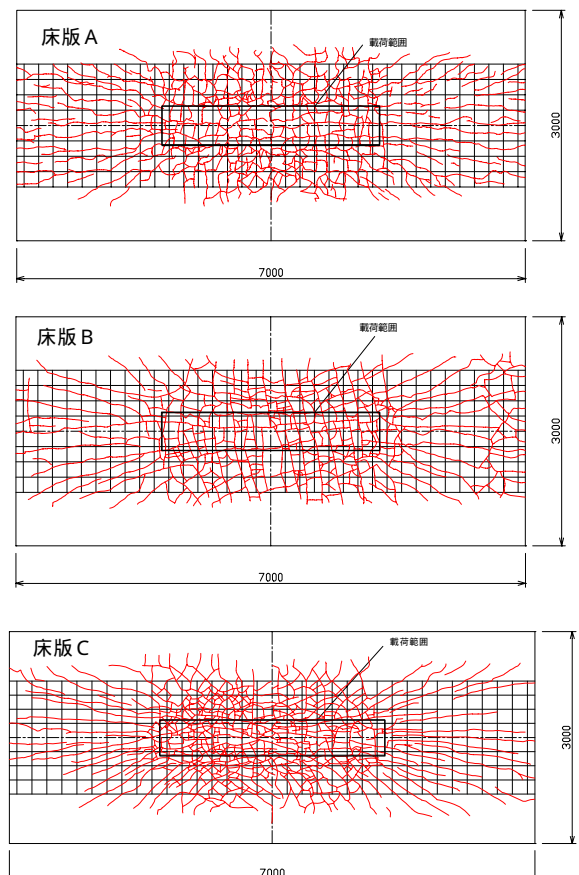


図 - 4 破壊時の床版下面のひび割れ状況

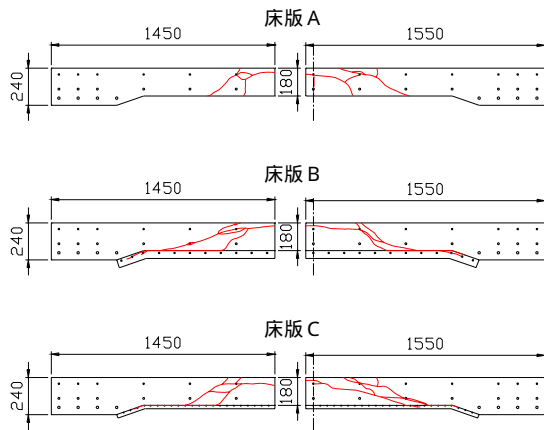


図 - 5 橋軸直角方向のひび割れ図



写真 - 1 橋軸直角方向のひび割れ状況写真

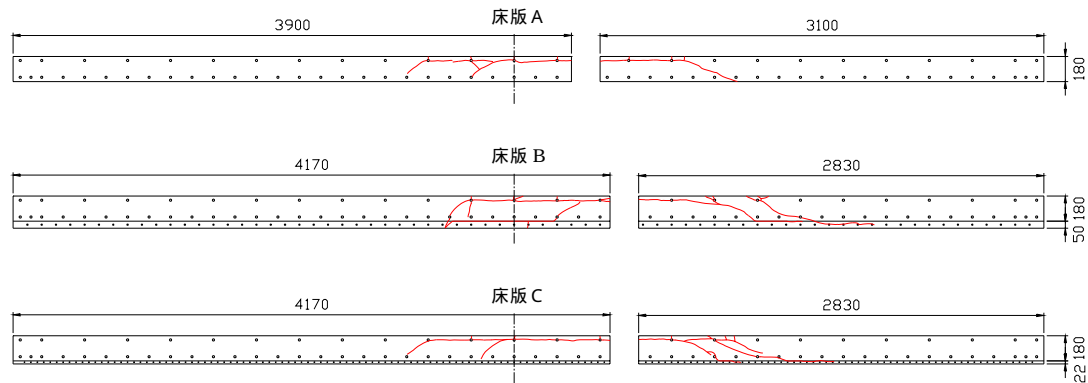


図 - 6 橋軸方向のひび割れ状況図

3.4 S - N関係による疲労耐久性の比較

床版試験体の疲労耐久性を比較するために、今回の試験結果と 3.1 で前述した土研の試験結果⁴⁾および JH で過去に実施した平成 8 年の道路橋示方書に基づいて設計された供試体の試験結果(「H8JH」と表記)を 157kN に換算した等価繰返し载荷回数および無次元化した S - N 曲線⁵⁾(松井式)を併記して図 - 7 に示す。図 - 7 における縦軸 S は、P (157kN) と P_{sx} (梁状化した床版の押抜きせん断破壊耐力⁵⁾)の比 (S = P / P_{sx}) を示す。図 - 7 より、土研の試験結果は松井式の下方に位置しており、今回の試験結果は松井式の近傍および上方に位置していることが判る。また、無補強床版 (RC39 土研、床版 A) に比べて補強床版 (FRP グリッド土研、床版 B および床版 C) の载荷回数は、平成 8 年の道路橋示方書に基づいて設計された床版 (H8

土研, H8JH) の载荷回数近くまで増加していることが判る。

特に、50mm の厚さで下面増厚した床版 B は、平成 8 年の道路橋示方書に基づいて設計された床版 (H8JH) と同等以上の疲労耐久性となっており、増厚部モルタルの厚さが RC 床版の疲労耐久性の向上に寄与することが確認された。

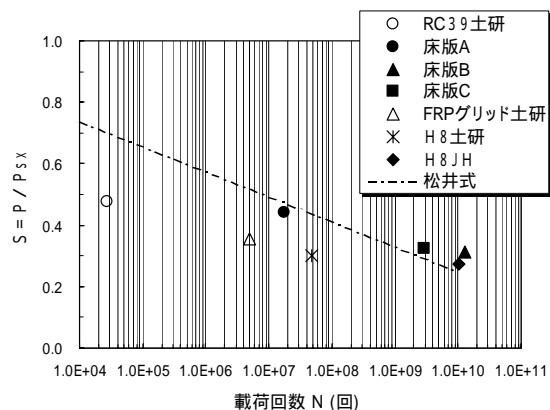


図 - 7 無次元化した S - N 関係

4. まとめ

本研究は、下面増厚した RC 床版試験体の輪荷重走行試験を実施し、RC 床版の最終的な破壊形態である押抜きせん断破壊に対する下面増厚工法の補強効果について実験的に検討したものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 昭和 39 年の鋼道路橋設計示方書に基づいて設計された RC 床版は、下面増厚補強によって、平成 8 年の道路橋示方書に基づいて設計された床版と同等程度まで疲労耐久性が向上する。
- (2) 下面増厚した RC 床版の疲労破壊性状は床版上面から 30~40° の角度で進展してきたひび割れが増厚界面に沿って進展し、最終的にはドーナツ状に剥離する。

5. 今後の展望

これまでの道路橋 RC 床版の下面増厚工法は、許容応力度設計法に基づいて設計されてきた。一方、平成 14 年の道路橋示方書⁶⁾から疲労耐久性を考慮した RC 床版の設計について規定されており、疲労耐久性の確認手法としては、本研究で実施した階段状荷重漸増載荷による輪荷重走行試験が紹介されている。しかし、実物大規模の輪荷重走行試験を実施するには多大な費用と労力を要するため、最適な増厚構造を設計検討するための基礎的研究として、筆者らは最適な増厚構造に関する解析的研究⁷⁾や梁状化した床版を想定した簡易な試験方法に関する実験的研究⁸⁾を実施してきた。今後は、これらの研究成果を統合し、下面増厚工法の疲労耐久性に関して実務的に検証していく必要がある。また、本研究での実験は、補強前における既設 RC 床版の疲労損傷状況を再現していないため、今後は、補強前の既設 RC 床版の疲労損傷を再現した実験を実施するとともに、実橋において下面増厚が施工された RC 床版の追跡調査を実施して、より現実的な補強効果の評価方法を確立していきたいと考えている。なお、下面増厚では床版上

面からの水の進入を防げないので、床版防水工を併用すべきである。さらに、補強後の再損傷対策として、上面増厚工法と下面増厚工法を併用した補強工法⁹⁾についても検討を加える必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル，1995.11
- 2) 例えば、佐藤貢一，檜作正登，肥田研一，引地健彦：吹付け下面増厚補強した道路橋 RC 床版の補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.517-522，2000.6
- 3) 川間重一，内田賢一，西川和廣：既設 RC 床版の階段状荷重漸増載荷における疲労耐久性評価手法に関する検討，土木学会第 55 回年次学術講演会，CS-257，p.514-515，2000.
- 4) 建設省土木研究所ほか：道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書（その 2）- 標準試験方法および第 2 回試験報告 - ，1999.10
- 5) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労寿命予測 - ，安全工学，Vol.30，No.6，p.432-440，1991.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋編，pp.233-236，2002.3
- 7) 横山和昭，菅野匡，佐藤貢一，Meera Mohan：下面増厚した道路橋床版の増厚構造の最適解，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1111-1116，2001.7
- 8) 横山和昭，鹿野善則，紫桃孝一郎：下面増厚した RC 梁のせん断補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1909-1914，2003.7
- 9) 例えば、川西寛，松井繁之，堀川都志雄，西川和廣：道路橋床版の上面増厚工法，下面シート接着工法および両者を併用したサンドイッチ工法の疲労耐久性評価，橋梁と基礎，Vol.35，No.9，pp.25-34，2001.9