CFRP 格子筋下面増厚補強法における補強効果および S-N 曲線式の整合性の検証

永井幸太^{*1} 阿部忠^{*2} 小森篤也^{*1}

^{*1} 日本大学 大学院生産工学研究科土木工学専攻(〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

^{*2} 日本大学 生産工学部土木工学科(〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

要旨：本研究は、RC 床版の下面増厚補強法において引張補強材に CFRP 格子筋を配置した場合の補強効果、耐疲労性の検証および RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証した。その結果、RC 床版の等価走行回数と CFRP 格子筋を増厚界面に配置した場合は 3.5 倍、増厚層内に CFRP 格子筋を配置した場合は 8.1 倍となった。また、接着剤を塗布した供試体においても 17.8 倍、21.0 倍となり、接着剤を塗布することで耐疲労性が向上する結果となった。次に CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法の寿命推定には、本実験の押抜きせん断耐力と等価走行回数の関係は、阿部らの提案する S-N 曲線の傾きに近似する結果となった。

キーワード：RC 床版、CFRP 格子筋、下面増厚補強法、耐疲労性、S-N 曲線

1. はじめに

高度経済成長期に建設された道路橋は建設後 50 年が経過し、老朽化した橋梁が増加することから、その維持管理が重要な課題となっている¹⁾。道路橋部材のなかで損傷が著しい部材は RC 床版であり、その多くは疲労損傷である。また、建設地域の環境条件によっては疲労損傷に塩害や凍害が複合され、健全性が大きく低下している。これら健全性が低下した床版に対して耐荷力性能の向上を図る目的として補強が必要となる。たとえば下面コンクリートのはく落や鉄筋の露出などの下面損傷が見られる床版に対しては、鋼板接着補強や床版下面に鉄筋を配置しセメントモルタル吹付けによる下面増厚補強が施されている²⁾。しかし、鋼板接着補強法や下面増厚補強法においては海岸線に建設された RC 床版には飛来塩分、積雪寒冷地域の床版は融雪剤散布による塩害を受け、鉄筋に発錆などの再劣化が懸念される。これらのことから、コンクリートやセメントモルタルを用いて RC 床版の増厚補強に配置する引張補強材として軽量で施工性が良く、錆が発生しない CFRP 格子筋が開発された。そこで、CFRP 格子筋を増厚界面に配置し、ポリマーセメントモルタル(以下 PCM とする)吹付け増厚補強が提案され耐疲労性を評価されている³⁾。また、増厚界面がはく離が先行することからエポキシ樹脂接着剤(以下接着剤とする)を塗布した補強法も提案され、実施工されている³⁾。一方、道路橋においては道路橋長寿命化修繕計画が策定され、都道府県庁や政令都市は計画を立案し、既に 5 年が経過している。これらの修繕計画では補強後の健全性の評価や残存寿命を推定し、100 年

間維持するためのサイクル補強が計画されている。しかし、RC 床版の寿命予測式は提案されているものの下面増厚補強法における余寿命推定のための S-N 曲線式は提案されていないのが現状である。

そこで本研究では、RC 床版の下面増厚補強法における従来の鉄筋と同等以上の特性値を有するワイヤーメッシュ、CFRP 格子筋を床版下面に配置した補強法および増厚界面に接着剤を塗布して CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強における輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価する。また、CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法における実験押抜きせん断耐力を評価し、RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証し、道路橋 RC 床版の下面増厚補強法の一助としたい。

2. 使用材料および供試体寸法

2.1 供試体概要

本実験に用いる供試体は、2002 年改定の道路橋示方書・同解説(以下道示とする)⁴⁾の規定に基づいて設計し、1/2 モデルとする。

2.2 使用材料

(1) RC 床版

RC 床版供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm~20mm の砕石を使用した。鉄筋には SD295A、D10 を用いた。ここで、使用材料の特性値を Table 1 に示す。なお、コンクリート圧縮強度は実験時の結果であり、鉄筋の特性値はミルシートの結果である。下面増厚補強における RC 床版も同様の材料で製作する。

Table 1 Mechanical properties of RC slab

Specimen	Concrete compressive strength (N/mm ²)	Reinforcement (SD295A, D10)		
		Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Tensile modulus (N/mm ²)
RC slab	35	368	516	200

Table 3 Mix proportions of PCM

Material	Unit weight (kg/m ³)		Water-binder ratio (%)
	Premixed cementitious materials	Water	
PCM	1,860	595	32

(2) 下面増厚補強床版

a) 補強引張材

引張補強材には従来の鉄筋と同様な特性値を有するワイヤーメッシュ ($\phi 3.2\text{mm}$ 、網目寸法 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 品) を用いる。ワイヤーメッシュの引張強度は縦 653N/mm^2 、横 630N/mm^2 である。次に CFRP 格子筋には、ワイヤーメッシュと同等な特性値および格子間寸法である、網目寸法 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 、厚さ 4.2mm の CFRP 格子筋を用いる。本実験に用いた CFRP 格子筋の剛性は、土木研究所⁵⁾による「炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書」に示されている炭素繊維連続シートの剛性 82kN/mm^2 の約 $1/2$ とした。ここで、ワイヤーメッシュと CFRP 格子筋の特性値と剛性比較を Table 2 に示す。

b) ポリマーセメントモルタル(PCM)

下面増厚補強に用いる PCM には、一般的に吹付け工法に用いられているビニロン繊維を配合した市販の製品を用いる。ここで、本実験供試体に用いる PCM の配合を Table 3 に示す。なお、本 PCM にはビニロン繊維が配合されているが、詳細は公表されていない。供試体に用いる PCM の圧縮強度は、材齢 28 日で 44.3N/mm^2 である。

c) 接着剤

RC 床版の下面増厚補強では既設 RC 床版コンクリートと PCM の付着性を高めるために、プライマーの塗布が行われている。そこで、従来より施工されている界面処理方法として、アクリルエマルジョン系プライマー(以下プライマーとする)を用いる。ここで、プライマーの性能を Table 4 に示す。

また、道路橋 RC 床版の上面損傷には SFRC 上面増厚補強法が採用されている。しかし、増厚界面が早期にはく離破壊するなどの再劣化が生じている。そこで、増厚界面のはく離を防止させるために既設 RC 床版の増厚界面全面に専用のエポキシ系接着剤を塗布した補強法が提案され、耐疲労性が評価されている。そこで、本研究における RC 床版の下面増厚補強法においても、既設 RC 床版コンクリートと増厚界面の付着性を高めるためにエポキシ系接着剤を用いた。本実験に用いた接着

Table 2 Stiffness of Tension members

Tension members	Young's modulus (kN/mm ²)	Cross section area (mm ²)	number of tension member/m	tensional stiffness (kN·m)
Wire mesh	200.0	8.0	20	32.15
CFRP grid	103.7	17.5	20	36.30

Table 4 Bond Properties of Primer and Adhesive

Materials	Thicknes (mm)	Bond Load (N)	Bond Strength (N/mm ²)
Primer	75.0	5,118.7	2.61
Adhesive	75.0	4,671.3	2.38

Fig. 1 Specimen Size and re-bar arrangement

剤の性能を Table 4 に併記する。

2.3 供試体寸法および鉄筋の配置

(1) RC 床版供試体

RC 床版供試体の寸法は全長 $1,470\text{mm}$ 、支間 $1,200\text{mm}$ 、床版厚 130mm とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張主鉄筋に D10 を 100mm 間隔で配置し、有効高を 105mm とした。また、圧縮側には引張鉄筋量の $1/2$ を配置した。供試体名称は、走行荷重実験に用いる供試体を RC-R、輪荷重走行疲労実験に用いる供試体を RC とする。ここで、RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を Fig. 1(1)に示す。

(2) 下面増厚補強床版供試体

増厚界面にプライマーを塗布した供試体として、未損傷 RC 床版供試体の下面の $1,100\text{mm} \times 1,100\text{mm}$ の範

囲をあらかじめ 15mm 箱抜きし、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を増厚界面に配置した後、PCM を厚さ 25mm で吹付け増厚補強する。ここで、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を増厚界面に配置した場合の断面寸法は、軸直角方向のワイヤーメッシュから上縁までの有効高さは 119.8mm、CFRP 格子筋から上縁までの有効高さは 117.1mm となり、床版全厚は 140mm である。供試体名称は、走行荷重実験に用いる CFRP を配置した供試体を RC-C-R とする。また、輪荷重走行疲労実験に用いるワイヤーメッシュ、CFRP 格子筋を配置した供試体の名称をそれぞれ RC-W および RC-C1 とする。次に CFRP 格子筋を増厚層内に配置し、床版上縁までの有効高を設ける供試体は、増厚界面から 10mm の位置に配置し、CFRP 格子筋の位置から上縁までの有効高は 127.1mm、床版全厚は 140mm である。この供試体名称を RC-C2 とする。

RC 床版の増厚界面に接着剤を塗布する供試体は、プライマーを塗布する供試体寸法と同様とする。これらの供試体名称は、走行実験に用いる増厚界面に CFRP 格子筋を配置した供試体名称を RC-C.A-R とする。また、輪荷重疲労実験に用いるワイヤーメッシュ、CFRP 格子筋を配置、CFRP 格子筋を配置し有効高を変化させた供試体名称をそれぞれ RC-W.A、RC-C.A1、RC-C.A2 とする。

2.4 補強方法

RC 床版の下面増厚補強法は、鉄筋の露出、かぶりコンクリートの剥落、道示の改訂に伴う耐力性能の向上のための補強法である。よって、実橋における補強法は、床版支間の内側に補強されることから本供試体の補強範囲は床版支間内の 1,100mm×1,100mm×15mm の範囲とし、その内側に引張補強材を配置し、PCM を 25mm 増厚するものとする。なお、補強は実施工を想定し上向きで行い、FRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修・補強 設計・施工マニュアル(案)⁶⁾に準拠して製作する。施工手順を Fig. 2 に示す。

下面増厚補強法は、ディスクサンダーで増厚界面を研磨清掃(Fig. 2 (1))した後、付着性を高める目的でプライマーを塗布、または、接着剤を塗布し(Fig. 2 (2))、引張補強材を配置する(Fig. 2 (3))。その後、PCM を 15mm 吹付けし、2 時間養生した後、残りの 10mm を吹付けして表面仕上げを行う(Fig. 2 (4))。

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 走行荷重実験

ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法における寿命予測、健全度評価においては S-N 曲線式の提案が必要となる。そこで、引張補強材にワイヤーメッシュ、CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強した RC 床版供試体の耐力性能を検証する。RC 床版の耐力性能について、阿部らは⁷⁾輪荷重を走行させ、一走行ごとに荷重を増加させ、一往復維持した最大

Fig. 2 Work procedure

荷重を走行荷重が作用した場合の最大耐力力として評価している。そこで本研究においては、既往の研究⁷⁾に用いた RC 床版供試体 2 体(RC-R1、RC-R2)、引張補強材に CFRP 格子筋を用いて増厚界面に CFRP 格子筋を配置した供試体 1 体(RC-C-R)、増厚界面に接着剤を塗布し、CFRP 格子筋を配置した供試体 1 体(RC-C.A-R)を用いて走行荷重実験を行い、最大耐力力を検証する。走行荷重実験は、輪荷重を床版中央から軸方向を 900mm 走行し、元の床版中央まで 1 走行する。荷重は 1 走行ごとに 10kN ずつ増加する段階荷重載荷とする。走行荷重実験における最大耐力力を押抜きせん断耐力力 P_{sx} とする。

3.2 輪実験走行疲労実験

(1) 実験方法

RC 床版および下面増厚補強床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行う。実験荷重は 80kN で 20,000 回走行し、20,000 回走行ごとに荷重を増加する段階荷重載荷とする。たわみは、1、10、100、1,000、5,000 回とし、それ以降は 5,000 回ごとに計測する。下面増厚補強法における補強効果は、基準荷重に対する等価走行回数を算定し、無補強 RC 床版の等価走行回数を基準に補強効果および耐疲労性を評価する。

(2) 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験では、20,000 回走行ごとに荷重を増加させることから、基準荷重と載荷荷重および実験走行回数の関係から等価走行回数 N_{eq} を算出して補強効果および耐疲労性を評価する。輪荷重走行疲労実験による等価走行回数 N_{eq} は、マイナー則に従うと仮定すると式[1]で与えられる。なお、式[1]に適用する S-N 曲線の傾きの逆数 m には、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用する⁸⁾。前記の通り、RC 床版および下面増厚補強床版供試体は、道示 I に準拠して 1/2 モデルとした。よって、RC 床版供試体の基準荷重は、道示に規定する活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮して 60kN とする。

$$N_{ep} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad [1]$$

ここに、 N_{eq} ：等価走行回数(回)

P_i ：載荷荷重(kN)

P: 基準荷重 (60kN)
 n_i : 実験走行回数 (回)
 m : S-N 曲線の傾きの逆数 (= 12.7)

4. 結果および考察

4.1 走行荷重実験

(1) 最大耐荷力

RC 床版供試体 RC-R1 の最大耐荷力は 170.7kN、RC-R2 は 166.2kN であり、平均耐荷力は 168.4kN である⁷⁾。次に増厚界面にプライマーを塗布して CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C-R の最大耐荷力は 185.3kN である。RC 床版供試体に比して 1.1 倍の耐荷力性能を有している。また、増厚界面に接着剤を塗布し、CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.A-R の最大耐荷力は 205.0kN であり、RC 床版供試体に比して 1.2 倍の耐荷力性能を有している。破壊は両供試体ともに輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。これらの実験より得られた、CFRP 格子筋を用いた場合のそれぞれの最大耐荷力を押抜きせん断耐荷力 P_{sx} とする。

(2) 荷重とたわみの関係

走行荷重実験による荷重とたわみの関係を Fig. 3 に示す。RC 床版供試体 RC-R は、荷重 50kN 付近からたわみの増加が大きくなっているものの荷重 150kN 付近までたわみが一定に増加している。供試体 RC-R1 の最大たわみは荷重 170.7kN で 12mm、供試体 RC-R2 は荷重 166.2kN で 11.5mm であった。CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C-R は荷重 70kN 付近からたわみの増加がやや大きくなるものの荷重 150kN 付近までは一定に増加している。荷重 150kN 付近から増加が著しくなり、この付近ではく離が発生したと考えられる。破壊

は荷重 185.3kN で、破壊時のたわみは 7.0mm である。また、増厚界面に接着剤を塗布し、CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.A-R は荷重 100kN 付近までたわみが一定に増加している。その後の荷重増加と走行によりたわみの増加が大きくなっている。荷重 190kN 付近まで一定に増加している。破壊時のたわみは荷重 205.0kN で 7.9mm である。よって、下面増厚補強することで曲げ剛性が高まり、たわみの増加が抑制されている。

4.2 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験における RC 床版供試体および下面増厚補強床版供試体の実験走行回数および等価走行回数 N_{eq} (式[1])の算定結果を Table 5 に示す。

(1) 無補強 RC 床版

無補強 RC 床版供試体の等価走行回数は RC-1 が 7.347×10^6 回、RC-2 が 8.529×10^6 回であり、供試体

Fig. 3 Relationship between load and deflection

Table 5 Experiment cycles and number of equivalent cycles

Specimen		Load and running cycles				Total Number of equivalent cycles	Average Number of equivalent	Raito
		80kN	100kN	120kN	130kN			
RC-1	Experiment cycle	20,000	10,010				7,938,687	—
	Number of equivalent cycles	772,240	6,575,264			7,347,504		
RC-2	Experiment cycle	20,000	11,810				8,529,870	—
	Number of equivalent cycles	772,240	7,757,629					
RC-W	Experiment cycle	20,000	20,000	1,340			—	2.9
	Number of equivalent cycles	772,240	13,137,391	8,922,976		22,832,607		
RC-C1	Experiment cycle	20,000	20,000	4,100			—	3.5
	Number of equivalent cycles	772,240	13,137,391	14,086,838		27,996,469		
RC-C2	Experiment cycle	20,000	20,000	6,880			—	7.5
	Number of equivalent cycles	772,240	13,137,391	45,779,325		59,688,956		
RC-W.A	Experiment cycle	20,000	20,000	16,000			—	15.2
	Number of equivalent cycles	772,240	13,137,391	106,463,546		120,373,177		
RC-C.A1	Experiment cycle	20,000	20,000	19,000			—	17.8
	Number of equivalent cycles	772,240	13,137,391	127,197,701		141,107,332		
RC-C.A2	Experiment cycle	20,000	20,000	20,000	1,091		—	21.0
	Number of equivalent cycles	772,240	13,137,391	133,079,433	20,062,472	167,051,536		

RC-1,2の平均等価走行回数 N_{eq} は 7.938×10^6 回である。この RC 床版供試体の平均等価走行回数を基準に下面増厚補強床版の補強効果および耐疲労性を評価する。

(2) プライマーを塗布した下面増厚補強床版増厚界面

増厚界面にプライマーを塗布し、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W の等価走行回数は 22.83×10^6 回であり、無補強 RC 床版供試体の 2.9 倍の等価走行回数が得られた。また、CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C1 の等価走行回数は 27.99×10^6 回であり、無補強 RC 床版供試体の 3.5 倍の補強効果が得られた。また、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W の 1.2 倍の等価走行回数が得られた。次に CFRP 格子筋の引張力を高める目的で増厚界面から 10mm の位置の増厚層内に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C2 の等価走行回数は 59.688×10^6 回であり、無補強 RC 床版供試体の 7.5 倍の補強効果が得られた。また、CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C1 の等価走行回数に比して 2.1 倍の補強効果が得られた。

(3) 接着剤を塗布した下面増厚補強床版

増厚界面に接着剤を塗布した後、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W.A の等価走行回数は 120.373×10^6 回であり、無補強 RC 床版供試体の等価走行回数の 15.2 倍の補強効果が得られた。また、増厚界面にプライマーを塗布しワイヤーメッシュを配置した RC-W の等価走行回数の 5.3 倍の補強効果が得られた。また、CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.A1 の等価走行回数は 141.10×10^6 回であり、無補強 RC 床版供試体の平均等価走行回数の 17.8 倍、また CFRP 格子筋を用いた供試体 RC-C1 の等価走行回数の 5.0 倍の等価走行回数が得られ、接着剤を塗布することで増厚界面の付着強度が向上し、耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

次に増厚界面に接着剤を塗布し、増厚界面から 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.A2 の等価走行回数は 167.05×10^6 回であり、無補強 RC 床版供試体の等価走行回数に比して 21.0 倍の補強効果が得られた。また、増厚界面にプライマーを塗布した供試体 RC-C2 の等価走行回数の 2.8 倍の補強効果が得られた。

よって、同様に増厚界面に接着剤を塗布し、増厚層内の 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体は破壊時付近まで一体性が確保され、補強効果が得られたものと考えられる。

以上よりワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法は、同一寸法を有する RC 床版の等価走行回数に比して大幅に増加している。とくに増厚層内に CFRP 格子筋を配置し、上縁までの有効高を設けることで耐疲労性が向上する結果となった。また、増厚界面に打継用のエポキシ系接着剤を塗布することで、既設 RC 床版コンクリートと一体性が確保され耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

4.3 たわみと等価走行回数の関係

本実験における等価走行回数とたわみの関係を Fig. 4

(1) Specimen that spread Primer

(2) Specimen that spread Adhesive

Fig. 4 Relationship between deflection and Number of equivalent cycles

に示す。

(1) 無補強 RC 床版

無補強 RC 床版供試体のたわみは Fig. 4 に示すように荷重 80kN 載荷時の初期たわみは、供試体 RC-1 が 0.95mm、RC-2 が 0.93mm である。また、たわみが 3mm を超えた付近からたわみの増加が大きくなり、その後の走行により押し抜きせん断破壊となり実験を終了している。阿部らはたわみが床版支間 L の 1/400 (活荷重たわみの場合は 1/800 としている) に達した付近で補強対策をする必要があると提案されている⁷⁾。そこで、本実験では RC 床版のたわみが 3mm となる等価走行回数を、3mm 前後のたわみと等価走行回数の関係から補間法により算出し、この時点の等価走行回数を比較して補強効果を評価する。よって、RC 床版供試体 RC-1 のたわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 1.98×10^6 回である。破壊時のたわみは 6.86mm である。

(2) プライマーを塗布した下面増厚補強床版

増厚界面にプライマーを塗布し、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W は、Fig. 4(1) に示すように初期荷重 80kN 時の初期たわみは 0.8mm であり、その後の走行で徐々にたわみが増加している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 13.00×10^6 回であり、無補強 RC 床版供試体の 5.4 倍である。その後、荷重を 120kN に増加し走行した後、たわみが急激に増加し、破壊時の等価走行回数は 22.83×10^6 回で、最大たわみは 4.6mm である。また、CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C1 は、初期荷重 80kN 時の初期たわみは 0.91mm であり、その後の走行で徐々にたわみが増加している。

たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 13.91×10^6 回であり、RC 床版供試体の 7.0 倍である。その後、荷重を 120kN に増加し走行した後、たわみが急激に増加し、破壊時のたわみは 5.14mm である。たわみが床版支間 L の 1/400 付近から著しく増加したことから、この付近ではく離が開始されたものと考えられる。

次に増厚層内の 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置し有効高を設けた供試体 RC-C2 は、初期荷重 80kN 載荷時の初期たわみは 0.75mm であり、増厚下面に直接 CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C に比して、初期たわみが減少している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 33.10×10^6 回であり、RC 床版に比して 16.70 倍、CFRP 格子筋を直接配置した供試体 RC-C の 2.38 倍である。たわみが 3.2mm を越えた付近から急激に増加し始め、破壊時のたわみは 5.51mm である。よって、界面から 10mm の位置に有効高を設け CFRP 格子筋を配置することでたわみの増加が抑制され、同時にはく離も抑制されたものと考えられる。

(3) 接着剤を塗布した下面増厚補強床版

増厚界面に接着剤を塗布した後、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W.A は、Fig. 4(2) に示すように荷重 80kN 時の初期たわみは 0.7mm であり、その後の走行で徐々にたわみが増加している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 41.40×10^6 回であり、RC 床版供試体の 17.3 倍、供試体 RC-W の 3.2 倍である。その後、荷重を 120kN に増加し走行した後、たわみが急激に増加し、破壊時の等価走行回数は 120.37×10^6 回で、最大たわみは 4.55mm である。破壊状況は、押抜きせん断破壊と同時に増厚部の一部がはく離した。また、CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.A1 のたわみと等価走行回数の関係は、荷重 80kN 時の初期たわみは 0.71mm であり、その後の走行で徐々にたわみが増加している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 62.30×10^6 回であり、RC 床版供試体の 31.4 倍、増厚界面にプライマーを用いた供試体 RC-C.A に比して 4.7 倍であり、たわみが抑制されている。破壊時のたわみは等価走行回数 140.38×10^6 回で、最大たわみ 4.73mm である。

次に増厚界面に接着剤を塗布した後、増厚層内の 10mm の位置に有効高を設け CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.A2 の荷重 80kN 時の初期たわみは 0.63mm であり、その後の走行で徐々にたわみが増加している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 92.30×10^6 回であり、RC 床版供試体の 46.6 倍、増厚界面にプライマーを用いた供試体 RC-C.2 に比して 2.8 倍であり、たわみが抑制されている。たわみが 3.0mm を超えた後の走行疲労実験においても急激なたわみの増加はみられない。破壊時のたわみは 4.6mm である。

以上より、下面増厚補強法において CFRP 格子筋を増厚下面に直接配置した供試体は CFRP 格子筋の引張抵抗によりたわみの増加が抑制され、耐疲労性が向上し

ている。とくに CFRP 格子筋を増厚下面から 10mm の位置に配置し有効高を設けた供試体は、曲げ抵抗がさらに向上し、補強効果も得られている。また、増厚界面に接着剤を塗布することにより破壊時付近まで一体性が確保され、たわみの増加が大幅に抑制され、耐疲労性が向上する結果が得られた。

4.4 下面増厚補強法における S-N 曲線

(1) RC 床版の S-N 曲線式

阿部ら⁹⁾は、1994 年改定の道示に基づいて設計し、その 1/2、3/5 モデルとした供試体を用いて、輪荷重走行疲労実験の結果から得られた S-N 曲線式であり、式[2]として提案した。S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値は $m = 15.58$ である。一方、松井ら⁸⁾が提案する S-N 曲線式は、1964 年改定の設計基準で設計された床版(以下 39 年床版とする)、すなわち鉄筋に丸鋼を用いた供試体を用いて大阪大学が所有する輪荷重走行試験機を用いての実験結果から得られた式に、異形鉄筋を用いた供試体の S-N 曲線式も考慮した式である。ここで、松井らが提案する S-N 曲線式を式[3]に示す。なお、松井らが提案する S-N 曲線式における傾きの逆数の絶対値は $m = 12.76$ である。

阿部らが提案する S-N 曲線⁹⁾：

$$\log(P/P_{sx}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad [2]$$

松井らが提案する S-N 曲線⁸⁾：

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad [3]$$

ここに、P：基準荷重

P_{sx} ：押抜きせん断耐荷力(kN)

N：繰返し回数(回)

(2) 下面増厚補強法した RC 床版の S-N 曲線

RC 床版およびプライマーを塗布した下面増厚補強床版、接着剤を塗布した下面増厚補強床版の走行荷重実験における最大耐荷力、すなわち押抜きせん断せん断耐荷力 P_{sx} を用いて、S-N 曲線式における S 値を求める。よって、S 値は式[4]として与えられる。

$$S = P/P_{sx} \quad [4]$$

ここに、P：基準荷重(kN)

P_{sx} ：押抜きせん断耐荷力(kN)

RC 床版の走行荷重実験における最大耐荷力の平均は 168.5kN である。また、プライマーを塗布して CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強床版供試体の耐荷力は 185.3kN である。また、接着剤を塗布して CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強床版供試体は 205.0kN であ

Table 6 S-N Value

Specimens	Maximum loading capacity P_{sx} (kN)	Preliminary test force P (kN)	S-value (P/P_{sx})	N-value (Number of equivalent cycles)
RC-1	168.5	60	0.366	7,347,504
RC-2	168.5	60	0.366	8,529,870
RC-W	184.4	60	0.325	22,832,607
RC-C1	184.4	60	0.325	27,996,469
RC-C2	184.4	60	0.325	59,688,956
RC-W.A	205.0	60	0.293	120,373,177
RC-C.A	205.0	60	0.293	141,107,332
RC-C.A2	205.0	60	0.293	167,051,536

Fig. 5 S-N curve of RC slab and bottom surface thickening RC slab

る。なお、ワイヤーメッシュを用いた供試体および有効高を考慮した供試体の押抜きせん断耐力についても CFRP 格子筋を直接配置した場合の押抜きせん断耐力を適用する。次に横軸の N は Table 5 に示す輪荷重走行試験から得られた等価走行回数 N_{eq} を走行回数 N とする。ここで、本実験における RC 床版および下面増厚補強した S 値および N 値を Table 6、S-N 曲線図を Fig. 5 に示す。

無補強 RC 床版供試体 RC-1、2 は、阿部ら⁷⁾が提案する 1964 年改定の道示に準拠して床版を用いて評価された S-N 曲線上にプロットされている。また、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を増厚界面に直接配置した供試体においても、ほぼ S-N 曲線上にプロットされている。なお、増厚界面から 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置し、有効高を考慮した供試体の押抜きせん断耐力は、CFRP 格子筋を増厚界面に配置した供試体 RC-C-R の押抜きせん断耐力を用いたことから S-N 曲線より上側にプロットされている。一方、接着剤を塗布してワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を配置した供試体においても本実験から得られた押抜きせん断耐力適用することで S-N 曲線上にプロットされている。なお、増厚界面から 10mm の位置に有効高を設けた CFRP 格子筋を配置した供試体は S-N 曲線の上側にプロットされる。なお、RC 床版の走行荷重実験におけ

る押抜きせん断耐力の平均値 168.4kN を適用した場合の縦軸 S と等価走行回数の関係も Fig. 5 に併記した。

以上より 1964 年改定の道示に準拠して製作した RC 床版供試体にプライマー、或いは接着剤を塗布し、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を配置して PCM 吹付けによる下面増厚補強法の寿命推定には、阿部ら⁷⁾が提案する S-N 曲線式[2]の適用が可能である。なお、増厚層内に CFRP 格子筋を配置した場合の押抜きせん断耐力を検証する必要がある。また、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} は走行荷重実験による最大耐力を適用したが、今後は下面増厚補強における押抜きせん断耐力学モデルおよび理論押抜きせん断耐力式の提案が必要となる。

5. まとめ

- (1) 下面増厚補強法において引張補強材にワイヤーメッシュを用いた供試体は、RC 床版供試体の 3.1 倍であり、増厚層内 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体は 8.1 倍の補強効果が得られた。また、ワイヤーメッシュを用いた供試体に比して 2.6 倍の補強効果が得られた。よって増厚層内、すなわち RC 床版上面までの有効高をとることで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。
- (2) 増厚界面と各補強材にエポキシ樹脂系接着剤を塗布した補強法では、ワイヤーメッシュを配置した供試体は RC 床版供試体の 16.4 倍、CFRP 格子筋を配置した供試体は 22.7 倍の補強効果が得られた。また、ワイヤーメッシュを界面に直接配置した供試体に比して増厚層内に配置した供試体は 1.4 倍の補強効果が得られた。よって接着剤を塗布して引張補強材にワイヤーメッシュ、CFRP 格子筋を配置することで耐疲労性が向上した。また、増厚層内に CFRP を配置することで、さらなる延命化がはかられた。
- (3) RC 床版のたわみの増加に比して、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を用いた供試体は、たわみの増加が抑制されている。とくに増厚界面にプライマーおよび接着剤を塗布し、増厚層内に CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法は、たわみの増加が大幅に抑制されている。これは、破壊荷重付近まではく離することなく一体性が確保された結果であると考えられる。
- (4) ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法における寿命予測や健全度評価において、本実験により得られたそれぞれの耐力を適用した場合、文献⁹⁾に示す S-N 曲線式の適用が可能であると考えられる。なお、CFRP 格子筋下面増厚補強法の力学モデルを用いた理論押抜きせん断耐力式については今後の課題とする。

参考文献：

- 1) 千葉県県土整備部道路環境課企画調整室：千葉県橋梁長寿命化修繕計画(案) (2010)
- 2) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル(2012)
- 3) 及川裕介ほか：接着剤塗布型 CFRP 格子筋下面増厚補強した RC 床版の補強効果および耐疲労性の評価、セメント・コンクリート論文集、Vol. 68、pp. 503-509 (2014)
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ (2002)
- 5) 土木研究所：炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ) (1999)
- 6) FRP グリッド研究会：CFRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル(案) (2001)
- 7) 阿部忠ほか：走行荷重が作用する道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力評価式、構造工学論文集、Vol. 55A、pp. 1468-1477 (2009)
- 8) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版 (2007)
- 9) 阿部忠ほか：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力および耐疲労性の評価、土木学会論文集 A1、pp. 39-54 (2011)

A STUDY ON STRENGTHEN EFFECT AND S-N CURVE CONSISTENCY VERIFICATION OF THE BOTTOM SURFACE THICKNESS INCREASE STRENGTHENED RC SLAB USING CFRP GRID AND PCM

Kota NAGAI^{*1}, Tadashi ABE^{*2} and Atsuya KOMORI^{*1}

^{*1} NIHON UNIVERSITY, Master cours, Graduate School of Industrial Technology (1-2-1, Izumi-cho, Narasino-shi, Chiba 275-8575, Japan)

^{*2} NIHON UNIVERSITY, Dept. of Civil Engineering, College of Industrial Technology (1-2-1, Izumi-cho, Narasino-shi, Chiba 275-8575, Japan)

ABSTRACT : In this experimental study, we have evaluated various types of RC slab specimens with PCM thickness increase and strengthening method, such as RC slab with direct CFRP grid reinforcement on the bottom, RC slab with CFRP grid inside of the thickening layer and those specimens with adhesive by using the number of equivalent cycles obtained from load carrying wheel racking tests. We have also evaluated the consistency of the S-N curve using life prediction of RC slab. As a result, the specimen with direct CFRP grid reinforcement on the bottom showed 3.8 times stronger, and the specimen with CFRP grid inside of the thickening layer showed 8.1 times stronger effect compared to the unreinforced RC slab. Those specimens with adhesive also showed 17.8 times and 21.8 times stronger effect respectively. The result also showed that the S-N curve of the RC slabs on a highway bridge which is currently proposed is approximate consistent with the S-N curve proposed by Abe et. al.

KEY WORDS : RC slab, CFRP Grid, Bottom surface thickening, Fatigue durability, S-N curve