

論文 3次元中空構造ガラス織物を埋設型枠として使用したRC梁の曲げ特性

前園 真一郎^{*1}・井上 真澄^{*2}・高木 宣章^{*3}・児島 孝之^{*3}

要旨: 厚さ約 10mm の 3 次元中空構造ガラス織物に膨張ペーストを充填してケミカルプレストレスを導入することにより, 約 70N/mm² の曲げ強度を有するプレートを製作することができる¹⁾。そこで本研究では, このプレートを埋設型枠へ適用することを目的として, その耐久性とプレートを埋設型枠として用いた RC 梁の静的曲げ試験を行い, その曲げ特性について検討を行った。その結果, プレートは埋設型枠として高い耐久性を有し, 後打ちコンクリートとの界面にケイ砂散布処理を施すこと¹⁾により, RC 梁の曲げ耐力および変形性状を向上させることが明らかになった。

キーワード: 3次元中空構造ガラス織物, 埋設型枠, 曲げ耐力, 変形性状

1. はじめに

近年土木構造物はスクラップ・アンド・ビルドの時代から, 既設構造物の維持管理時代になりつつある。2030年には補修すべき橋梁が, 戦後から1970年までに架設した橋梁に匹敵する2.5~5万橋になると予測されている²⁾。このような現状からコンクリート構造物の建設においては, 施工から維持管理, 更新までを含めたトータルコスト=ライフサイクルコストを低減することが求められている。建設業界ではラワン合板を型枠材として年間約1億枚使用しており, 型枠の早急な改善が望まれてきた。また, 海洋環境下における塩害をはじめとしたコンクリート構造物の早期劣化は深刻な問題であり, 耐久性向上技術の開発は重要な課題である。このような観点から埋設型枠は, 型枠内部コンクリートを外部劣化から防ぐことにより高耐久性を実現し, 脱型不要に伴う施工の省力化, そして地球環境保護の観点から資源を有効利用することができる。

本研究では, 3次元中空構造ガラス織物(以下 3D-GFRP と称す)を拘束体として用い, 膨張ペーストを充填しケミカルプレストレスを導入し

た薄型ケミカルプレストレスト板(以下, プレートと称す)を埋設型枠に適用することを目的として, その耐久性について実験的に検討を行った。更に, プレートによる RC 梁用埋設型枠の製作方法や埋設型枠を用いた RC 梁の静的曲げ試験を行い, その曲げ性状について検討を行った。

2. 3次元中空構造ガラス織物 (3D-GFRP)

図-1に 3D-GFRP の構造概念図を, 表-1に 3D-GFRP の力学的特性を示す。3D-GFRP はガラス繊維を使用して, 上下2層の高弾性変形平織布と 11.3×10⁴本/m²の垂直糸が, 一体的に織り上げられている。本研究では, このガラス織物に熱硬化性樹脂を含浸した厚さ約 10mm の超軽量, 高曲げ剛性, 中空構造といった特徴を有する 3D-GFRP に膨張ペーストを充填しプレートを製作した。

3. プレートの耐久性に関する検討

3.1 実験概要

プレートを埋設型枠としてコンクリート構造物に適用することを目的として, プレートの長期強度, 耐紫外線性, および遮塩性について検

*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (正会員)

*2 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修 (正会員)

*3 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

討を行った。

3.2 使用材料および配合

3D-GFRP の含浸樹脂には、ガラス繊維と相性が良く、作業性に優れるオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂(以下、UPE 樹脂と称す)と、耐アルカリ性に優れるビスフェノール系エポキシアクリレート樹脂(以下、VE 樹脂と称す)を使用した。膨張ペーストは、セメントに普通ポルトランドセメント(密度： 3.16g/cm^3)、シリカフュームにノルウェー産粉体(940-U、密度： 2.20g/cm^3 、比表面積 $20\text{m}^2/\text{g}$ 、平均粒径 $0.15\mu\text{m}$ 、 $\text{SiO}_2=91.3\%$)、膨張材に CSA 系(＃20、密度： 2.90g/cm^3)、骨材の代わりに石粉(密度： 2.70g/cm^3 、比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$)を、混和剤にはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。配合は、水結合材比 $[\text{W}/(\text{C}+\text{SF})]$ 50%、シリカフューム置換率 $[\text{SF}/(\text{C}+\text{SF})]$ 20%、単位膨張材量 $[\text{EP}]$ 300kg/m^3 とした。

遮塩性試験で使用したコンクリートは、セメントに普通ポルトランドセメント(密度： 3.16g/cm^3)、細骨材に野洲川産川砂(密度： 2.61g/cm^3 、 $\text{F.M.}=2.65$)、粗骨材に高槻産硬質砂岩砕石(密度： 2.68g/cm^3 、 $\text{F.M.}=6.89$ 、 $\text{MS}=20\text{mm}$)を使用した。設計基準強度は 27N/mm^2 とし、打設時の目標スランプは $7.5\pm 1\text{cm}$ 、空気量は $4\pm 1\%$ とした。

3.3 試験方法および供試体要因

(1) 長期強度試験

3D-GFRP はガラス繊維を使用しているためセメントペーストを注入した場合、アルカリ劣化による強度低下が危惧される。そこで本研究では、ガラス繊維の含浸樹脂として一般的に用いられる UPE 樹脂と耐アルカリ性に優れる VE 樹脂を使用して、含浸樹脂がプレートの長期曲げ強度に及ぼす影響について検討した。

図-2 にプレートの概要図を示す。膨張ペースト打設後、供試体は高湿恒温恒湿室($20\pm 1^\circ\text{C}$ 、 $90\pm 5\%\text{RH}$)で気中養生を行った。材齢10、28、91、180日でプレートを $75\times 10\times 300\text{mm}$ にダイヤモンドカッターで切断し、拘束解放の影響を

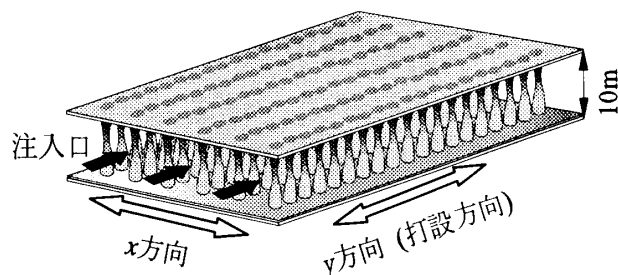
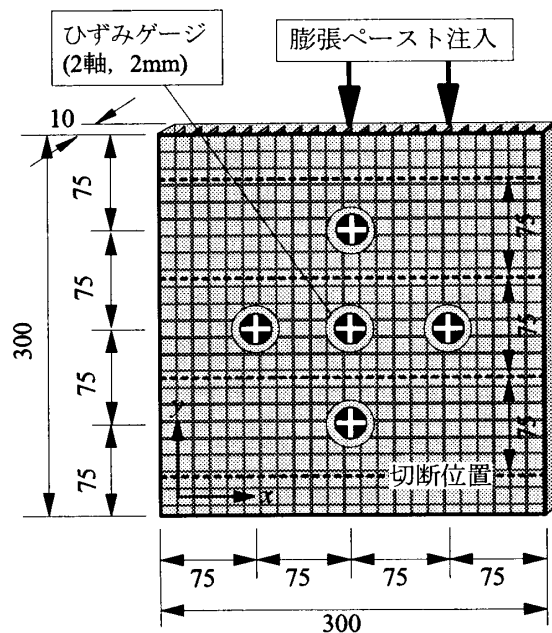


図-1 3次元中空構造ガラス織物(3D-GFRP)概念図

表-1 3D-GFRP の力学的特性

厚み (mm)		10
繊維目付量 (kg/m^2)		1.43
質量 (kg/m^3)		3.01
x 方向*	引張強度 (N/mm^2)	230
	弾性係数 (N/mm^2)	14×10^3
y 方向*	引張強度 (N/mm^2)	190
	弾性係数 (N/mm^2)	9×10^3

注)*：図-1 参照



注) ひずみゲージは両面に貼付

(単位:mm)

図-2 プレート概要図

考慮して³⁾、2時間以内に載荷試験を実施した。曲げ強度試験は、図-3 に示すようにスパン240mm、曲げスパン80mmの3等分点載荷とし、計測項目は支間中央のたわみ、供試体中央部における圧縮縁および引張縁ひずみとした。

(2) 耐紫外線性試験

埋設型枠は常に外部から日射を受ける環境下での供用が想定されるため、プレートの耐紫外線性を十分に把握する必要がある。そこで、プレートの拘束体である3D-GFRPを日射環境下に長期間暴露し、目視観察と膨張ペーストを充填したプレートの曲げ強度の経時変化から耐紫外線性を評価した。

試験は、UPE樹脂およびVE樹脂を含浸樹脂とした図-3に示す300×300×10mmの3D-GFRPを製作し、日射環境下において2, 4, 6ヵ月間暴露した。その後膨張ペースト充填後高湿恒温恒湿室で養生し、材齢10日で曲げ強度試験を行った。

(3) 遮塩性試験

高耐久性埋設型枠としては、海洋環境下における塩化物イオンの浸透を抑制する必要がある。そこで、プレートの遮塩性を確認するため、埋設型枠用プレートをコンクリート表層に埋設したP供試体と比較用としてコンクリートのみのN供試体を製作した。プレートには、VE樹脂を用いた3D-GFRPに膨張ペーストを充填したものを使用した。P供試体は、プレートで埋設型枠を製作し、後打ちコンクリートを打設した。2週間の散水養生後、コンクリート打設面に無溶剤型エポキシ樹脂塗料により表面被覆処理を施し、後打ちコンクリートを埋設型枠(3面)とエポキシ樹脂により完全密封状態とした。材齢28日で供試体を人工海水に2ヶ月間浸漬した後、供試体からコンクリートドリルによりコンクリート片を採取した。コンクリート表面(埋設型枠面)より深さ5～10mm毎にドリルによって試料を採取し、0.15mm以下の試料を製作した。

試験は、「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(JCI-SC5)」に準じ、風乾試料を蒸留水により希釈、煮沸、冷却した後に、市販の塩分計による簡易測定法により塩化物イオン量を測定した。

3.4 実験結果および考察

(1) 長期強度特性

図-4にプレートの曲げ強度の経時変化を示

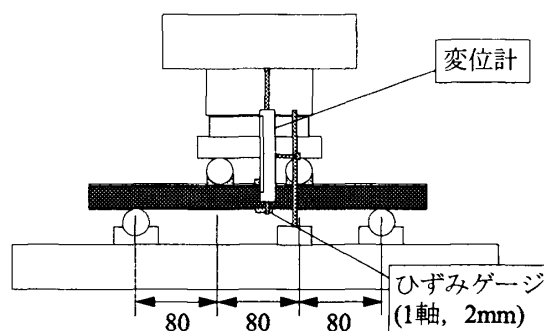


図-3 曲げ強度試験概要

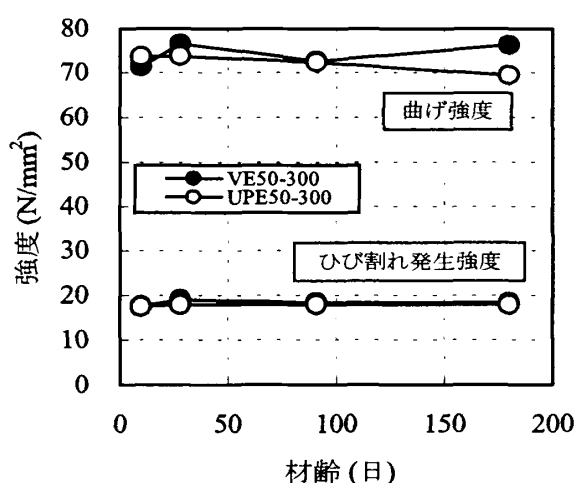


図-4 プレートの長期強度

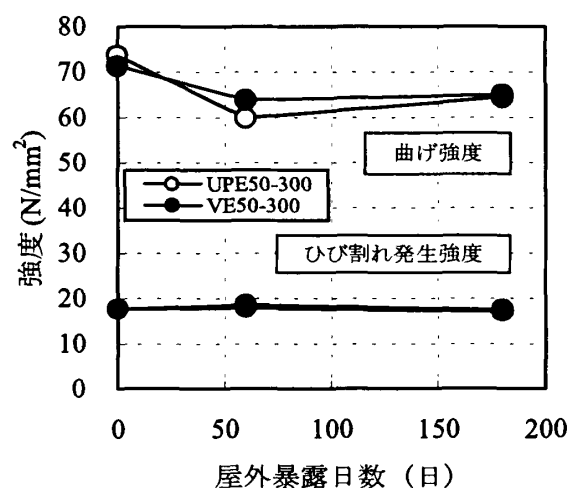


図-5 プレートの耐紫外線性

す。含浸樹脂の種類に関わらず、ひび割れ発生強度は材齢10日から大きく変化せず、材齢180日に至るまではほぼ一定値を示した。曲げ強度は、各供試体で幾分の変動はあるものの、強度低下は小さいことが確認できた。一般的にVE樹脂は耐アルカリ性に優れているが、UPE樹脂との明

確な曲げ強度の相違は観察されなかった。

(2) 耐紫外線性

図－5に曲げ強度と屋外暴露期間の関係を示す。ひび割れ発生強度は、屋外暴露期間に関わらずほぼ一定値を示した。一方、曲げ強度は、暴露期間60日において若干の強度低下を示したが、その後大きな変化は観察されなかった。

(3) 遮塩性

図－6に遮塩性試験結果を示す。コンクリートのみのN供試体は、供試体表面より塩化物イオンが浸入している。埋設型枠を配置したP供試体では、塩化物イオンの浸入量が極めて小さい。従って、3D-GFRPを用いた埋設型枠は優れた遮塩性を有すると考えられる。

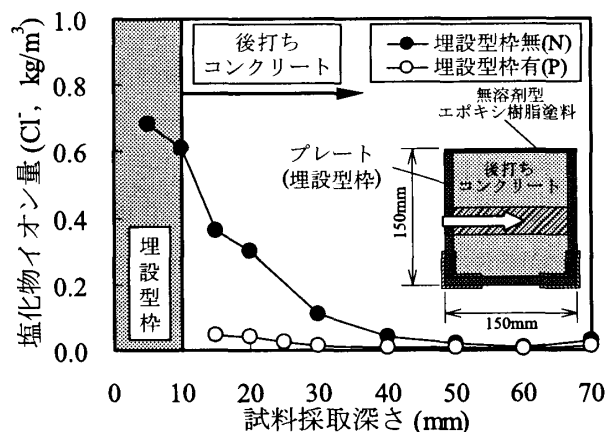
4. プレートを埋設型枠に適用したRC梁の曲げ性状

4.1 実験概要

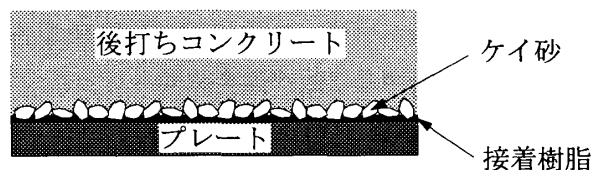
プレートを埋設型枠に適用したRC梁を製作し、その曲げ性状について実験的に検討を行った。プレートには、耐アルカリ性に優れるVE樹脂を含浸させた3D-GFRPを使用した。3D-GFRPに充填する膨張ペーストの配合は3.2節と同一とし、プレートと後打ちコンクリートとの界面には図－7に示す粒径2～3mmのケイ砂の散布処理を施した¹⁾。図－8に示すように、プレートを下面に配置したP-A供試体、プレートを下面と側面に配置したP-B供試体、比較用としてプレートをを用いないN供試体を製作した。

4.2 使用材料および配合

3D-GFRPに充填する膨張ペーストおよび後打ちコンクリートの使用材料は3.2節と同一とし、埋設型枠の接合部位には、ガラス繊維補強材としてガラスロービングクロスとガラスチョップストランドマットを使用した。後打ちコンクリートは設計基準強度を 27N/mm^2 とし、打設時の目標スランプは $7.5\pm 1\text{cm}$ 、空気量は $4\pm 1\%$ とした。表－2に後打ちコンクリートの力学的特性を示す。



図－6 プレートの遮塩性



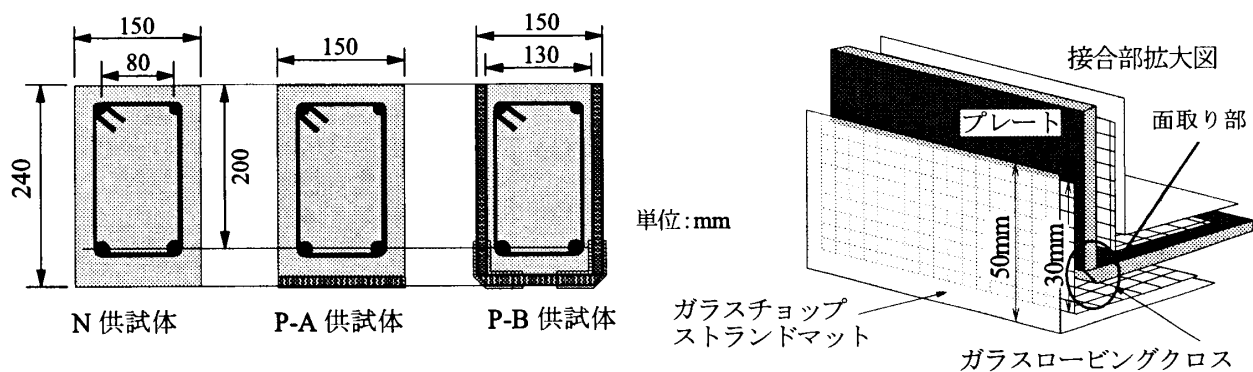
図－7 プレートと後打ちコンクリート間の界面処理

表－2 後打ちコンクリートの力学的特性

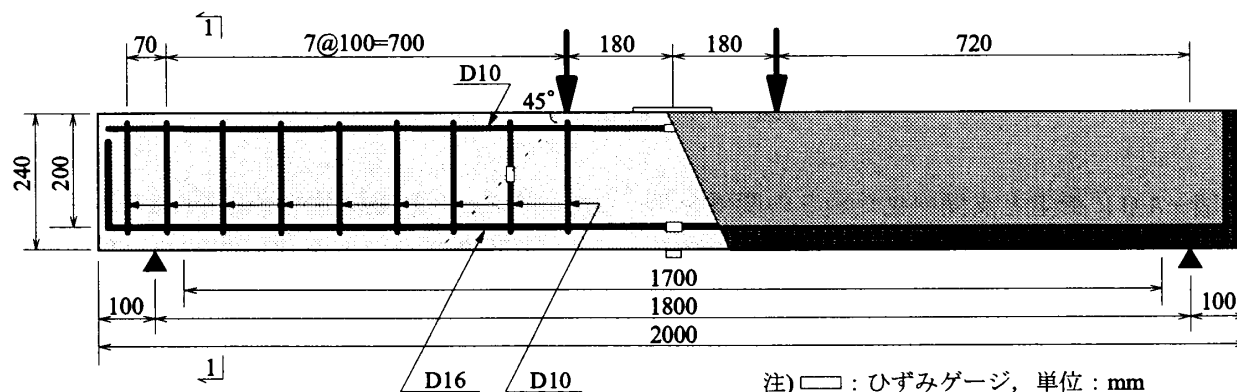
圧縮強度 (N/mm^2)	32.7
弾性係数 (N/mm^2)	28300
引張強度 (N/mm^2)	2.81
曲げ強度 (N/mm^2)	3.75

4.3 埋設型枠RC梁供試体の製作方法

3D-GFRPは上下2層の織物を連結したサンドイッチ構造を有するガラス織布であるため、矩形断面梁の埋設型枠を製作する際には底面型枠と側面型枠の接合部に補強が必要となる。そこでP-B供試体の埋設型枠は以下の手順で製作した。まず、所定の寸法に3D-GFRPを切断し、膨張ペーストを充填する。その後1日間養生室内($20\pm 1^\circ\text{C}$, $90\pm 5\%\text{RH}$)で保管後、図－8に示すように、型枠接合部の応力集中の緩和と補強材の接着作業性の改善を考慮して、型枠底面のコーナー部を面取りしたプレートを製作する。次にプレートを仮組みし、型枠内外面の接合部をガラスロービングクロス、ガラスチョップストランドマットの順にVE樹脂を含浸させながら接着補強した。その後、所定量のケイ砂(粒径2～3mm)を型枠内面にVE樹脂を用いて接着した。



図－８ 供試体タイプおよび接合面



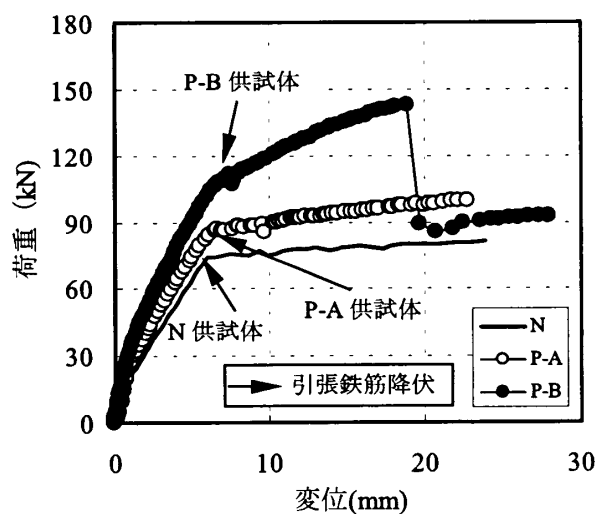
図－９ 埋設型枠RC梁供試体概要

表－３ 静的曲げ試験結果

供試体名	P_{σ} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)
N	17.2	74.0	87.0 (1.00)
P-A	24.5	86.7	99.7 (1.15)
P-B	35.1	108	142 (1.63)
供試体名	破壊形式		
N	曲げ破壊		
P-A	底面プレート破断→曲げ破壊		
P-B	底面プレート破断→曲げ破壊		

注) P_{σ} : 曲げひび割れ発生荷重, P_y : 降伏荷重

P_u : 最大荷重, (): N 供試体の耐力に対する比率



図－１０ 荷重と支間中央たわみ関係

図－９に埋設型枠RC梁供試体の概要図を示す。埋設型枠製作後、型枠内に鉄筋を配置し、コンクリートを打設した。引張鉄筋には、D16(SD345, $f_y=383\text{N/mm}^2$, $f_u=591\text{N/mm}^2$)を2本配置した。有効高さは200mm, 引張鉄筋比は1.32%とした。せん断破壊が先行しないように、スターラップにD10(SD345, $f_y=361\text{N/mm}^2$, $f_u=519\text{N/mm}^2$)を100mm間隔で配置した。

4.4 実験結果および考察

表－３に静的曲げ試験結果を示す。比較用の

N供試体は、引張鉄筋降伏後、曲げスパン圧縮部コンクリートが圧壊して終局に至った。プレートを埋設型枠に用いたP-A供試体およびP-B供試体はともに梁中央部底面のプレートが破断し、その後コンクリートが圧壊して終局に至った。終局に至るまで、プレートの剥離や接合補強部の損傷は観察されなかった。

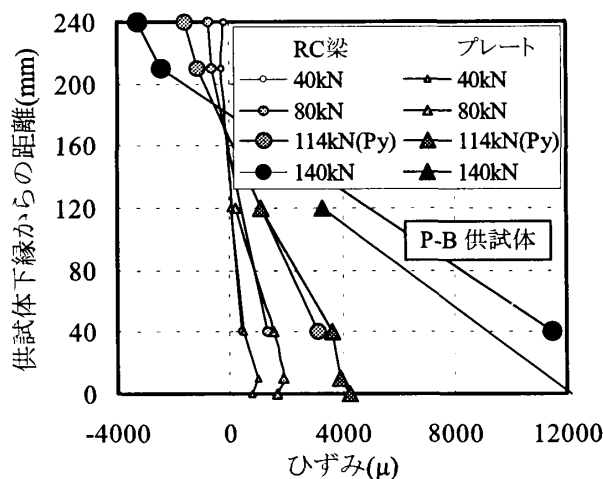
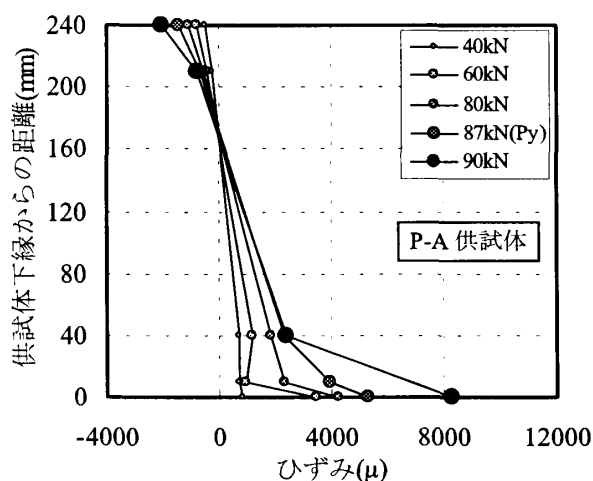


図-11 断面ひずみ分布

図-10に荷重と支間中央たわみの関係を示す。P-A供試体とP-B供試体はN供試体に比較して、曲げひび割れ発生荷重および降伏荷重が増加した。特に、埋設型枠を底面と側面に用いたP-B供試体は、引張鉄筋降伏後も荷重の増加が大きく、埋設型枠による曲げ補強効果が確認された。

図-11にP-A供試体とP-B供試体の断面ひずみ分布を示す。梁底面のみにプレートを埋設したP-A供試体は、引張鉄筋降伏前の荷重レベルからプレート面で若干のひずみ差が生じている。また、プレートとコンクリートの界面にはひび割れが観察された。一方、P-B供試体では、引張鉄筋降伏以降もプレートと後打ちコンクリート界面でのひずみ差が小さく、終局に至るまで一体となって挙動していることが確認できた。

5. 結論

本研究では、3D-GFRPを用いたプレートを埋設型枠へ適用することを目的として、その耐久性およびプレートを埋設型枠に適用したRC梁の曲げ性状について検討を行った。本研究より明らかになった点を以下に示す。

- (1) 3次元中空構造ガラス織物を使用した薄型プレートは耐紫外線性、遮塩性に対して優れた抵抗性を有しており、高耐久性埋設型枠としての適用の可能性を有する。

- (2) プレートを埋設型枠に適用したRC梁は、埋設型枠プレートをを用いていないRC梁に比較して曲げ剛性や耐力が増加し、曲げ補強材としてプレートの補強効果が認められた。

謝辞：本研究で使用した3次元中空構造ガラス織物は蝶理(株)より、ガラスロービングクロス、ガラスチョップストランドマットは、サカイ産業(株)より提供して頂いた。また、アイティシー(株)菅田豊氏、サカイ産業(株)酒井麓郎氏、東レ(株)鈴川研二氏には、本研究の遂行にあたり、貴重なご意見を頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)井上真澄, 前園真一郎, 諏訪 聡, 高木宣章, 児島孝之: 三次元中空構造ガラス織物を用いた埋設型枠用薄板の曲げ特性, 土木学会第57回年次学術講演概要集, V-337, pp.673-674, 2002.9
- 2)魚本健人: コンクリート構造物の劣化と診断士, コンクリート工学, Vol.39, No12, pp.3-7, 2001.12
- 3)国分正胤, 小林正凡, 長滝重義, 岡村 甫, 町田篤彦: 膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの標準試験方法に関する研究, 土木学会論文報告集, No.225, pp.93-99, 1965