

論文 乾式吹付け工法により断面修復された RC 柱の耐震性能

宮内 克之^{*1}・黒石 吉孝^{*2}

要旨：断面修復された鉄筋コンクリート部材の場合，母材コンクリートと修復材との界面を有するため，地震動のような正負交番繰返し荷重の作用を受けると耐震性能が低下する恐れがある。そこで，ポリマーセメントモルタルを使用した乾式吹付け工法により断面修復された既存の鉄筋コンクリート柱を対象に，基本的な耐震性能の評価を行った。その結果，正負交番繰返し載荷による界面の割裂現象は観察されるものの，耐震性能は健全で無修復の場合と同程度確保されることが確認された。

キーワード：乾式吹付け，断面修復，耐震，RC 柱

1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート (RC) 構造物の断面修復工法としては，比較的狭い範囲の場合にはポリマーセメントモルタルのコテ塗りが，広範囲に及ぶ断面修復の場合には吹付け工法が採用されることが多い。このうち吹付けによる断面修復工法は，型枠が不要であること，規模の大きい断面修復に際して効率的，経済的であることから施工量が増加している。中でもポリマーセメントモルタルを使用した乾式吹付け工法は，粉塵やリバウンドの面で改良の余地はあるものの，小回りが利き施工性がよいこと，吹付け速度が速いため締固め効果が大きく母材との付着性が高いこと，したがって厚付けが可能なこと，また組織が緻密となり中性化が進行しにくいこと，有機系材料を使用していないため劣化しないなど優位な点が多く，今後使用の機会は増加するものと考えられる。しかし，断面修復された RC 部材の場合，母材コンクリートと修復材との界面を有するため，地震動のような正負交番繰返し荷重の作用を受けると耐震性能が低下する恐れがある。そこで本研究においては，ポリマーセメントモルタルを使用した乾式吹付け工法により断面修復された既存の RC 柱を対象

に，耐震性能の基本的な評価を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験は乾式吹付けポリマーセメントモルタル (以下，PCM) の強度特性の評価 (表-1) と RC 柱の正負交番繰返し載荷試験 (表-2) から構成されている。

PCM の強度特性の評価試験としては，圧縮強度試験，割裂強度試験，母材との付着強度試験，母材との界面割裂強度試験，吹付けを 2 層に分けて行った場合の層間での一体性を評価するための層間割裂強度試験，超高強力ポリエチレン繊維メッシュ (以下，HPM) を層間に配置した際の付着強度試験を行った。

表-1 実験計画：PCM の強度特性

試験の種類	試験体の直径	試験時材齢および養生条件
圧縮強度 割裂強度 弾性係数	φ 54	材齢 28 日 (標準水中) 柱試験時 (現場養生)
付着強度	φ 59	材齢 28 日 (現場養生) 柱試験時 (現場養生)
界面割裂強度 層間割裂強度	φ 104	
付着強度：HPM	φ 59	材齢 28 日 (現場養生)

*1 福山大学 工学部建設環境工学科教授 博士 (工) (正会員)

*2 (株) クリテック・ジャパン チーフエンジニア

柱試験体の形状寸法および断面の修復計画を図-1に示す。RC柱には軸方向鉄筋として6-D13、せん断補強筋としてD6-75mmの帯鉄筋を配置した。健全で無修復の試験体（以下、基準試験体）A1は耐力比が約2.5（曲げ耐力：102.0 kN，せん断耐力：41.5 kN）に設計されている。コンクリートには呼び強度24のレディーミクストコンクリートを用いた。鉄筋およびコンクリートの強度特性を表-3，4に示す。

断面修復は、二面修復および四面修復とした。二面修復の場合の修復面は引張圧縮面とし、母材コンクリートと修復材との界面位置の影響を検討するため、はつり深さを鉄筋裏面（47 mm）と鉄筋裏面+10 mm（57 mm）の2種類とした。四面修復の場合の修復面は鉄筋裏面+10 mm（57 mm）とした。

一般にRC柱の終局は、かぶりコンクリートの剥落時に対応すると考えられる。そこで、界面を有するRC柱のかぶりコンクリートの剥落を遅らせ、終局変位を大きくする目的で、高強度で伸び能力の高いHPMを配置した試験体に関しても実験を行った。使用したHPMの特性を表-5に示す。

2.2 試験体の作製

柱試験体は、材齢42日で電動ピックにより所

表-2 実験計画：正負交番繰返し載荷試験

試験体	断面修復の方法：はつり深さ；（吹付け厚）
A1	健全で無修復（基準試験体）
A2	二面修復：軸方向鉄筋裏面（47mm）
A3	二面修復：軸方向鉄筋裏面+10mm（57mm）
A4	四面修復：軸方向鉄筋裏面+10mm（57mm）
A5	四面修復：軸方向鉄筋裏面+10mm（30+27mm） 超高強度ポリエチレン繊維メッシュ配置

表-3 鉄筋の機械的特性

鉄筋種	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D13:SD345	358	531	187
D6:SD295	414	577	186

表-4 コンクリートの機械的特性

材齢	養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
28日	標準	33.1	3.06	29.2
128日 柱試験時	現場	26.2	2.19	25.4

表-5 HPMの特性

目合*1 (mm)	厚み (mm)	引張強力*2 (kN/5cm)	伸度*3 (%)
10	0.27	縦・横 1.36	縦・横 3.5

*1：メッシュの間隔

*2：5 cm 当りの引張最大荷重（JIS L1096）

*3：引張最大荷重時の伸び率（JIS L1096）

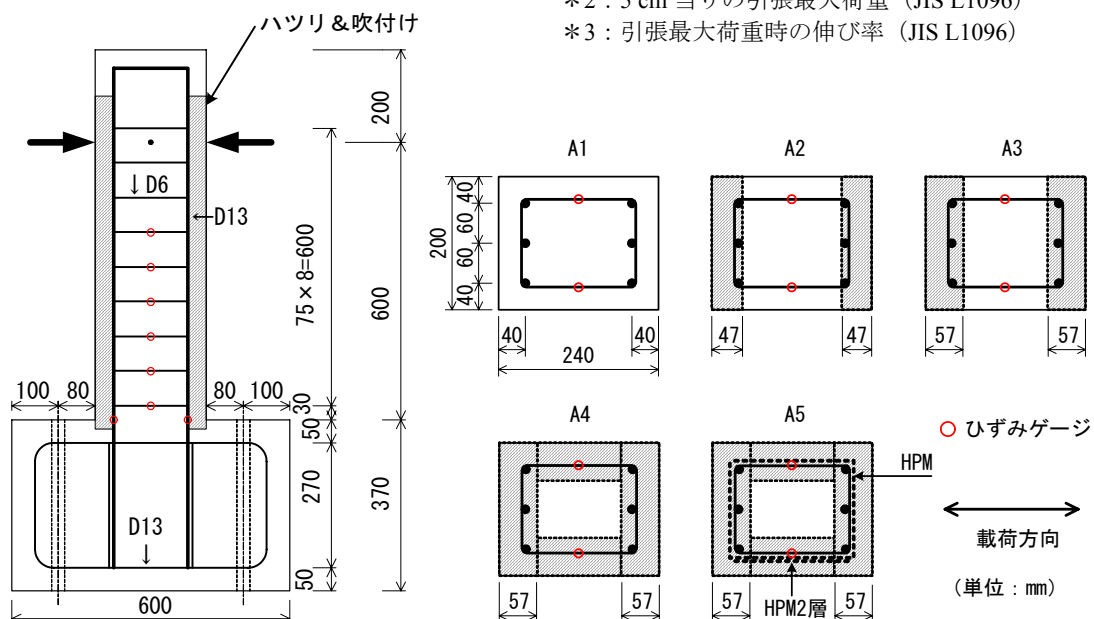


図-1 柱試験体の形状寸法および断面の修復計画

表－6 乾式吹付けモルタルの強度特性

材齢	養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	付着強度 (N/mm ²)	界面割裂強度 (N/mm ²)	層間割裂強度 (N/mm ²)
28日	標準	64.8	4.81	32.3	—	—	4.73
28日	現場	—	—	—	2.87	2.97	—
86日 (柱試験時)	現場	93.3	3.66	35.6	—	3.19	4.15

定の寸法まではつた後、ウォータージェット (以後、WJ) により約 400～500 気圧で目荒らしを行った。

はつり作業に続き、プレウェッティングを行った後、乾式モルタルを吹き付けた。吹付けを行った後直ちに所要の寸法に整形を行った。また、乾式モルタルの強度試験用、付着強度試験用、界面割裂強度試験用および層間割裂強度試験用の試験体も同時に作製した。

吹付けを終えた試験体は直ちに保水シートで覆い、乾燥するのを防止した。標準水中養生を施す試験体は、吹付け後 2 日で 20±2℃の水中養生を開始した。

HPM との付着試験用試験体は別途作製した。母材には RC 製 U 形側溝蓋 400×600×60 mm を使用し、WJ で目荒らしを行った後 PCM を 10 mm 厚で吹き付けた。吹付け直後に HPM を配置し、更に PCM を 30 mm 厚で吹き付けた。

3. 乾式吹付けモルタルの強度特性の評価

試験の結果を表－6 に示す。付着試験は建研式によって行った。付着試験における破断面は母材コンクリートであった。したがって、PCM の実際の付着強度は、表－6 の値 2.87 N/mm² よりも高いものと推察され、断面修復材として十分な付着強度を有していると思われる。

母材と PCM との界面割裂試験における破壊面は、界面から 1～2 mm 程度入った母材コンクリートで生じており、付着面での破壊は観察されなかった。割裂試験の結果より、柱試験時における割裂強度の大小関係は、母材の割裂強度 < 界面割裂強度 < PCM の割裂強度と考えられる。また、PCM を 2 層に分けて吹き付けた際の

表－7 PCM と HPM との付着特性

HPM の層数	無	1 層	2 層
付着強度 (N/mm ²)	2.85	2.45	1.51

層間の割裂強度は非常に高く、PCM 自体の割裂強度と同程度と考えられ、2 層に分けて吹き付けることの付着強度への影響はないものと思われる。

HPM との付着試験の結果を表－7 に示す。HPM を配置していない場合の破壊面は、母材コンクリートであり、HPM を配置した場合は 1、2 層の場合とも繊維面で破壊した。1 層の場合の付着強度は、無配置の場合の約 86% で、付着が十分確保されていることがわかる。しかし、2 層の場合には、明らかな付着強度の低下が見られた。

4. 正負交番繰返し試験

4.1 実験方法

軸方向鉄筋のひずみが降伏点ひずみ (降伏点強度/弾性係数) に達した時点の載荷点の変位 δ_y を基準に、 $\pm \delta_y$, $\pm 2 \delta_y$, $\pm 3 \delta_y$, … と順次変位を増加させながら、正負交番繰返し載荷を行った。同一変位での繰返し回数は 3 回とした。なお、軸力は載荷していない。試験中は載荷点の変位を変位計により、軸方向鉄筋、帯鉄筋のひずみを抵抗線式ひずみゲージによって測定した (図－1 参照)。また、柱部材の平均曲率の分布、界面剥離幅および軸方向鉄筋の基礎からの拔出し量を算定するための測定点を、柱部前面に 7 列 21 段、側面中央に 1 列 21 段いずれも 25 mm 間隔で配置した (写真－1 参照)。各測定点の変位を画像計測法^{1),2)}によって測定した。

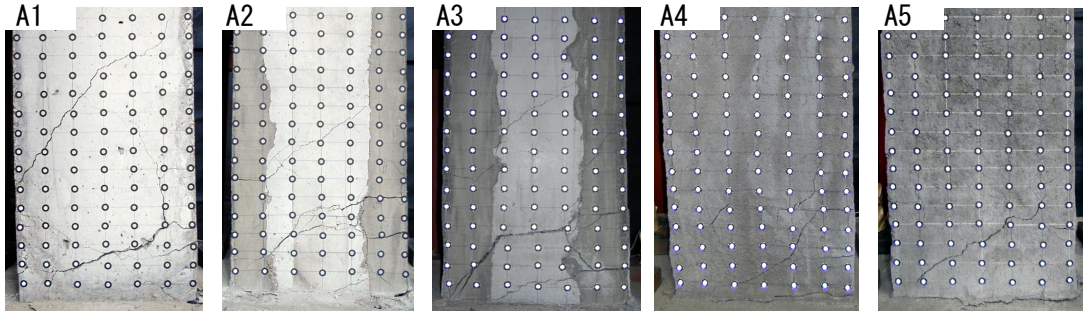


写真-1 ひび割れ状況 (6 δ_y 1回目正載荷時：写真左向きに載荷)

4.2 実験結果および考察

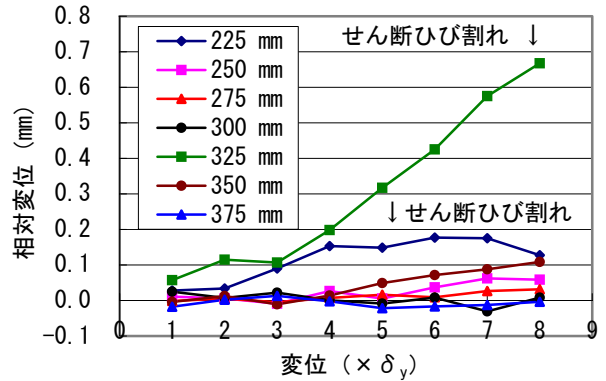
以下に示す結果および考察においては、画像計測法により求めた各測定点の三次元座標値を用いている。なお、画像計測法による各測定点の座標値の算定精度は、概ね $\sigma = 0.02 \sim 0.03$ mm 程度であった。

写真-1に、各試験体のひび割れの状況を示す。

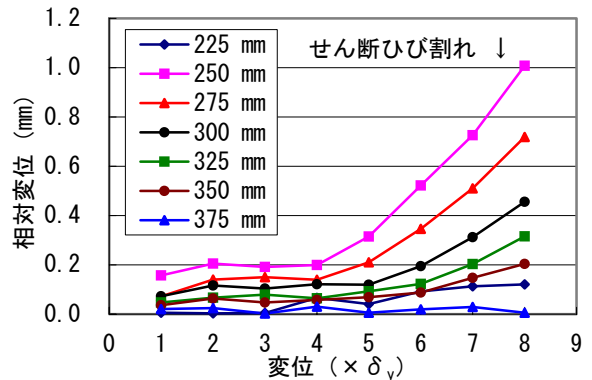
(1) 界面剥離状況

地震動のような正負交番繰返し載荷を受けると、修復材と母材コンクリートとの界面の剥離が懸念される。A1, A2, A3ともに基部から200 mm程度までの範囲で縦割れが確認された。A1は鉄筋位置での付着割裂によるもので、A2, A3は界面から1~2 mm母材コンクリートに入った面での割裂剥離であり、付着面での剥離は観察されなかった。

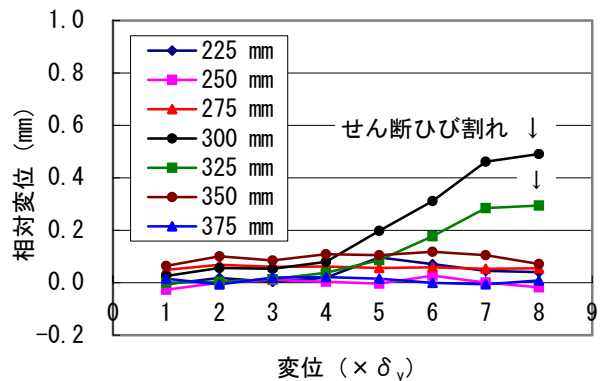
図-2は、基部から225~375 mmの範囲(2本目のせん断ひび割れの先端近傍)における修復材と母材コンクリートとの界面の剥離状況を、界面を挟む測定点の相対変位で示したものである。A1は界面を有しておらず、鉄筋位置でのせん断付着破壊が進行していないことがわかる。A2では、5 δ_y 以降250~350 mmの範囲で相対変位が大きくなっており、界面剥離が進行していることが推察される。しかし、この試験体の場合鉄筋裏面と界面とがほぼ同位置にあるため鉄筋面での割裂の影響が大きいものと考えられる。試験終了後の調査では界面より1~2 mm母材コンクリートに入った面での割裂であった。A3は、8 δ_y での繰返しを終了するまで相対変位の増加は見られず、界面剥離も付着割裂も生じ



(a) A1



(b) A2



(c) A3

図-2 界面の剥離状況
(基部から225~375 mm)

ていないものと思われる。これは、使用した修復材の付着強度および割裂強度が高いためと考えられる。

図-3は、HPM重ね部の剥離の程度を見るために、柱下部においてひび割れで囲まれた領域（断面中央、基礎から100mm）の測定点の面外方向への変位を示したものである。A5においては $7\delta_y$ 以降面外方向へのはらみ出しの傾向が見られる。HPM重ね部を想定した2層重ねに対する付着強度は表-7に示すとおり、1層の場合やPCMの付着強度に比べて小さく、HPM2層重ね部において吹付け材の付着切れが生じ、面外方向へはらみ出したものと考えられる。

(2) 曲率分布

図-4に試験体A1, A2, A3の $3\delta_y$ の1回目正載荷時における平均曲率の分布を示す。基準試験体A1の塑性ヒンジ長100mmと比較して、断面修復を施した試験体では、塑性ヒンジ長が多少長くなる(A2:150mm, A3:125mm)傾向にあることがわかる。この傾向は、 $6\delta_y$ まで同様であった。

四面修復した場合の平均曲率の分布を図-5に示す。四面修復した場合も塑性ヒンジ長が多少長くなる傾向にあった。A4では、曲げひび割れ発生位置に曲げ変形が集中する傾向にあったが、HPMを配置した試験体A5では、応力が分散されるためA4と比べると曲率分布が滑らかになる傾向にあった。

(3) せん断変形の割合

界面の剥離が進行すると、変形に対する影響は曲げ変形よりもせん断変形に著しく現れるものと思われる。そこで、全変形量に占めるせん断変形量の割合の変化を図-6に示す。せん断変形量 δ_s は次式により求めた。

$$\delta_s = \delta - \delta_b - \delta_r \quad (1)$$

ここに、 δ ：全変形量、 δ_b ：平均曲率を柱高さ方向に積分して求めた曲げ変形量、 δ_r ：軸方向鉄筋の基礎からの抜出しに伴う柱部の剛体回転による載荷点での変形量である。

図-6より、A1, A2, A3試験体とも $4\delta_y$ 以降

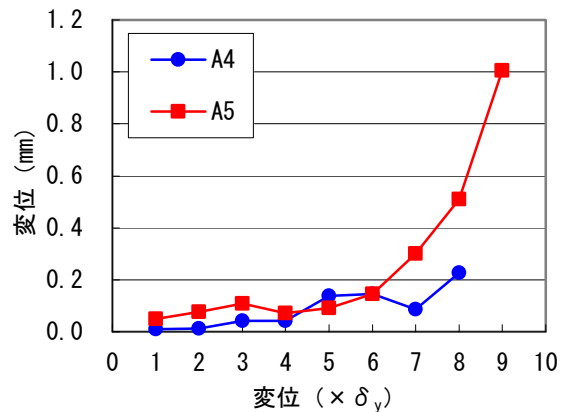


図-3 面外方向への剥離状況

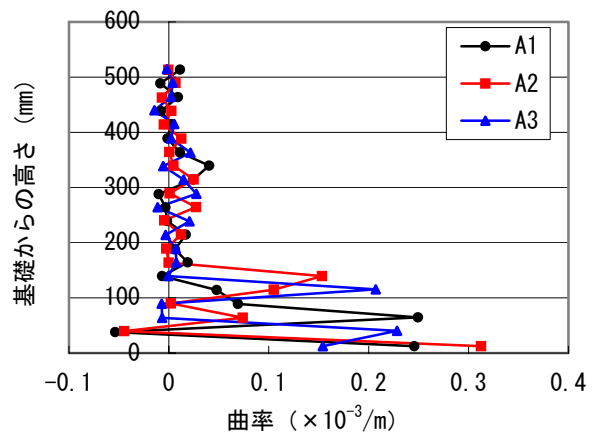


図-4 平均曲率の分布 ($3\delta_y$ 1回目正載荷)

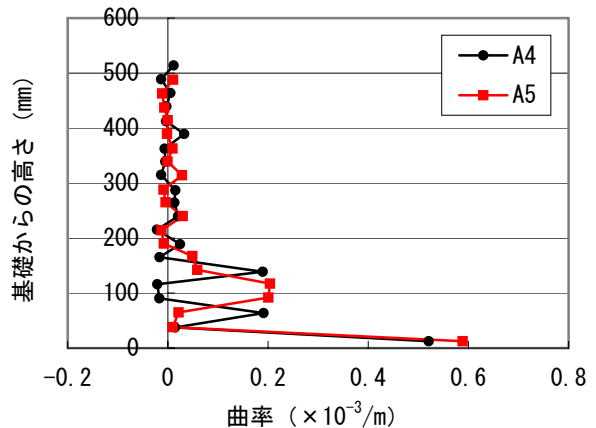


図-5 平均曲率の分布 ($5\delta_y$ 1回目正載荷)

せん断変形量の占める割合が徐々に増加し、最終的には3~5割程度に達している。しかし、断面修復を行ったことの影響は無いようである。

HPMを配置した試験体A5では、繊維がせん断補強筋としての役目を果たすため、 $7\delta_y$ まで

A4 試験体に比較して明らかにせん断変形量の占める割合が小さく、HPM を配置することの効果が見られる。

(4) 等価減衰定数

図-7 に各試験体の等価減衰定数を示す。二面修復した試験体の等価減衰定数は、基準試験体に比べて幾分大きくなっており、界面を有することの影響は無いようである。

四面修復した試験体は、基準試験体に比べて $2\delta_y$ 以降等価減衰定数が若干大きくなった。これは、乾式吹付けモルタルの強度が高く、せん断耐力が向上したことによるものと考えられる。 $6\delta_y$ 以降の大変形域においては、等価減衰定数は低下したが、基準試験体と同程度以上であった。四面修復し、HPM を配置した試験体は、大変形域における等価減衰定数の低下が A4 よりも緩やかであり、HPM を配置することの効果が見られた。

5. 結論

ポリマーセメントモルタルを使用した乾式吹付け工法によって断面修復を施した RC 柱試験体に関して、耐震性について実験的に検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 断面修復を施した試験体では、正負交番繰返し载荷に伴う界面の割裂剥離は発生するものの、剥離面は付着面近傍の母材コンクリートであり、付着面での剥離は観察されなかった。
- (2) 断面修復を施した試験体では、健全で無修復の試験体と比較して塑性ヒンジ長が多少長くなる傾向にある。
- (3) せん断変形量の占める割合および等価減衰定数で見ると、断面修復を行ったことの耐震性への影響は無く、健全で無修復の場合と同程度の耐震性が確保されることが確認された。
- (4) 超高強度ポリエチレン繊維メッシュを配置した試験体は、大変形域における等価減衰

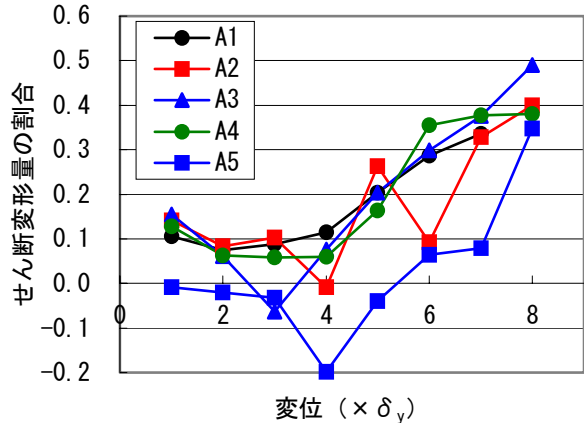


図-6 せん断変形量の割合の変化

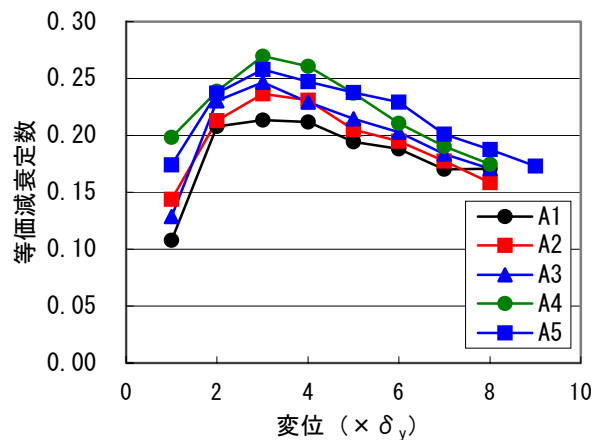


図-7 等価減衰定数の変化

定数の低下が無配置の試験体よりも緩やかであり、超高強度ポリエチレン繊維メッシュを配置することの効果が見られた。

謝辞 本研究で使用した超高強度ポリエチレン繊維メッシュは東洋紡績(株)よりご提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮内克之ほか：画像計測法を用いた RC はりの変形特性の測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.913-918，2004.7
- 2) 宮内克之，秋本圭一：画像計測法を用いた RC 柱の変形特性の測定，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-415，pp.829-830，2003.9