

論文 MMA 樹脂を用いた炭素繊維シート補強による柱部材の耐震補強効果

舟川 勲*1・下野一行*2・浅井 肇*3・牛島 栄*4

要旨：炭素繊維シート補強の接着樹脂として一般に使用されているエポキシ樹脂に代わり、メチルメタクリレート (MMA) 系樹脂を適用した場合の炭素繊維シートの積層枚数による補強効果・変形性能を把握するため、柱部材の水平交番載荷試験を試みた。MMA 系樹脂を接着樹脂に用いた場合でも、エポキシ樹脂を用いた場合と概ね、同様なじん性能が得られ、補修・補強分野に適用可能と考えられる。

キーワード：炭素繊維シート, MMA 系樹脂, 補強効果, じん性

1. はじめに

軽量・高強度といった特徴を有する炭素繊維シートやアラミド繊維シートの柱部材へ補強材料としての利用は、施工性が容易である等に注目されて、コンクリート構造物の補修・補強分野への利用に関する研究開発が盛んに行われている。

本研究では、炭素繊維シート(以下CFSとする)の接着樹脂を、一般に使用されているエポキシ樹脂に代わり、低温硬化性、速硬化性を有するMMA系樹脂¹⁾を適用し、CFSの積層枚数による補強効果・変形性能を把握するため、柱部材の水平交番載荷試験を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状寸法および配筋図を図-1に、試験体諸元を表-1、鉄筋、CFSの材料特性を表-2および表-3に示す。試験体のせん断スパン比は全て約2.8とし、せん断補強鉄筋比は0.0793(%)とした。無補強試験体においてはせん断破壊先行型とし、CFSによる補強後は曲げ破壊モードとなるようにCFSの積層枚数を決定した。CFSの補強量は0.223, 0.445, 0.668%であり、

帯鉄筋比に換算するとそれぞれ、2.53, 5.07, 7.60%である。CFSによる補強区間は柱の基部から鉛直方向へ1650mmの高さの範囲とした。

2.2 載荷方法

載荷は一定軸力下(軸力比0.15)で、水平方向の正負交番繰り返し載荷とした。軸方向鉄筋が引張降伏した時点での載荷点位置の変位を、試験体の降伏変位 δ_y と定め、これを基準として整数倍の δ_y 毎に正負各3サイクル行うことを基本と

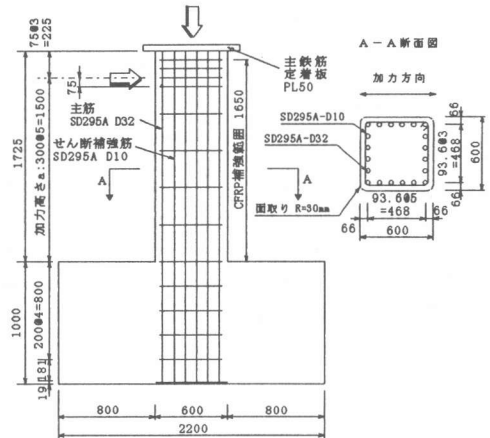


図-1 試験体形状および配筋図

*1 (株) 青木建設 研究所 材料研究室研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 構造物技術開発事業部 技師 工修 (正会員)

*3 三菱レイヨン (株) 機能製品技術統括室 担当部長 工修 (正会員)

*4 (株) 青木建設 研究所 材料研究室室長 工博 (正会員)

した。また、降伏荷重 P_y を下回る時点で実験を終了した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

No. 1 の無補強試験体は、主筋降伏前に斜めひび割れが進展し、せん断破壊に至った。

No. 2 試験体では $3 \delta y$ の 1 回目正方向載荷時に引張側面において CFS の繊維方向の破断が観察された。 $4 \delta y$ の 1 回目正方向載荷時より圧縮側基部のハラミ出しが起り、その後、 $6 \delta y$ の 1 回目正方向載荷時には引張側の基部より鉛直方向へ 30cm の区間においてラップ破断および隅角部より局所的に繊維方向の破断が多くなった。

No. 3 試験体では $3 \delta y$ の 1 回目正方向載荷時に引張側の隅角部より繊維方向に亀裂が入り、 $4 \delta y$ の 1 回目負方向載荷時には圧縮側基部付近のハラミ出しが始まった。 $6 \delta y$ の 3 回目負方向載荷時には引張側の隅角部より繊維

方向の破断が局所的に多くなり、 $7 \delta y$ の 2 回目負方向載荷時には柱基部付近における最上層の CFS の一部が剥離した。

No. 4 試験体では、 $3 \delta y$ の 1 回目正方向載荷時に引張側における繊維方向の破断が観察された。 $4 \delta y$ の 3 回目正方向載荷時より圧縮側基部のハラミ出しが始まり、 $6 \delta y$ の 2 回目正方向載荷時には引張側の隅角部より繊維方向の破断、また柱基部より鉛直方向へ 30cm の区間においてラップ破断が局所的に存在した。

No. 2~4 試験体共に、終局時における耐力低下

表-1 試験体諸元

試験体 No.	CFSシート補強枚数	CFSシート補強量 Pwcf (%)*	軸力比**	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	コンクリート引張強度 (N/mm ²)	コンクリート弾性係数 (kN/mm ²)
1	0	0	0.15	36.4	2.59	24.3
2	4	0.223	0.15	35.2	2.28	24.4
3	8	0.445	0.15	40.8	3.23	26.4
4	12	0.668	0.15	38.6	2.88	24.5

* Pwcf = $A_{cf} / (b_w \times S_{cf}) \times 100$, A_{cf} : 単位幅あたりの CFS の断面積, b_w : 腹部の幅, S_{cf} : CFS の単位幅

** 軸力比: コンクリートの圧縮強度に関する軸方向応力の比

表-2 鉄筋材料特性

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	摘要
SD295A D32	372	584	198	主鉄筋
SD295A D10	337	502	195	帯鉄筋

表-3 炭素繊維シート材料特性

設計厚さ (mm)	繊維目付量 (g/m ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
0.167	300	3834	222

表-4 実験結果一覧

試験体 No.	耐力 (kN)				変位 (mm)				曲げ・せん断耐力比		部材じん性率	
	降伏 P_y	平均	最大 P_{max}	平均	降伏 δ_y	平均	終局 δ_u	平均	$V_u \cdot a / M_u$	平均	μ	平均
1	-	-	522	-	-	-	17.44	-	-	-	-	-
2	正	991	1026	1156	1221	13.87	13.80	74.94	79.14	2.12	2.03	5.4
	負	1061		1287	1287	13.72	13.72	83.33	83.33	1.93		6.1
3	正	994	1037	1198	1249	12.99	12.61	97.48	88.53	3.69	3.57	7.5
	負	1079		1287	1287	12.23	12.23	79.58	79.58	3.46		6.5
4	正	994	1031	1198	1260	12.11	13.12	92.98	95.95	5.24	5.11	7.7
	負	1079		1300	1300	14.12	14.12	98.91	98.91	4.98		7.0

は柱基部付近のコンクリート部分の圧壊によるものと観察できた。

表-4 に実験結果の一覧を示す。表中の(正)は正負交番载荷の正方向载荷、(負)は負方向载荷である。表-4 における No. 2~4 の $V_u^{(2)}$ (せん断耐力) のコンクリート負担分は No. 1 無補強試験体の V_u ($P_{max}=522kN$) を基準とし、材料試験に

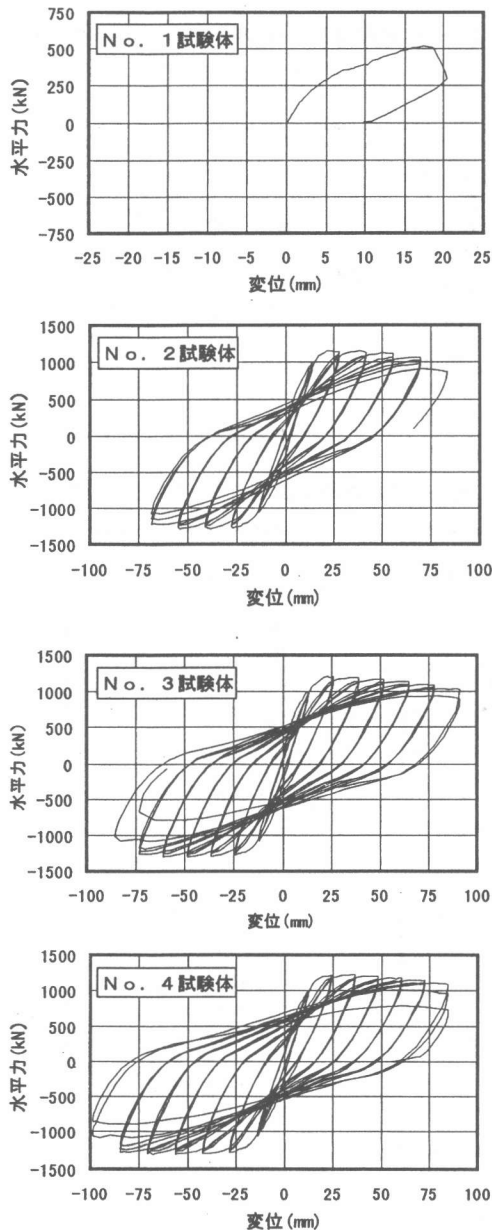


図-2 荷重-変位曲線

よって得られたそれぞれのコンクリート圧縮強度で補正したものである。ここで、荷重-変位曲線の包絡線が降伏荷重 P_y を下回る時点での変位を終局変位 δu とし、部材じん性率 μ は δy と δu との比 ($\mu = \delta u / \delta y$) から求めた。図-2 に各試験体の荷重と载荷点の変位の関係を、また荷重-変位の包絡線を図-3 に示す。図-3 より CFS 補強した試験体は、無補強の試験体と比較して変

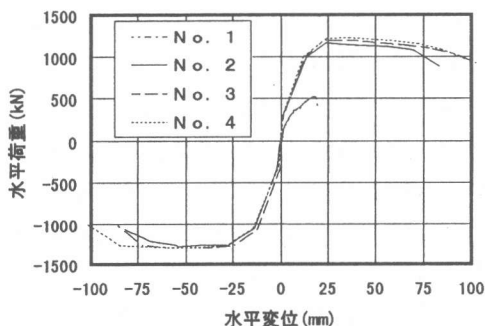


図-3 荷重-変位の包絡線群

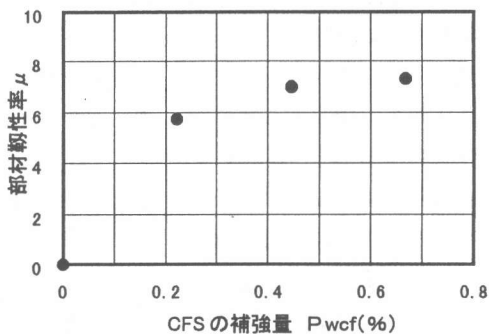


図-4 CFS 補強量と部材じん性率の関係

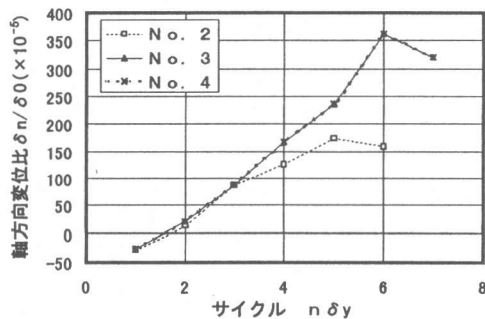


図-5 軸方向変形

形性能が大きく向上していることがわかる。また、**図-4**に CFS 補強量と部材じん性率の関係を示す。値は正側と負側の平均値を示す。この図より CFS 補強量の増加に伴い、変形性能は線形では増大しないことが確認された。

3.3 軸方向変形

図-5に各 δy における軸方向変形量を示す。ここで、軸方向変形は各 δy における軸方向変形量 δn (軸力導入前の鉛直方向の長さを基準とし、その時点からの伸び量) を柱基部から加力高さ $\delta 0$ ($L=1500\text{mm}$) で除したものである。グラフに示す軸方向変形の測定は各 1 回目のサイクル終了後、水平変位が 0mm に戻ったときの値である。各試験体とも変位が進行するに従って、軸方向変位比は大きくなっているが、終局変位付近では軸方向の変位は伸びから縮む方向へ移行していることがわかる。また、No. 2 試験体は No. 3, 4 試験体よりも早期に圧縮側部部のハラミ出しが始まっていたことより、炭素繊維シートの拘束効果は、軸方向変位量に影響を及ぼすと推測される。

3.4 補強効果の比較

無補強試験体 (No. 1) はせん断破壊先行型であったが、補強試験体 (No. 2~4) はいずれもじん性率が 5.0 以上になっており、CFS による十分な補強効果が得られた。また、エネルギー吸収能力の比較として、CFS 補強量と累積履歴吸収エネルギーの関係を **図-6**に示す。累積履歴吸収エネルギーとは、荷重-変位履歴曲線において 1 ループで囲まれた部分を履歴吸収エネルギーとし、各試験体のループごとに終局変位まで累加したものである。CFS 補強量が増加するに従って、累積履歴吸収エネルギーも増加しており、エネルギー吸収性能の観点から

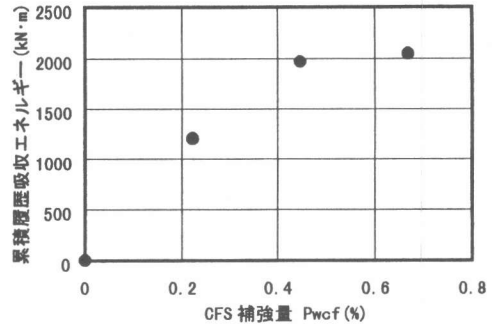


図-6 累積履歴吸収エネルギーと CFS 補強量

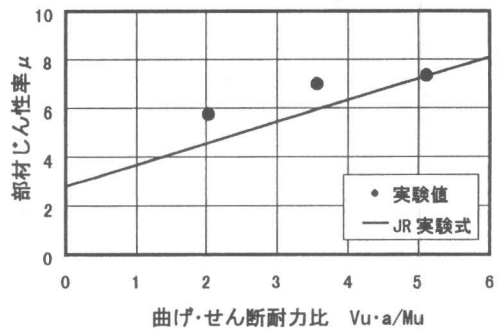
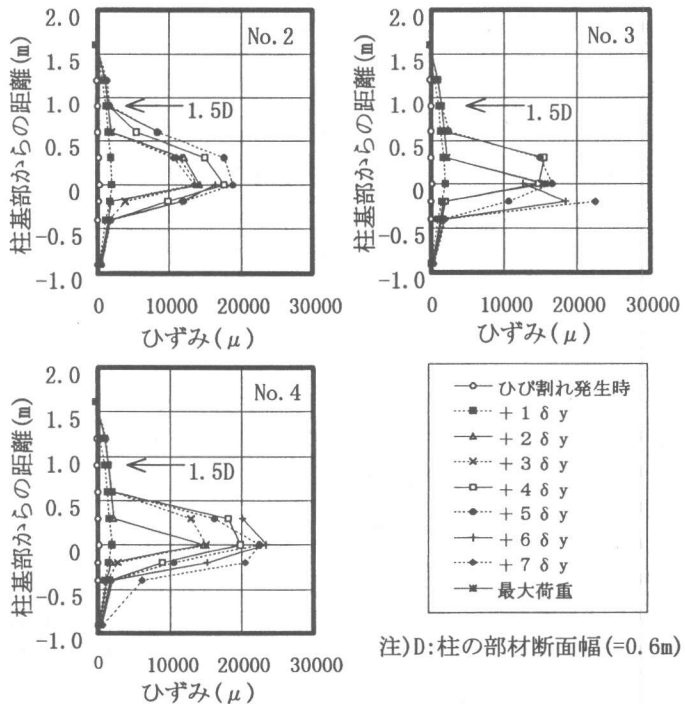


図-7 じん性率と曲げ・せん断耐力比の関係



注) D: 柱の部材断面幅 (=0.6m)

図-8 主筋のひずみ分布

も CFS による補強効果は期待できると考えられる。しかし、CFS の補強量 P_{wcf} が約 0.4 (%) 以上の範囲では、顕著な補強効果が得られない結果となった。この理由として、本実験において、これ以上の範囲では、試験体の耐力低下は炭素繊維シート の破断等によらず、柱基部付近のコンクリート部分の圧縮耐力により決定すると推測され、これにより CFS の補強効果が十分発揮されなかったと考えられる。

部材じん性率 μ および曲げ耐力とせん断耐力との比 ($V_u \cdot a / Mu$, V_u :せん断耐力²⁾³⁾, a :せん断スパン, Mu :曲げ耐力) の関係を図-7 に示す。図中における直線は、接着樹脂としてエポキシ樹脂を用いた既往の実験式²⁾ ($\mu = 2.8 + 0.88 \cdot [V_u \cdot a / Mu]$) であるが、MMA 樹脂を接着樹脂に用いた場合でも、概ね同様な傾向が得られ、RC 構造物への補修・補強分野に適用可能と考えられる。

3.5 ひずみ性状

引張側主鉄筋の鉛直方向のひずみ分布 (正加力) を図-8 示す。これらの図より変位が大きくなるに従い、ひずみ量が増加する範囲が上方へと進行していることがわかる。また、各試験体とも破壊に至るまで 1.5D より上方では主筋は降伏しておらず、本実験においてはひずみ量が顕著に増加する範囲は基部から 1.5D 以下の範囲になることが明らかとなった。

最大荷重時における帯鉄筋および CFS の鉛直方向のひずみ分布を図-9 に示す。無補強試験体 No. 1 において 0.6m に位置する帯鉄筋ひずみは最大荷重時には降伏ひずみ量を越えているが、CFS 補強した試験体は、降伏ひずみに達しなかった。また、CFS の補強量が増すことにより、CFS が負担するひずみ量が小さくなることが明らかとなった。

終局変位時における CFS の鉛直方向のひずみ

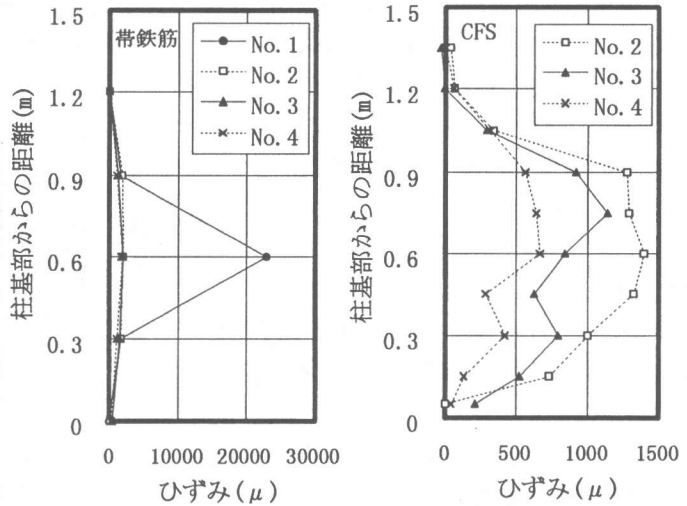


図-9 帯鉄筋および CFS ひずみ分布

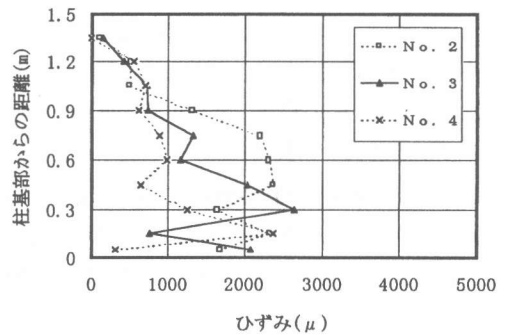


図-10 終局変位時における CFS ひずみ分布

分布を図-10 に示す。各試験体とも最大ひずみで約 2000~3000 μ のひずみが発生していた。

一方、CFS の破断ひずみは約 16000 μ であり、図-10 より全ての供試体において終局変位時まで繊維シートは破断強度に達することなく供試体が破壊したと考えられる。しかし、実験中の観察ではラップ破断や繊維破断箇所が局所的に存在していた。これは接着剤の脆弱部より局部的破壊が進行したためと思われる。

3.6 曲率分布

図-11 に主鉄筋のひずみから求めた正方向載荷時の曲率分布を示す。No. 2~4 の試験体においては、いずれも柱基部上方 1D~1.5D の範囲において曲率が大きくなっていることが伺える。また、

No. 1 無補強試験体の最大荷重は表-4 より 522kN であったが、この荷重レベル(No. 2~4 においては 2/6~3/6Pmax)での比較を行うと CFS 補強を施した試験体の曲率が小さいことがわかる。よって初期段階の剛性にも影響を及ぼしていることがわかる。

4. まとめ

炭素繊維シートの接着樹脂に MMA 系樹脂を適用し、柱部材の水平交番載荷試験により得られた知見を以下に示す。

(1)CFS 補強量を増加することにより、累積履歴吸収エネルギーも増加しており、エネルギー吸収性能の観点からも補強効果を期待できると考えられる。しかし、試験体の耐力低下は炭素繊維シートの破断等によらず、柱基部付近のコンクリート部分の圧縮耐力により決定すると推測され、これにより CFS の補強効果が顕著に得られない領域があると考えられる。

(2)MMA 系樹脂を接着樹脂に用いた場合でも、エポキシ樹脂を用いた場合と概ね、同様なじん性能が得られ、RC 構造物への補修・補強分野に適用可能と考えられる。

(3)引張側主鉄筋の鉛直方向のひずみ分布より、変位が大きくなるに従い、ひずみ量が増加する範囲が上方へと進行していることが確認された。また、各試験体とも破壊に至るまで 1.5D より上方では主筋は降伏しておらず、本実験においてはひずみ量が顕著に増加する範囲は基部から 1.5D 以下の範囲になることが明らかとなった。

参考文献

- 林 繁次, 青木敏一, 酒井芳文, 牛島 栄 : MMA 樹脂を用いた炭素繊維シートの材料特性・施工性の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 1249-1254, 1997. 6
- 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 鉄道総合技術研究所, 1996. 7

3) 鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 鉄道総合技術研究所, 丸善株式会社, 1992. 10

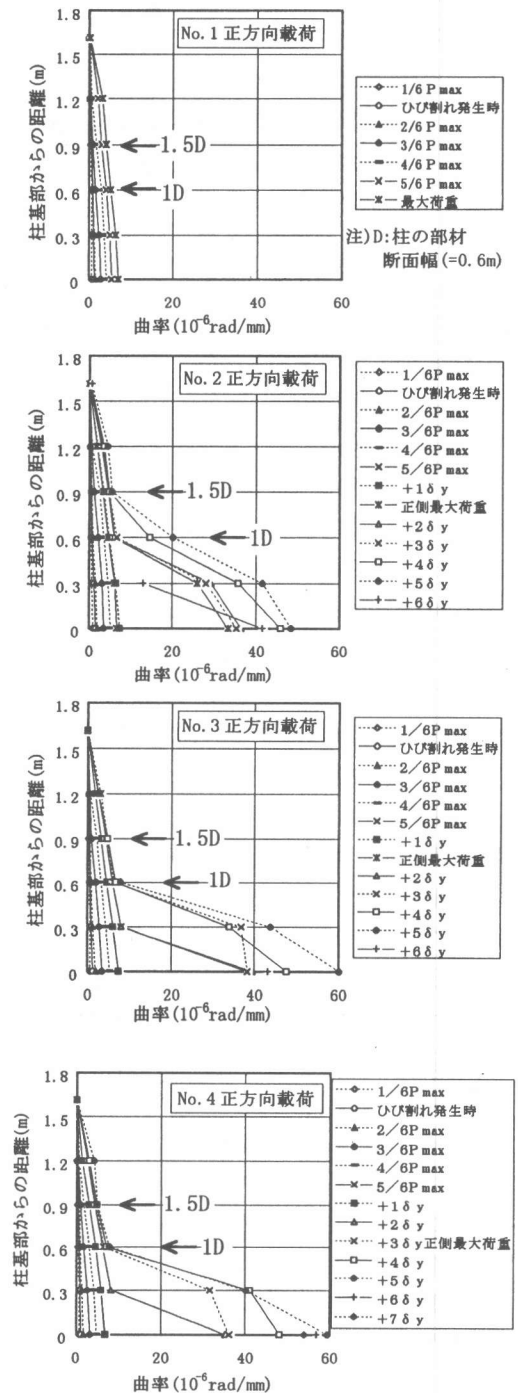


図-11 曲率分布