

# 論文 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

横山 和昭\*1・鹿野 善則\*2・紫桃 孝一郎\*3

**要旨：**道路橋床版の下面増厚工法に関して、増厚材料の物性や増厚構造が補強効果に及ぼす影響を実験的に評価する目的で、下面増厚した RC 梁の静的載荷試験および疲労載荷試験を実施した。試験体は、RC 梁の下面に補強鉄筋を配置し、セメント系材料を用いて吹付け工法によって下面増厚したものである。実験の結果、下面増厚工法の補強効果を評価する試験方法として RC 梁の定点載荷試験が適用可能であることが明らかとなった。なお、静的試験では下面増厚による曲げ剛性の向上を確認できたが、せん断耐力の向上は認められなかった。疲労試験では下面増厚による疲労耐久性の向上を確認できた。

**キーワード：**道路橋床版, 補強, 下面増厚工法, 押抜きせん断, 疲労耐久性

## 1. はじめに

道路橋床版の補強工法としては、上面増厚工法が一般的となっているが、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なる。下面増厚工法は、図-1に示すように、既設床版コンクリートの下面に鉄筋や FRP 等の補強材をコンクリートアンカーで設置し、接着性に優れたセメント系材料で増厚する工法である。本工法は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が実施されている。しかし、セメント系の増厚材料の選定および補強鉄筋の径やかぶり厚等の増厚構造に関する検討段階においては多数の実験を必要とするため、効率的に補強効

果を検討する上では、簡易な試験方法が望ましい。本研究では、梁状化した床版と同等の幅を有する RC 梁に下面増厚補強を施し、静的載荷試験および疲労載荷試験を実施し、下面増厚工法のせん断補強効果を実験的に検討した。

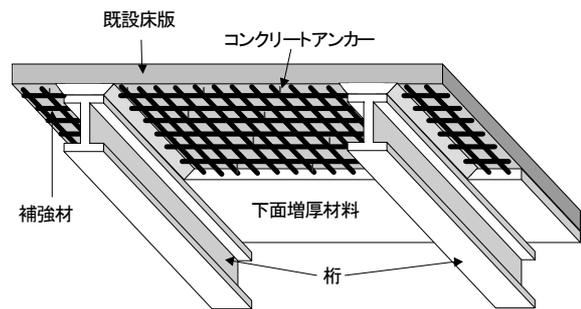


図-1 下面増厚工法の概念図

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の諸元

実験で用いた試験体は、梁状化した道路橋床版を想定し、せん断破壊が先行するように設計した上で<sup>1)</sup>、図-2に示すように支点部にハンチを設けた形状とした。RC 梁の断面は図-3に示すように鉄筋（既設部：D16，増厚部：D10もしくはD6）を配置し、表-1に示すセメント系材料で増厚して試験体を製作した。

\*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)

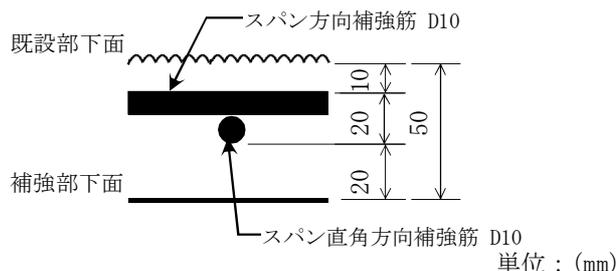
\*2 日本道路公団試験研究所 道路研究部橋梁研究室主任 (正会員)

\*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 試験体の概要

試験体の種別		下面増厚部のセメント系材料 (補修用モルタル)	増厚部 厚さ (mm)	補強鉄筋 径 (mm)	表面処理工法
静的	疲労				
SA	FA	なし (無補強)	—	—	—
SB	FB	ポリマーセメントモルタルA	50	10	W J 工法
SC	FC	ビニロン繊維混入セメントモルタル	50	10	W J 工法
SD	FD	鋼繊維混入超速硬セメントモルタル	50	10	W J 工法
SE	SE	ポリマーセメントモルタルB	50	10	ブラスト工法
SF	FF	ポリマーセメントモルタルA	50	10	ブラスト工法
SG	FG	ポリマーセメントモルタルA	22	6	ブラスト工法

下面増厚工法の施工実績では、増厚部の総厚を 22mm とする構造が多い。この場合、直径 6mm の補強鉄筋を既設床版下面との間に隙間を設けずに格子状に配置し、純かぶりを 10mm (表－1 中の SG, FG の試験体) としている。しかし、今回の試験体では、補強鉄筋背面への下面増厚材料の充填性に配慮して、図－4 に示すとおり補強鉄筋背面に 10mm の隙間を設ける構造を主体とした。また、最適な増厚構造に関する解析的研究<sup>2)</sup>を参考にして、補強鉄筋は比較的太径の D10 鉄筋、純かぶりは 20mm、増厚部の総厚は 50mm を主体とした。なお、図－3 においては、D10 の補強鉄筋を 4 本配置した厚さ 50mm の増厚構造を例示している。一方、厚さ 22mm の増厚構造 (SG, FG) においては、厚さ 50mm の増厚構造の補強鉄筋量と等しくする目的で D6 の補強鉄筋を 9 本配置した。



図－4 増厚部の構造

## 2.2 使用材料

### (1) 鉄筋

試験体に使用した鉄筋は、せん断破壊に先行して曲げ破壊が生じないように、表－2 に示す引張強度を有する高強度鉄筋とした。

表－2 鉄筋の引張試験結果

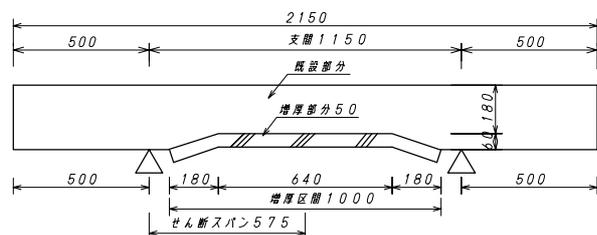
鉄筋種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
D10	790	984	21.1
D16	751	979	21.0

### (2) コンクリート

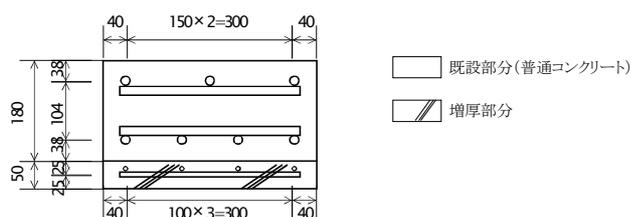
RC 梁試験体のコンクリートは、設計基準強度が 24N/mm<sup>2</sup> の早強ポルトランドセメントを使用した。載荷試験実施時におけるコンクリートの強度試験結果を表－3 に示す。

表－3 コンクリートの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
SA, FA	33.6	2.81	2.77
SB, FB	35.8	2.95	2.76
SC, FC	37.7	2.53	2.75
SD, FD	38.1	2.53	2.75
SE, FE	36.9	3.09	2.55
SF, FF	37.7	3.26	2.52
SG, FG	38.7	3.23	2.59



図－2 試験体形状 (単位 : mm)



図－3 断面図 (単位 : mm)

### (3) 増厚部の使用材料

増厚部は、表-1に示すように事前に既設RC梁の下面をウォータージェット(WJ)工法もしくはバキュームブラスト工法で表面処理した。その後、D10またはD6の補強鉄筋を設置し、セメント系材料を用いて吹付け工法により増厚した。増厚部に使用したセメント系材料は、ポリマー混和剤の量が異なる2種類のポリマーセメントモルタル(AとB)、ビニロン繊維混入セメントモルタル、鋼繊維混入超速硬セメントモルタルの合計4種類のモルタルを選定した。増厚部モルタルの強度試験結果を表-4に示す。

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 <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
SB, FB	45.7	3.51	2.23
SC, FC	38.3	6.36	1.91
SD, FD	63.9	4.86	2.42
SE, FE	31.1	3.09	1.72
SF, FF	35.4	3.38	1.67
SG, FG	40.6	2.77	1.82

## 2.3 載荷方法

### (1) 静的載荷試験

載荷試験は載荷幅を100mmとし、定点載荷の方法で実施した。静的試験は、荷重制御により3.1で後述する破壊荷重の計算値の40%から80%まで10%間隔で漸増させる方法とした。なお、載荷により非線形性が確認された後は、荷重制御から変位制御に変更して載荷した。

### (2) 疲労載荷試験

疲労試験の荷重の設定は、無補強試験体(SA)の静的破壊荷重295kNの40%である118kNの荷重を100万回まで載荷した。その後、各試験体の静的破壊荷重の概ね50%に荷重を上げて疲労破壊するまで繰り返し載荷した。

## 3. 実験結果

### 3.1 静的載荷試験結果

#### (1) 静的破壊性状

静的載荷試験の結果を表-5に示す。表-5

より、下面増厚補強試験体(SB~SG)は無補強試験体(SA)と比較して曲げひび割れ発生荷重が向上していることが確認できる。しかし、せん断ひび割れ発生荷重および破壊荷重に関しては、目立った向上は認められず、補強効果は確認されなかった。これらの原因については、表-4に示すような増厚部モルタルの物性値から類推するしか方法がなく、実験データも限られていることから現時点で原因を特定することはできない。表-5に示す計算値は、棒部材のせん断耐力評価式(式(1))<sup>3)</sup>により求めた各試験体の計算上のせん断耐力である。計算値では、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/mm<sup>2</sup>)

この結果、表-5における計算値は、せん断ひび割れ発生荷重の前後の値を示しており、破壊荷重を評価していない。最終的な破壊は、7種類の試験体のいずれも写真-1に示すような支点部からのせん断ひび割れによる破壊であり、補強筋のダウエル力はせん断耐力の計算に考慮できないと考えられるが、破壊荷重が計算値より大きい要因は、今回の試験体が支点部にハンチを有するRC梁であり、ハンチ構造が耐力の増加に寄与している影響と考えられる。

表-5 静的載荷試験結果

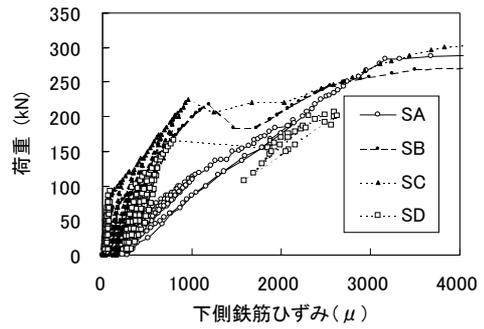
試験体	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	せん断ひび割れ発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	計算値 (kN)
SA	35	150	295	141
SB	45	155	290	172
SC	75	215	310	175
SD	70	170	210	175
SE	75	135	280	173
SF	69	160	285	175
SG	55	155	205	173



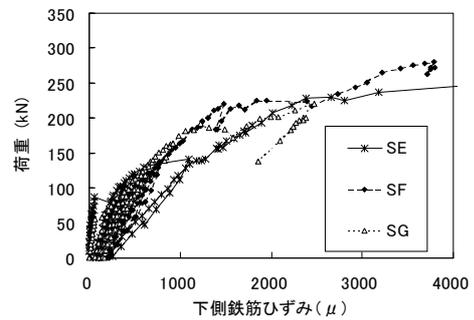
写真-1 静的試験体の破壊状況例 (SB)

(2) 変位および鉄筋ひずみの性状

荷重-変位関係を図-5に、主鉄筋および補強鉄筋のひずみを図-6および図-7に示す。図-5より、せん断ひび割れが発生するまでは増厚によって剛性が6割程度向上していることが確認できる。また、図-6~図-7より、主鉄筋に生じる応力を補強鉄筋が分担していることが確認できる。これらのことから、せん断ひび割れが発生する以前においては下面増厚による補強効果が確認された。

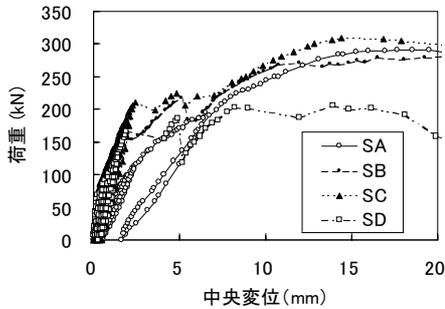


(a) SA~SD

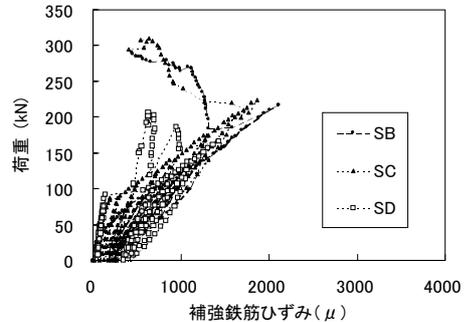


(b) SE~SG

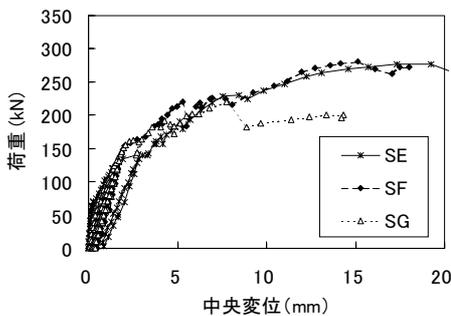
図-6 荷重-主鉄筋ひずみの関係



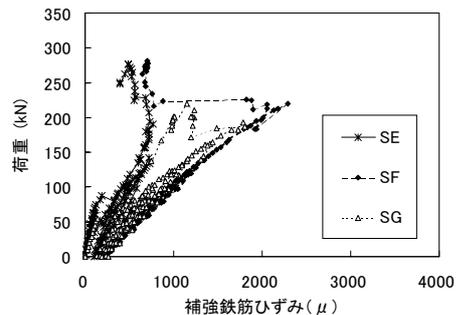
(a) SA~SD



(a) SB~SD



(b) SE~SG



(b) SE~SG

図-5 荷重-変位の関係

図-7 荷重-補強鉄筋ひずみの関係

### 3.2 疲労載荷試験結果

#### (1) 疲労載荷回数の比較

載荷荷重と載荷回数を表-6に示す。無補強試験体 (FA) は静的破壊荷重の 40%である 118kN の 59 万回載荷で疲労破壊したが、下面増厚補強試験体 (FB~FG) は 118kN の 100 万回載荷時点で破壊しなかったため、荷重を上げて疲労破壊するまで載荷した。表-6には土木学会コンクリート示方書のせん断補強鉄筋を用いない棒部材の設計せん断疲労耐力の評価式<sup>4)</sup>

(以下、示方書式)を参考に荷重 118kN に換算した回数と比を示している。表-6より、補強試験体 (FB~FG) は無補強試験体 (FA) に比べて 118kN に換算した疲労載荷回数が概ね 10 倍以上に向上しており、下面増厚補強によって疲労耐久性が向上することが確認された。また、増厚材料および増厚構造の違いによって疲労耐久性の向上効果も異なることも示唆される。

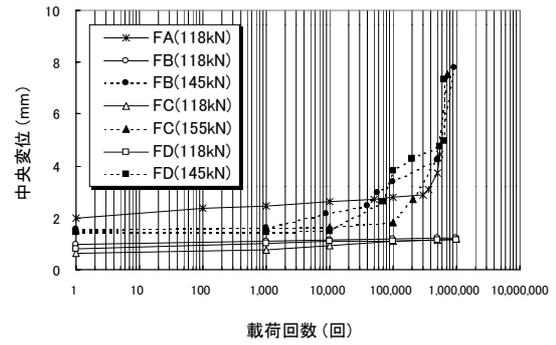
表-6 載荷荷重と載荷回数

試験体	荷重 (kN)	載荷回数	118kN 換算 <sup>*</sup> 回数 (比)
FA	118	59 万回 (破壊)	59 万回 (1)
FB	118	100 万回	1007 万回 (17)
	145	94 万回 (破壊)	
FC	118	100 万回	1546 万回 (26)
	155	72 万回 (破壊)	
FD	118	100 万回	727 万回 (12)
	145	65 万回 (破壊)	
FE	118	100 万回	659 万回 (11)
	145	58 万回 (破壊)	
FF	118	100 万回	573 万回 (10)
	145	49 万回 (破壊)	
FG	118	100 万回	457 万回 (8)
	145	37 万回 (破壊)	

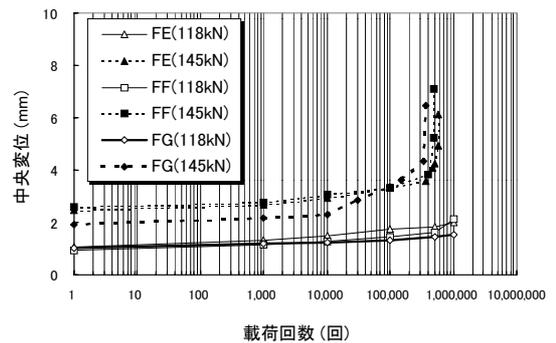
※示方書式<sup>4)</sup>に基づく換算回数

#### (2) 中央変位および剛性の変化

疲労載荷試験での繰返し載荷に伴う中央変位の変化を図-8に示す。また、荷重-中央変位関係の傾きである剛性の変化を図-9に示す。図-8および図-9より、下面増厚補強によって中央変位の増加が抑制され剛性が向上しており補強効果が確認できる。

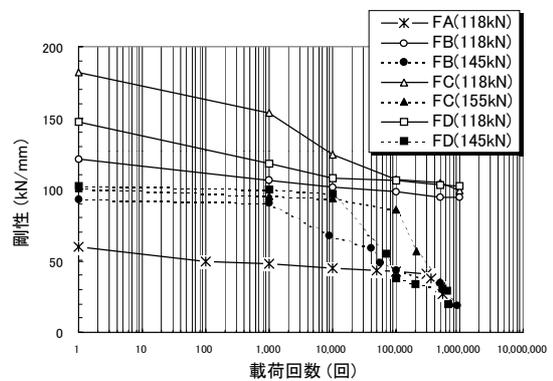


(a) FA~FD

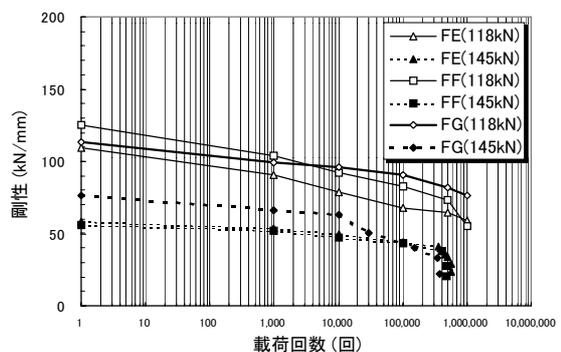


(b) FE~FG

図-8 中央変位の変化



(a) FA~FD



(b) FE~FG

図-9 剛性の変化

### (3) 疲労破壊性状

疲労載荷試験での最終的な破壊は静的載荷試験の結果と同様に7種類の試験体のいずれも写真-2に示すような支点部からのせん断ひび割れによる破壊であり、打継ぎ面での剥離は認められなかった。



写真-2 破壊状況 (FB)

### (4) 疲労寿命推定曲線との比較

表-6に記載した示方書式に基づく換算回数と既往の疲労寿命推定曲線との比較を図-10に示す。図-10の示方書式は、静的載荷試験で得られた無補強試験体 (SA) のせん断耐力の実測値を示方書式<sup>4)</sup>に代入したS-N曲線であり、松井式は、同様の実測値を松井式<sup>5)</sup>に代入したS-N曲線である。

図-10より、今回の実験値は示方書式と松井式の間分布しており、これらの既往の算定式により疲労寿命を概ね推定可能であることが確認できた。

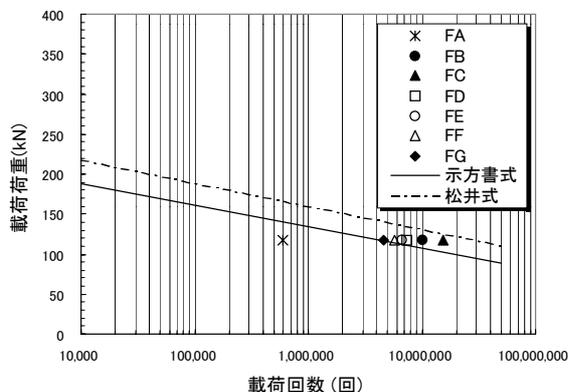


図-10 疲労寿命推定曲線との比較

## 4. まとめ

本研究は、RC梁試験体を用いて定点載荷による静的試験および疲労試験を実施し、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) RC梁試験体を用いた載荷試験は、ひび割れの発生状況、破壊性状が概ね類似しているため、下面増厚工法の補強効果を評価する試験方法として適用可能である。
- (2) 静的載荷試験の結果、下面増厚補強効果として曲げ剛性が6割程度向上する。
- (3) 疲労載荷試験の結果、下面増厚補強によってせん断破壊に関する疲労寿命が概ね10倍以上に向上する。

## 参考文献

- 1) 横山和昭, 鹿野善則, 福田一郎, 須田久美子: 下面増厚補強したRC梁の定点載荷疲労試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1567-1572, 2002.6
- 2) 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
- 3) 二羽淳一郎ほか: 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[構造性能照査編], pp.117-118, 2002.
- 5) 例えば, 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, pp.432-440, 1991.
- 6) 横山和昭, 鹿野善則, 紫桃孝一郎: 下面増厚補強したRC梁の定点載荷疲労試験による補強効果の評価, 日本材料学会コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集第2巻, pp.57-60, 2002.10