

繊維補強軽量コンクリートの床版上面増厚工法への適用と補強効果に関する 研究

神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 水越睦視

1. 研究の背景・目的

現在、橋長 15m 以上の道路橋は 17 万橋を超過し、これら橋梁群の多くは 2020 年代には供用開始から約 55 年を迎える。RC 床版の劣化損傷が顕在化し、大規模更新が進められているが、膨大な数の道路橋床版に対しては、長寿命化に向けた補修補強は喫緊の課題である。上面増厚工法は、RC 床版の交通荷重による疲労損傷に対する安全性の向上、車両の大型化に伴う設計荷重変更への対応、凍結防止剤散布による床版上面からの劣化対策などを目的として適用されている¹⁾。近年、本工法が適用された一部の道路橋 RC 床版において再劣化事例も確認されている¹⁾。これらの対策として、上面増厚を行う際に増厚界面にエポキシ系接着剤を塗りながらコンクリートを打ち込む事例が増えている¹⁾。また、上面増厚コンクリートの劣化対策として上面増厚部を除去し、更に既設 RC 床版の上段鉄筋の下側までのコンクリートを除去してポリビニルアルコール（以下、PVA）繊維補強普通コンクリートで打替え補強する工法も提案されている²⁾。

増厚材料には、一般的に活荷重により発生するひび割れ抑制のための鋼繊維と普通骨材を用いた鋼繊維補強コンクリートが多く使用されている¹⁾。しかし、下面増厚工法に比べると、上面増厚前より舗装厚を 25mm 減じたとしても増厚部の厚さは 50mm 程度と厚いことから上部工の自重が増加する。そこで、増厚材料として骨材の全量を人工軽量骨材とし、短繊維に鋼繊維よりも軽い PVA 繊維を使用した超速硬 PVA 繊維補強軽量コンクリート 2 種（以下、PVA-LC2）を適用し、早期交通解放と増厚材料の軽量化を図ることを考えた。さらに、電磁波レーダなどの非破壊試験装置による路面からの維持管理を考えた場合、鋼繊維よりも有機繊維を用いるのが適しているといえる。

本研究では、ウォータージェット（以下、WJ）による下地処理を行い、はつり深さ（上面増厚量）、打継ぎ界面への接着剤塗布の有無（接着剤の有無）を要因に、PVA-LC2 により上面増厚した RC 梁の曲げ載荷試験を行い、曲げ補強効果について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 配合試験

実験に使用した増厚コンクリートの目標性能は、実際の施工現場の実績を基にスランプ $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $2.0 \pm 1.5\%$ 、施工可能時間 60 分、3 時間圧縮強度 24N/mm^2 以上とした。増厚コンクリートの示方配合を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。コンクリートの練混ぜには、パン型強制練りミキサーを用いた。練混ぜは、セメント、細骨材、粗骨材の空練りを 5 秒間、水、高性能減水剤、凝結遅延剤を投入し、2 分間練り混ぜ、PVA 繊維を投入しながら 1 分間練り混ぜた後、排出した。直ちに、フレッシュコンクリートのスランプ、空気量、コンクリートの練上り温度、気温を測定した後、強度試験用の供試体を作製した。超速硬セメントの硬化が促進される夏期においては、所要のスランプと施工時間が確保できるかを、硬化が遅延する冬期においては、所要の 3 時間圧縮強度が得られるかを確認した。

表-1 増厚コンクリートの示方配合

配合試験の実施日	配合 No.	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	PVA繊維混入率 V_f (vol%)	高性能減水剤 C× (%)	凝結調整剤 C× (%)	単位量 (kg/m ³)				
							W	C	S	G	PVA繊維
6/22	1	30	56	1.0	1.8	0.8	170	567	653	442	13
7/23	2	30	56	1.0	1.8	0.8	160	533	674	459	13
12/25	3	30	56	1.0	0.8	0	160	533	674	459	13
3/27	4	30	56	1.0	1.5	0.1	160	533	674	459	13

表-2 使用材料

水 (W)	工業用水(密度:1.00cm ³)
セメント (C)	超速硬セメント(密度:2.98g/cm ³)
軽量細骨材 (S)	構造用人工軽量細骨材 膨張頁岩系 (表乾密度:1.92g/cm ³ , 絶乾密度:1.68g/cm ³ , 粗粒率:2.51, 吸水率:14.5%)
軽量粗骨材 (G)	構造用人工軽量粗骨材 膨張頁岩系 (表乾密度:1.65g/cm ³ , 絶乾密度:1.26g/cm ³ , 粗粒率:6.38, 最大寸法:15mm, 吸水率:30.8%)
PVA繊維	ポリビニルアルコール繊維(直径:660μm, 繊維長:30mm, ヤング係数23.0kN/mm ² , 引張強度:900N/mm ² , 切断伸度:9.0%)
混和剤	ナフタレン系高性能減水剤, 凝結調整剤

2.2 上面増厚 RC 試験体の載荷試験

昭和 48 年度の道路橋示方書に準拠し、RC 床版を設計し、この RC 試験体をベースとした。ベース試験体のコンクリート（既設部）には、レディーミクストコンクリート（普通 21-12-20N）を用いた。上面に PVA-LC2 を増厚する前に、既設部上面の WJ 処理工を行い、約 1 から 2 時間の乾燥後に上面増厚施工を人力により行った。RC 試験体の種類を表-3 に、RC 試験体の形状寸法と載荷状況（No.2, 5, 6）を図-1 に示す。なお、RC 試験体には確実に曲げ破壊が生じるようにスターラップ D10 を 200mm ピッチで配置した。主鉄筋には D13 (SD295A) を用い、降伏強度 375N/mm²、ヤング係数 200kN/mm²、引張強度 530N/mm²、伸び 27%であった。

RC 試験体毎の WJ 処理工終了後の増厚界面の状況を図-2 に示す。今回、増厚界面の表面処理方法として、ハンドガンを用いて、吐出圧力と吐出水量を適宜調整し、所定の深さまで処理することができる WJ 処理工を採用した。これは、切削時の振動が少ないためマイクロクラックの発生を抑制でき、全表面を対象とすることからブラスト処理の必要がなくなると考えたためである。また、広範囲な劣化箇所が存在したとしても短時間で処理することも可能となる。No.2 の処理には 2 穴回転ガンを用い、No.3~6 ではハンドガンを使用した。吐出圧力と吐出水量は No.2 では 150Mpa, 12 リットル/分, No.3~6 では 200MPa, 14 リットル/分とした。RC 試験体 No.5, No.6 は、既設部が比較的健全である通常の 10mm 程度のはつり深さとは異なり、土砂化などによる深い劣化が進行していることを想定し、上側鉄筋位置まで WJ 工法によるコンクリート除去を行ったものである。また、RC 試験体 No.2, 4, 6 の 3 体には、土木用高耐久型エポキシ系接着剤（コンクリート付着強さ 1.6N/mm² 以上または母材破壊を呈する）を用い、増厚界面に塗布しながら増厚部を施工することにより両者を確実に一体化させることを期待した。これら上面増厚した試験体と無補強の試験体の曲げ載荷試験を実施した。載荷は漸増単調載荷とし、載荷中にスパン中央たわみ、スパン中央位置の上側・下側鉄筋および上縁コンクリートのひずみを測定し、ひび割れ進展と破壊の状況を観察した。

表-3 RC 試験体の種類

ベース床版		上面増厚補強床版					No.1に対する 各試験体の重量比	
No.	床版厚(mm)	増厚施工	表面処理方法	接着剤	増厚量(mm)	床版厚(mm)		増厚材料
1	200	無	無	無	0	200	無	1.00
2		有	WJ表面処理(切削0mm)	有	40	240	LC2-PVA	1.16
3				無	50			1.15
4				有	50			1.11
5				無	86.5			
6				有	86.5			

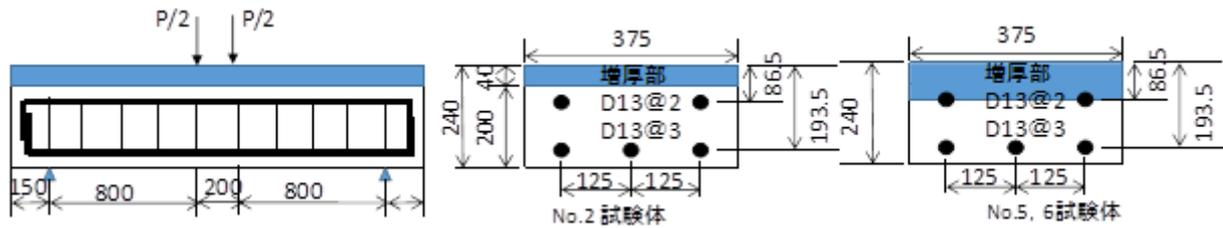


図-1 RC 試験体の形状寸法と載荷状況 (No.2, 5, 6)

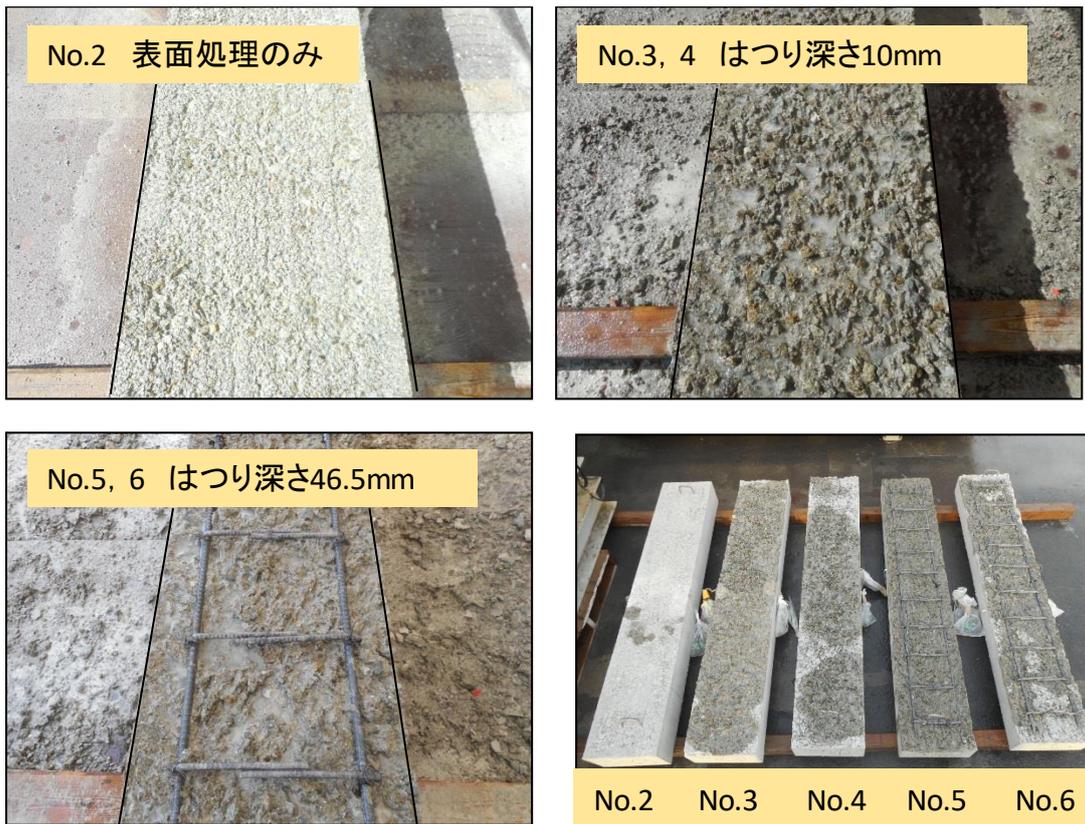


図-2 WJ 処理工終了後の増厚界面の状況

3. 配合試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状と3時間圧縮強度

表-1 に示した配合のフレッシュコンクリート試験の結果を表-4 に示す。硬化が促進する夏期配合の試験では、配合 No.1 ではスランプが 17.0cm と目標の 8cm に対して大きかったが、配合 No.2 では単位水量を $W=160\text{kg/m}^3$ とすることで目標スランプ $8.0\pm 2.5\text{cm}$ の範囲に入り、60 分後も施工可能であることを

確認した。硬化が遅延する冬期配合の試験である配合 No.3 では、単位水量は $W=160\text{kg/m}^3$ で夏期配合と同じとし、高性能減水剤の添加率を $C \times 0.8\%$ に減じることで、スランプ 10.0cm が得られた。RC 試験体の上面増厚コンクリートは、3月に No.4 の配合を用いて人力で施工したが、施工時間 60 分を確保できることを確認した。また、3 時間圧縮強度の試験結果を表-5 に示す。表より、今回実施した気温範囲の全ての配合において、3 時間の圧縮強度は目標値の 24N/mm^2 を満足していることがわかる。なお、施工実績から本研究では気温 5°C 以上での施工を想定している。

3.2 RC 試験体の載荷試験時のコンクリートの材料特性

載荷試験実施時の RC 試験体コンクリートの材料特性を表-6 に示す。載荷試験は増厚コンクリート打設後、28 日以降で実施していることから、PVA-LC2 は相当な高強度を示した。JCI-SF 規準による曲げ強度とせん断強度は PVA 繊維の混入により、普通コンクリートの圧縮強度から算出される各強度と同程度の値が確保されている。

表-4 フレッシュ試験の結果

試験日	配合 No.	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 ($^\circ\text{C}$)
6/22	1	17.0	3.3	27.0
7/23	2	8.0	2.7	32.9
12/25	3	10.0	3.2	13.6
3/27	4	8.5	3.5	17.6

表-5 3 時間圧縮強度試験の結果

試験日	配合 No.	養生開始時の気温 ($^\circ\text{C}$)	3時間圧縮強度 (N/mm^2)	単位容積質量 (kg/m^3)
6/22	1	27.0	28.0	1839
7/23	2	30.4	32.3	1832
12/25	3	13.0	30.6	1821
3/27	4	15.8	29.8	1804

表-6 載荷時の RC 試験体コンクリートの材料特性

使用箇所と種類	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	せん断強度 (N/mm^2)
既設部 普通コン	26.2	24.2	2.24	-	-
増厚部 軽量コン	58.4	19.4	-	3.90	8.75

4. RC 試験体の載荷試験結果および考察

4.1 荷重とスパン中央たわみの関係

荷重たわみ曲線を図-3、図-4 に示す。荷重 $P=40\text{kN}$ までを表示した図-3 より、上面増厚試験体 No.2 の挙動がやや異なるものの No.2~6 の初期剛性は無補強試験体 No.1 に比べて大きくなっている。また、荷

重とたわみの関係が線形挙動でなくなった時点で曲げひび割れが発生したものと考えられ、曲げひび割れ発生荷重は上面増厚補強により明らかに大きくなっている。図-4 より、上面増厚試験体では、降伏荷重、最大荷重ともに大きく向上していることがわかる。なお、No.6 では、部材降伏後の中央たわみ 23mm 以降でのひずみ硬化現象が他の増厚試験体に比べて若干小さく最大荷重がやや小さくなったが、全体の曲げ挙動としては全ての増厚試験体で同様の曲げ挙動を示すものと考えられる。

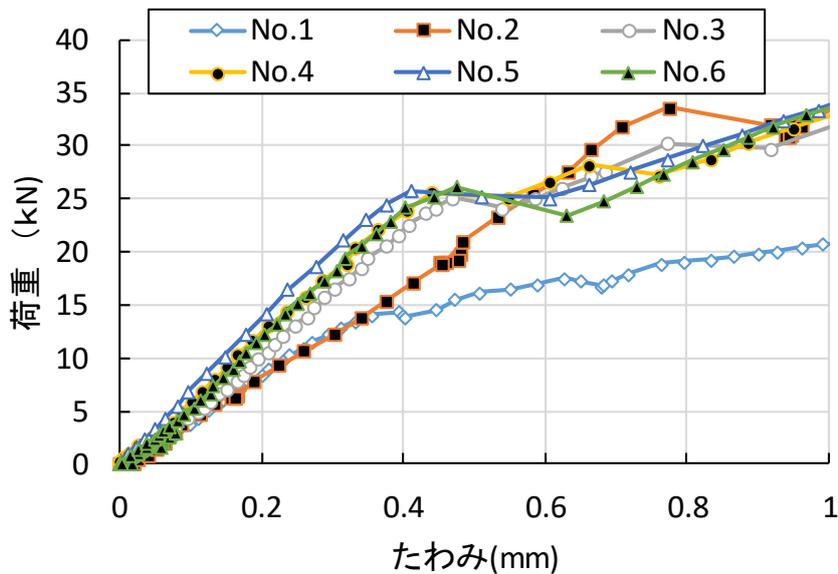


図-3 荷重たわみ曲線（初期）

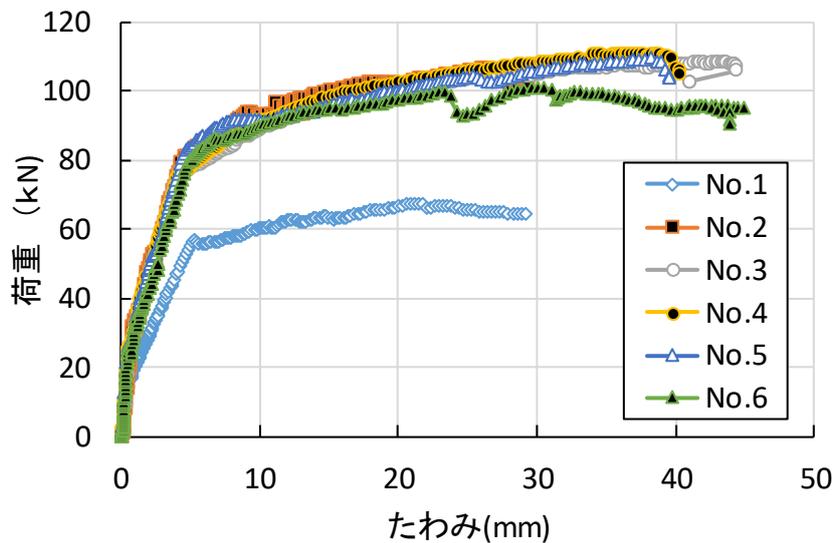


図-4 荷重たわみ曲線（全体）

4.2 荷重と鉄筋・上縁コンクリートひずみの関係

荷重と鉄筋・上縁コンクリートひずみの関係を図-5 に示す。図より、無補強の No.1 試験体では、下側鉄筋ひずみが曲げひび割れ発生後、荷重の増加に伴って大きくなり、降伏ひずみ (1875×10^{-6}) を超えていることがわかる。上側鉄筋ひずみも荷重の増加に伴い、引張側に転じて降伏した。その後、上縁のコ

ンクリートひずみが 3500×10^{-6} の終局ひずみに達した後に上縁コンクリートが圧壊し破壊に至る曲げ引張破壊を呈した。上面増厚試験体 No.2~6 も No.1 と同様のひずみ挙動を示したが、試験体 No.2, No.3, No.4 では、上側鉄筋ひずみの値は降伏ひずみ手前で伸びが止まっているのが確認できる。試験体 No.5, No.6 は、上側鉄筋も引張降伏していることがわかる。今回、鉄筋ひずみはスパン中央位置のみで測定したためひび割れ発生位置の影響などを受け、このような差異が生じたものと思われる。実際の破壊性状からも、曲げひび割れは増厚部まで進展しており、試験体 No.2, No.3, No.4 においても上側鉄筋は引張降伏していたものと考えられる。RC 試験体の載荷試験終了後のひび割れと破壊の状況を図-6 に示す。全ての試験体で斜めひび割れは発生せずに曲げ引張破壊を呈し、試験体 No.2 から No.6 では、曲げひび割れは増厚部まで進展し、上縁コンクリートに圧壊が生じた。

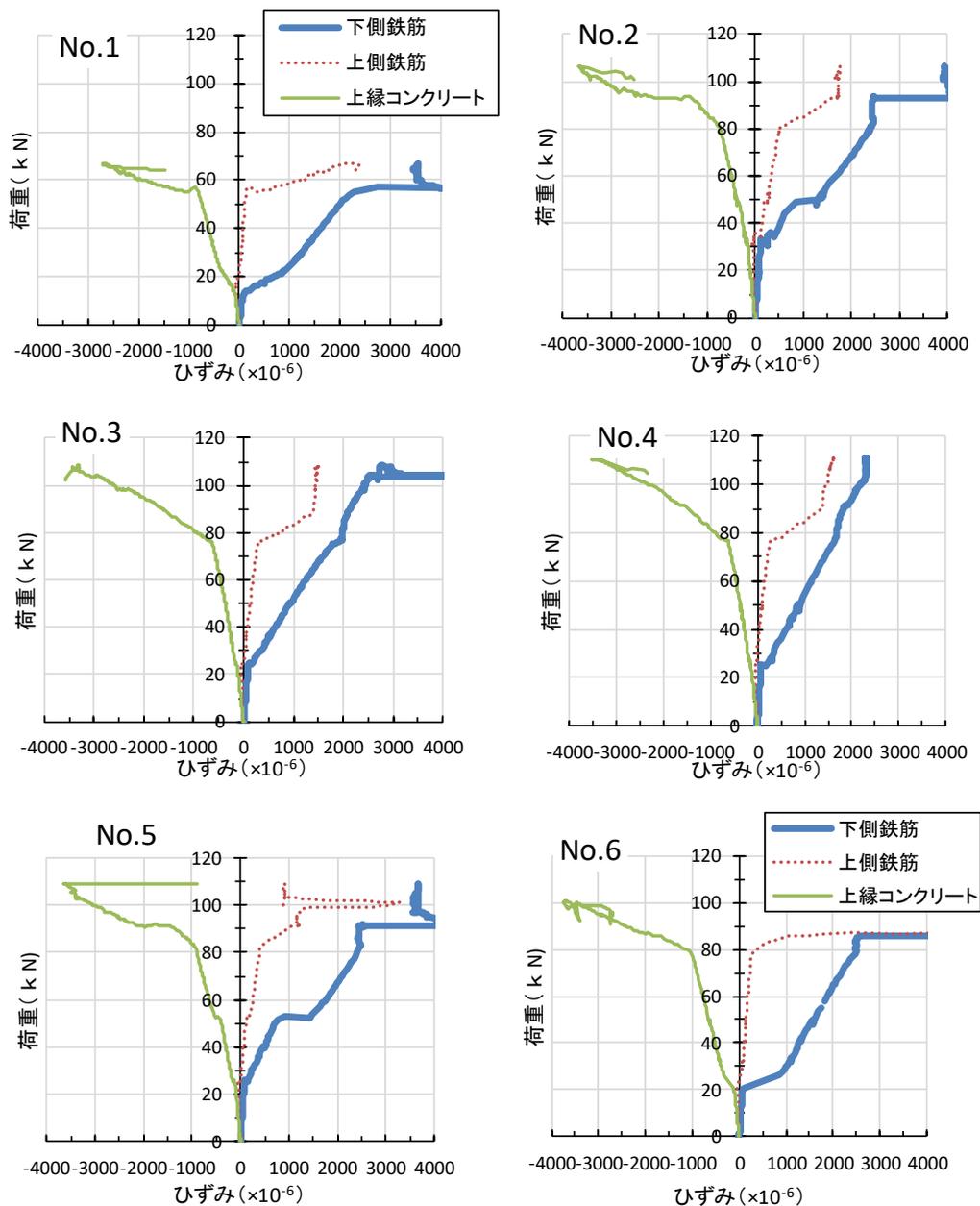


図-5 荷重と鉄筋・上縁コンクリートひずみの関係

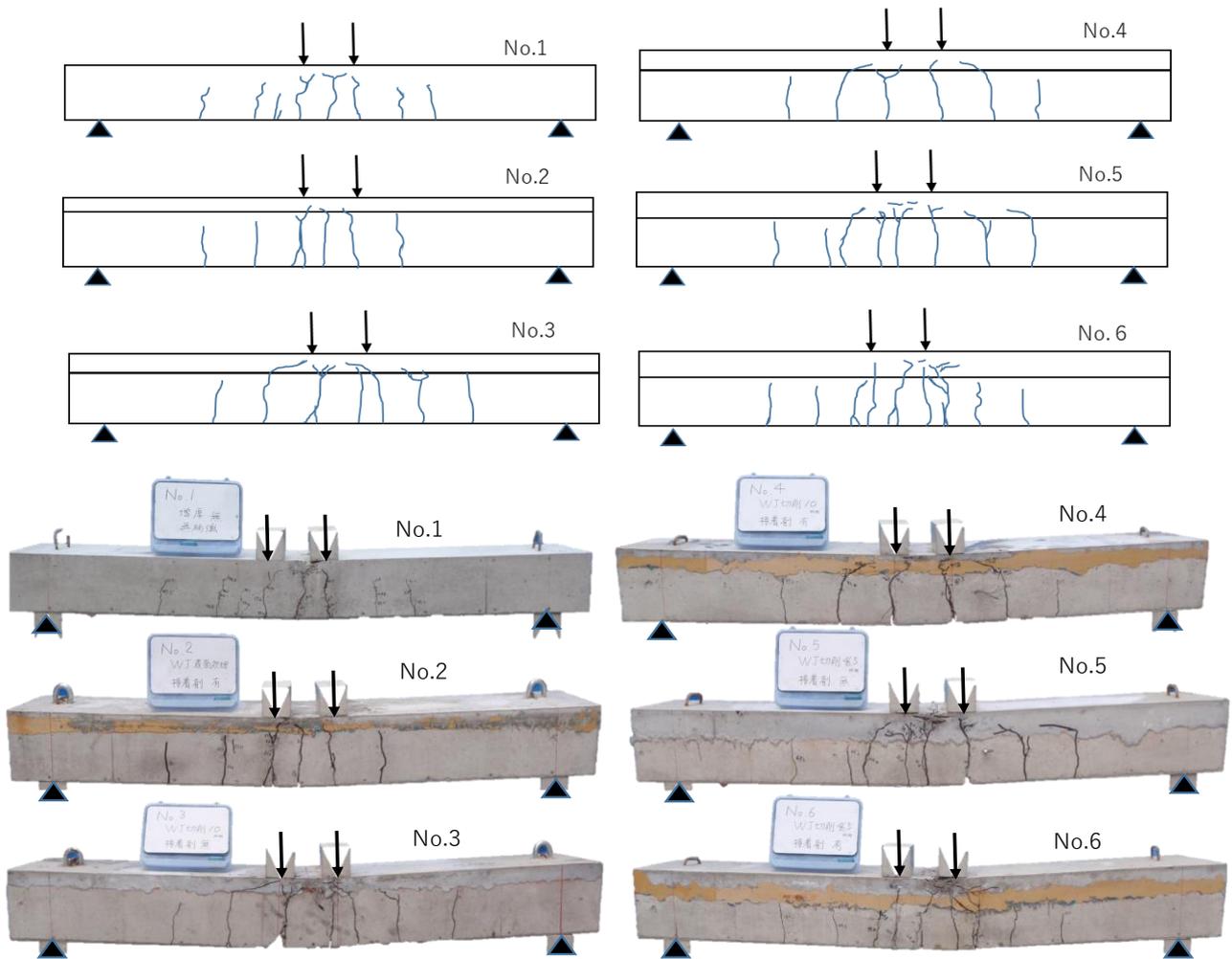


図-6 RC 試験体の荷重試験終了後のひび割れと破壊の状況（上：スケッチ，下：写真）

4.3 降伏耐力および曲げ耐力

RC 試験体の荷重試験結果を降伏耐力，曲げ耐力の計算値とあわせ表-7 に示す．ここで，降伏荷重の実験値は，下側 3 本の主鉄筋のいずれかが降伏ひずみ (1850×10^{-6}) に達したときの荷重とした．降伏荷重の計算値は，コンクリートの引張抵抗を無視した一般的な RC 弾性計算（コンクリート構造における弾性計算）により算定した．ただし，中立軸深さを算定する際，圧縮域の既設部と増厚部は一体化しているものとし，既設部の普通コンクリートと増厚部の PVA-LC2 の 2 種類のヤング係数を考慮して求めた．結果として，増厚量（厚さ）の異なる RC 試験体 No.2，と No.3, 4，および No.5, 6 で中立軸深さはほとんど変わらず，降伏荷重の計算値は，ほぼ同じ値となった．また，終局荷重の実験値は，曲げ破壊時の最大荷重であり，計算値は，土木学会コンクリート標準示方書に準拠した等価応力ブロックを断面の圧縮力の算定に用い³⁾，中立軸は全て増厚部に位置していたため，PVA-LC2 の試験時の圧縮強度により算出した．また，前節 4.2 で考察したように，全ての試験体で下側鉄筋が降伏した後に上側鉄筋も引張降伏し，最終的に圧縮縁のコンクリートが圧壊する曲げ引張破壊を呈した．この破壊状況を踏まえて曲げ耐力の計算を実施した．

表-7 より，降伏荷重（降伏耐力）と終局荷重（曲げ耐力）の計算値と実験値を比較する．降伏荷重は，試験体幅が 375mm あり，支間中央点の主鉄筋に添付したゲージにより判断したため，その実験値の計算値に対する比（以下， $P_{y.exp}/P_{y.cal}$ ）が試験体間で 0.78 から 1.18 とややばらついているが， $P_{y.exp}/P_{y.cal}$

が 0.94 の No.1 と 0.98 の No.3 の降伏荷重は、図-4 に示す荷重たわみ曲線の部材降伏荷重とほぼ一致している。鉄筋ゲージのひずみ値は、ひび割れの発生位置の影響を受けるため、このような範囲に $P_{y.exp} / P_{y.cal}$ が分布したが、降伏荷重は上面増厚することで無補強よりも向上し、その程度からは増厚量や接着剤の有無の影響を明確にすることはできないが、降伏荷重は RC 弾性計算により推定できるものと考えられる。なお、No.6 では $P_{y.exp} / P_{y.cal}$ が 0.78 と小さくなったのは、下側 3 本の主鉄筋ひずみのばらつきが大きかったためであり、全ての主鉄筋が降伏した時の荷重 $P_{y.exp}=69.8\text{kN}$ で計算すると 0.90 となった。終局荷重は、その実験値の計算値に対する比（以下、 $P_{u.exp} / P_{u.cal}$ ）は、無補強 No.1 で 1.17、上面増厚補強 No.2 から No.6 で 1.18 から 1.29 であり、終局荷重は等価応力ブロックによる計算で推定でき、このことは、既設部と増厚部が一体化しているという仮定が正しいことを示唆している。

以上より、曲げ挙動と降伏荷重・終局荷重を荷重たわみ曲線と計算値との比較で考察してきたが、PVA-LC2 による上面増厚による曲げ補強効果は、降伏荷重、終局荷重から確認でき、増厚界面の一体性も確保できているものと考えられる。増厚量や接着剤の有無の違いは、ほとんど認められなかった。ただし、試験体 No.2 のように WJ 工法によるコンクリート除去ではなく表面処理のみを行った場合でも接着剤使用の効果が確認できた。

表-7 RC 試験体の載荷試験結果（降伏耐力、曲げ耐力）

試験体 No.	降伏荷重 (kN)			終局(最大)荷重(kN)		
	①実験値	②計算値	①/②	③実験値	④計算値	③/④
1	47.6	50.6	0.94	67.1	57.3	1.17
2	66.2	77.9	0.85	106.2	85.7	1.24
3	76.4	77.6	0.98	108.4	85.7	1.26
4	91.4	77.6	1.18	110.9	85.7	1.29
5	62.8	77.5	0.81	109.2	85.7	1.27
6	60.6	77.5	0.78	100.9	85.7	1.18

4.4 使用状態の鉄筋ひずみと断面のひずみ分布

現行の道路橋示方書より求めた設計曲げモーメント作用時（荷重 $P=22.3\text{kN}$ ）の下側鉄筋のひずみと実験時の曲げひび割れ発生荷重を表-8 に示す。昭和 48 年の道路橋示方書で設計した試験体 No.1 の設計曲げモーメント作用時の実験ひずみは、鉄筋の許容引張応力 120N/mm^2 に相当するひずみ 600×10^{-6} を超え、曲げひび割れが発生していることがわかる。一方、上面増厚した全ての試験体において、設計曲げモーメント作用時の実験ひずみは 100×10^{-6} 以下のひずみに収まっており、曲げひび割れ発生以下であることがわかる。図-3 の荷重たわみ曲線をもみても、上面増厚により初期剛性が大きくなっている。このことからヤング係数の小さい PVA-LC2 を使用しても、上面増厚することにより初期剛性が改善できることがわかった。降伏荷重（実験値）時の断面のひずみ分布を図-7 に示す。試験体 No.4 を除き、降伏時においても断面のひずみ分布は直線関係にあることがわかる。なお、No.4 については、No.3 とほぼ同じ荷重 $P=76.5\text{kN}$ でみると、直線分布しており、降伏時には既設部と増厚部は一体化していたと考えられる。また、中立軸深さも、No.6 試験体では 10mm 程度大きいですが、その他の試験体は、計算値とほぼ一致していた。以上より、降伏するまでの弾性領域の使用状態においては、増厚量や接着剤の有無の違いに関係なく、PVA-LC2 による上面増厚補強効果が確認された。

表-8 設計曲げモーメント作用時の下側鉄筋のひずみと実験時の曲げひび割れ発生荷重

床版 No.	下側鉄筋の引張ひずみ (P=22.3kN)	曲げひび割れ発生荷重の実験値 (kN)
1	807×10^{-6}	13.8
2	73×10^{-6}	31.8
3	85×10^{-6}	26.1
4	70×10^{-6}	25.6
5	76×10^{-6}	25.8
6	91×10^{-6}	26.1

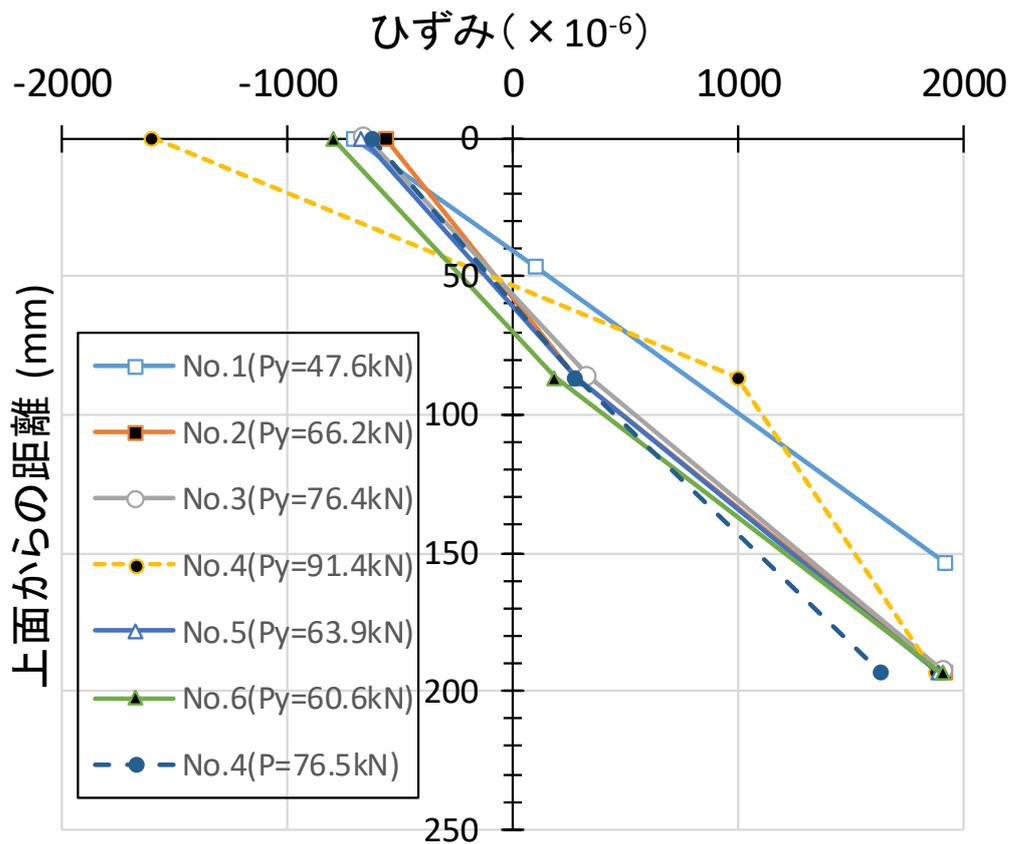


図-7 降伏荷重（実験値）時の断面のひずみ分布

5. まとめ

本研究では、水平ひび割れや貫通ひび割れは発生していない状態を想定し、土砂化が生じたケースとしては、上側鉄筋芯までを除去した試験体を用いて実験的に検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) PVA-LC2 は 60 分の施工時間と 3 時間圧縮強度 24N/mm^2 が確保できることが配合試験により確認された。
- (2) 曲げ挙動と降伏荷重・終局荷重を荷重たわみ曲線と計算値より検討した結果、PVA-LC2 による上面増厚により、降伏荷重、終局荷重は向上し、増厚界面の一体性も確保できているものと考えられる。なお、打継ぎ界面の処理深さ（増厚量）や接着剤塗布の有無の違いは、ほとんど認められなかった。
- (3) 鉄筋ひずみと荷重たわみ曲線による検討の結果、降伏するまでの弾性領域の使用状態においては、増厚量や接着剤の有無の違いに関係なく、PVA-LC2 による上面増厚補強効果が確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針，コンクリートライブラリー150，pp.59-89，2018.6
- 2) 長谷俊彦，田尻丈晴：ビニロン繊維補強コンクリートによる既設 RC 床版の上面打換え補強効果，構造工学論文集，Vol.63A，pp.1263-1272，2017.3
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕，pp.180-185，2018.3