

論文 仕切り壁を有する鉄道高架橋への連続繊維シートによる耐震補強

曾我部 直樹^{*1}・吉田 幸司^{*2}・工藤 利昭^{*3}・関 雅樹^{*4}

要旨: 高架下建物利用のある鉄道高架橋の耐震補強では、コンクリートブロック壁等の仕切り壁により、施工が容易でない事例が多い。本研究では、既存の仕切り壁の片面を補強して高架橋全体のせん断耐力を向上させる耐震補強法について、壁の要素試験体や高架橋フレーム試験体を用いた静的載荷実験により、その補強効果を把握した。また、壁補強が高架橋全体の耐震性能に及ぼす影響について、建築構造物の耐震診断手法を準用して明らかにした。

キーワード: RC ラーメン鉄道高架橋、仕切り壁、連続繊維シート、せん断補強

1. はじめに

都市内における RC ラーメン鉄道高架橋では、高架下の空間の建物施設利用に伴い、コンクリートブロック（以下、CB と称する）壁等の仕切り壁が設置されている場合が多い。一般に鉄道高架橋では、このような仕切り壁は、構造部材として扱われず、その耐震診断においても考慮されない。しかし、実際には、高架橋のフレーム内における仕切り壁のせん断耐力が、高架橋全体のせん断耐力や耐震性に影響することも考えられる¹⁾。また、既存の仕切り壁を利用して高架橋の耐震補強を行うことができれば、壁の撤去や施設利用の中止を伴うことなく、円滑に補強工事を遂行できる。

そこで、本研究では、高架下における CB 造の仕切り壁に対し 1 面せん断補強を行い、そのせん断耐力を向上させることにより、高架下の施設利用を妨げず、高架橋全体のせん断補強を行う方法について検討した。まず、CB 壁の要素試験体や RC ラーメン鉄道高架橋の 1/2 模型に対する正負交番載荷実験により、補強法やその効果について考察した。次に、補強効果が高架橋全体の耐震性能に及ぼす影響について、建築構造物の耐震診断手法を準用して検討した。

2. CB 壁の要素実験

2. 1 要素実験の概要

高架下が施設利用されている鉄道高架橋における CB 壁へのせん断補強は、1 面からの施工が可能であることが重要となる。そこで、本研究では、CB 壁に対する 2 種類の 1 面せん断補強工法を想定し、それらを施した CB 壁の要素試験体に対する正負交番載荷実験を実施した。そして、補強方法の相違がその効果に及ぼす影響について検討した。

要素試験体は、3 個×6 段の CB からなる壁部材を 3 体製作した。No.1 試験体は、通常のメソンリー工事²⁾に基づき CB を積み上げた CB 壁（但し、CB 壁内は無筋である）である。これに対し、No.2 試験体には、CB の中央の空洞にアラミド製連続繊維ロープ（引張強さ：123.3kN）を芯材として通した後、全ての空洞に無収縮モルタル（圧縮強度：67.2N/mm²）を充填することにより、擬似的なコンクリート壁を構築せん断耐力を向上する補強工（以下、モルタル充填工法と称する）を行っている（写真-1）。また、No.3 試験体では、CB 壁の片側の表面にアクリル系接着剤によりビニロン繊維を 2 方向に配列した連続繊維シート（目付け量：226.5g/m²、引張

*1 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造・材料グループ 博（工）（正会員）

*2 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部 主幹研究員 博（工）（正会員）

*3 鹿島建設（株） 建築設計本部構造設計統括グループ チーフ 工修（非会員）

*4 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部技術開発部 次長 博（工）（正会員）

強さ : 649.7N/cm) を 1 層, 斜め 45° 方向に接着している(以下, 繊維シート補強工法と称する)。同補強工法は, CB 壁に発生したせん断ひび割れを繊維シートが架橋することにより, せん断耐力が増加することを期待するものである。

要素実験では, 試験体の周囲を載荷フレームおよび上下部が載荷フレームとヒンジで接続された鋼材で囲み, 試験体との間隙部に無収縮モルタルを充填することにより, 両者が一体となって一様にせん断変形するようにした(図-1)。なお, 載荷方法は, 水平ジャッキにより 2.5mm を基準変位とした同一振幅における繰り返し回数 1 回の振幅漸増型正負交番載荷である。

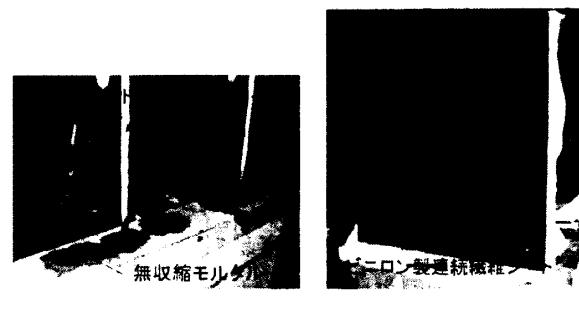
2.2 実験結果と考察

図-2, 図-3 に各試験体の荷重ーせん断変形角関係(骨格曲線)とひび割れ図を示す。なお, せん断変形角は, CB 壁の対角線上に設置した変位計の計測値から算出した値である。

図-2 より, No.1 試験体に比べ, No.2, No.3 試験体のせん断耐力, 剛性が大きいことが分かる。最大せん断耐力については, No.3 試験体が最も大きく, 小変形領域における剛性は No.2 試験体が最も大きい。一方, ひび割れ図からは, それぞれの試験体において異なる傾向が確認できる。No.2 試験体は, 斜めひび割れが発生した後は, 新たなひび割れの発生は少なく, 中央付近で交わる斜めひび割れ幅が拡大するような破壊性状を示している。これに対し, No.3 試験体は, 壁表面に接着した繊維シートがひび割れ間を架橋し, 引張力を伝達するため, ひび割れが分散して多く発生していることが分かる。

No.2 試験体では, CB 内部に無収縮モルタルを充填することにより, せん断耐力が増加し, そのせん断耐力, 剛性が大きくなる。これに対し, No.3 試験体では, せん断ひび割れ発生後も引張力が伝達されることにより, せん断耐力が増加する。すなわち, せん断耐力に着目すると, どちらの補強工法においても同程度の向上効果を期待できることが明らかとなった。

ただし, モルタル充填工法は, 実施工におい



No. 2 試験体

No. 3 試験体

写真-1 要素試験体への補強

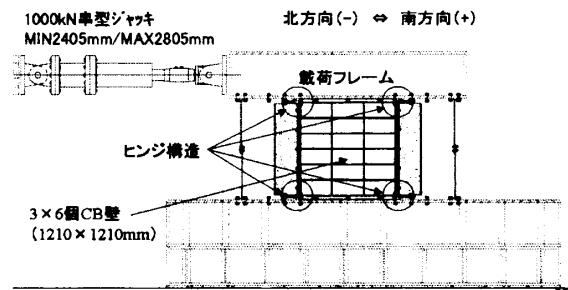


図-1 要素実験の載荷装置

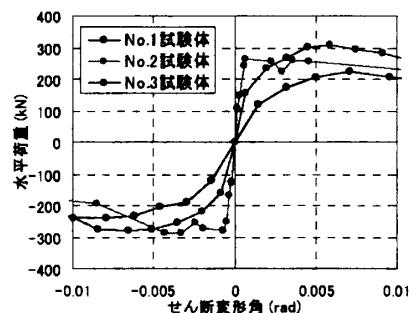
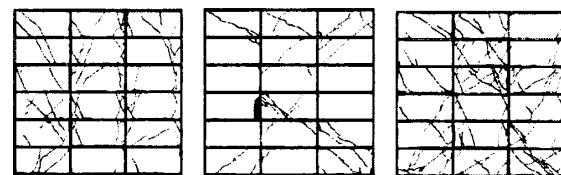


図-2 水平荷重ーせん断変形角関係



No. 1 試験体

No. 2 試験体

No. 3 試験体

図-3 ひび割れ図(せん断変形角: 0.01rad 時)

て既存の CB 壁の表面に連続繊維ロープや無収縮モルタルの注入が必要となるが, CB 内の空洞が横鉄筋や目地部で遮断されている場合には, 事前調査において空洞の不連続部を把握し, 注入口を多く設けなければならない。これに対し, 繊維シート補強工法は, その表面に繊維シートを接着するだけであるため, 既存の CB 壁に与え

る影響が小さい。また、施設利用されている条件下における施工性にも優れていると思われる。したがって、後述する大型試験体による検討では、繊維シート補強工法を採用することとした。

3. 大型試験体に対する正負交番載荷実験

3. 1 実験概要

本研究では、CB壁に対する繊維シート補強工法がRCラーメン高架橋全体のせん断耐力に及ぼす影響を明らかにするために、CB壁を仕切り壁として有するRCラーメン鉄道高架橋の1/2模型（以下、RCラーメン試験体と称する）に対し、正負交番載荷実験を行った。

試験体は、CB壁の下部の拘束条件がその補強効果に及ぼす影響についても検討するために、2体製作した。1体目（以下、L-1試験体と称する）は、CB壁直下に強固な地中梁やフーチングがあることを想定している。2体目（以下、L-2試験体と称する）は、CB壁の直下が埋め戻し土等の地盤であることを想定するものである。RCラーメン試験体の柱部は呼び強度 $24N/mm^2$ の普通コンクリートからなる $350 \times 350\text{mm}$ の正方形断面であり、主鉄筋としてSD295 D19、帯鉄筋としてSR235 $\phi 4$ 相当を配置した（図-4）。なお、RCフレームのみを想定した本試験体の破壊モードは、主鉄筋が曲げ降伏した後のせん断破壊である。CBはRCフレームの作成後、柱と梁、フーチングで囲まれた面内に積み上げた。L-1試験体ではフーチング上に直接、目地モルタルを敷き無筋のCBを6個×12段、積み上げた。L-2試験体では、CB壁下の地盤を模擬するために、フーチング上にN値5~7の砂質土と同等の弾性係数を有するEPS（発泡スチロール、厚さ410mm（CB2段分））を設置し、その上にCB壁（6個×10段）を構築した。

繊維シート補強は、両試験体ともCB壁を積み上げた後、要素試験体と同様の方法で接着した。なお、繊維シートの重ね合わせ区間は、鉄道構造物におけるアラミド繊維シートによる耐震補強指針³⁾に準拠し200mmとした。また、CB壁

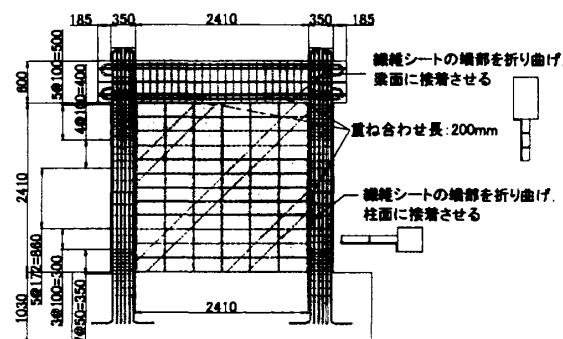


図-4 RC ラーメン試験体図 (L-1 試験体)

北方向(-) ⇔ 南方向(+)

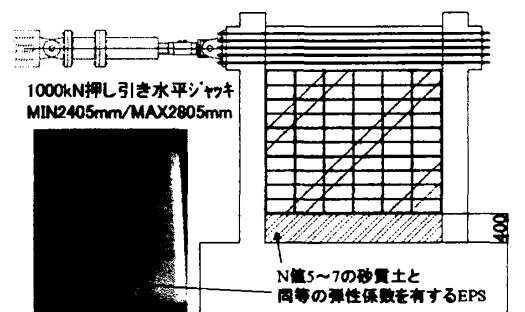


図-5 載荷装置 (L-2 試験体)

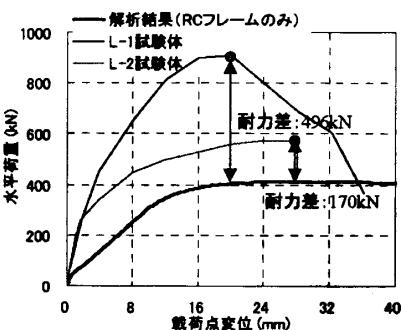
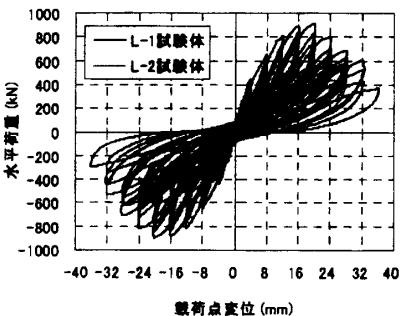
の左右柱、梁部については、各部材の面まで繊維シートを折り返して接着した（図-4）。

実験では、水平ジャッキを梁左端から右端まで梁部を貫通させたPC鋼棒に接続し、水平力のみによる正負交番載荷を行った（図-5）。なお、載荷方法は、基準変位を4.0mmとした繰り返し回数3回の振幅漸増型の正負交番載荷である。

3. 2 実験結果と考察

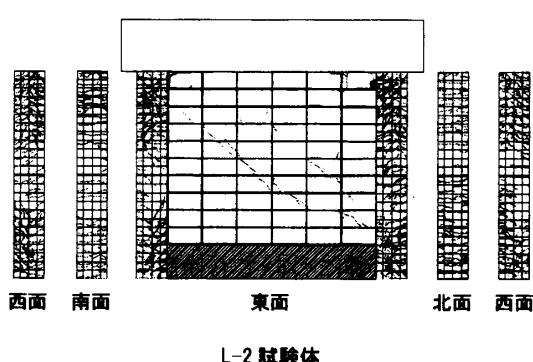
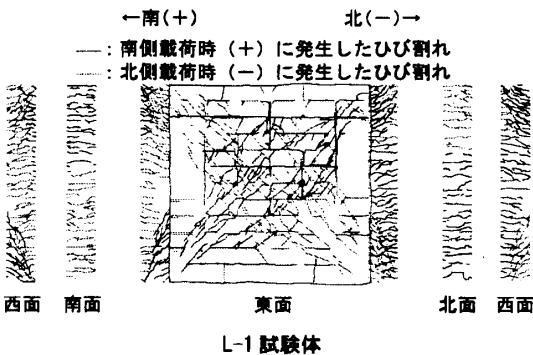
図-6に各試験体の水平荷重-変位関係を示す。なお、同図には、ファイバーモデル解析により算出した柱、梁からなるRCフレームのみの試験体の曲げ耐力と各試験体の最大耐力との比較についても示している。

実験結果より、L-1, 2試験体の最大耐力や剛性が、RCフレームのみを想定した解析結果のそれに比べ大きいことが分かる。ただし、その差は、L-1試験体の方が大きく、CB壁の下面での拘束条件が、試験体の最大耐力に影響を及ぼすことが分かる。なお、L-1, 2試験体とも柱の主鉄筋が降伏した後に最大耐力を経験しており、破壊過程における相違は確認されなかった。

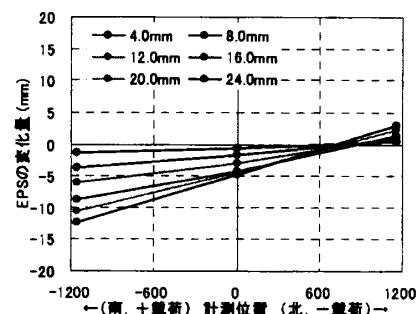


図一 6 水平荷重一変位関係

次に、図一7に両試験体の最大耐力経験時付近のひび割れ性状を示す。L-1試験体では、ひび割れがCB壁の中心において交わるように対角線上に発生していることが分かる。また、ひび割れは要素実験のNo.3試験体と同様にCB壁全体に分散して発生しており、特にCB壁の中央部分に多く発生している。左右柱のひび割れ分布を見ると、CB壁のひび割れの延長線上に柱のせん断ひび割れが発生していることが分かる。これは、L-1試験体において柱とCB壁が一体となってせん断変形に抵抗していることを示している。一方、L-2試験体のひび割れ分布では、L-1試験体と異なりCB壁でのひび割れがほとんど発生していない。これは、図一8に示すように試験体の変形に伴って地盤を模擬したEPSが圧縮され、CB壁の沈下量が大きくなつたことにより、柱とCB壁が分離していることを示している。前述したように、最大耐力についてもL-2試験体はL-1試験体に比べて小さく、CB壁による補強効果を最大限に発揮するためには、CB壁の周囲がRCラーメン高架橋で確実に拘束され、せん断力に対して両者が一体となって抵



図一 7 ひび割れ図（最大耐力経験時）



図一 8 載荷点変位によるEPSの変化量

抗することが重要であることが分かる。

本研究では、両試験体の最大耐力とRCフレームのみの最大耐力の差分を、繊維シート補強されたCB壁の補強効果として考える。前述のようにRCフレームのみの最大耐力は、柱部材のせん断耐力によるものである。しかし、RCフレームのせん断耐力が不明であることから、本研究では、補強効果が安全側に評価されるように、RCフレームの最大耐力をせん断耐力よりも大きなファイバーモデル解析による最大曲げ耐力とした。以上のように算出される耐力増加分をCB壁の見かけのせん断面積(2410mm×100mm)で

除すと、断面積当りの補強効果は、その補強、拘束条件により表-1のようになる。L-1試験体は、繊維シート補強によりCB壁の短期許容せん断応力度²⁾に比べ、6倍以上のせん断強度を有していることが分かる。また、繊維シート補強されたCB壁の下面の拘束が小さい場合は、補強効果が半分以下に低減される。

4. 仕切り壁への補強が高架橋全体の耐震性能に及ぼす影響

4.1 解析概要

鉄道構造物の耐震設計では、仕切り壁は構造部材として扱わず、そのせん断耐力は考慮されない。そこで、本研究では、仕切り壁のせん断補強が高架橋全体の耐震性能に及ぼす影響について、建築構造物の耐震診断手法⁴⁾を準用し、構造耐震指標による検討を行った。構造耐震指標は、柱、壁部材等からなる建築構造物の部材耐力・韌性、形状、経年劣化および地震時に作用するせん断力により算出される指標である。すなわち、仕切り壁を有する鉄道高架橋を建築構造物として見なし、CB壁をRC壁に準ずる部材として考慮した構造耐震指標を算出して、その影響を反映した耐震性能評価を行う。

解析対象とした高架橋は、せん断補強が必要とされる橋脚高さ5.0mの複線二柱式RCラーメン高架橋であり、図-9に示すように線路方向3スパン、線路直角方向1スパンのものである。高架橋は、同一寸法・配筋の柱8本で支持され、梁を含む床組みは十分な強度・剛性を有しているものとする。CB壁は厚さ10cmのC種CBが、無開口で柱・梁フレーム内に梁下の高さまで密実に組積されている。

解析パラメータは、CB壁のせん断強度と壁の配置パターンである。CB壁のせん断強度については、前述した表-1による3ケースであり、CB壁への補強と拘束条件を相違とするものである。CB壁の配置パターンについては、表-2、表-3に示すようなものを設定した。すなわち、線路軸方向および直角方向に対し、CB壁の枚数、

表-1 各条件によるC種CB壁の補強効果

CB壁の4辺拘束	繊維シート補強	
	無し	有り
無し	—	0.71N/mm ²
	有り	0.3N/mm ^{2*} 2.0N/mm ²

* 補強コンクリートブロック造設計規準・同解説によるC種CB壁の短期許容せん断応力度

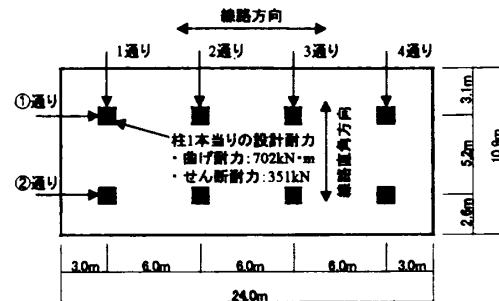


図-9 解析対象 RC ラーメン高架橋

表-2 線路方向の壁の配置パターン

壁の枚数	パターン	壁の配置
1枚	0+1枚	①または②通りに1枚
	0+2枚	①または②通りに2枚
2枚	1+1枚	①と②通りに1枚づつ
	0+3枚	①または②通りに3枚
3枚	1+2枚	①(②)通りに1枚、②(①)通りに2枚
	1+3枚	①(②)通りに1枚、②(①)通りに3枚
4枚	2+2枚	①と②通りに2枚づつ
	2+3枚	①(②)通りに2枚、②(①)通りに3枚
5枚	3+2枚	①(②)通りに2枚、②(①)通りに3枚
	3+3枚	①と②通りに3枚づつ

表-3 線路直角方向の壁の配置パターン

壁の枚数	パターン	壁の配置
1枚	1+0+0+0枚	①または4通りに1枚
	0+1+0+0枚	②または3通りに1枚
2枚	1+1+0+0枚	①(4)、2(3)通りに1枚づつ
	1+0+1+0枚	①(4)、3(2)通りに1枚づつ
	1+0+0+1枚	1、4通りに1枚づつ
	0+1+1+0枚	2、3通りに1枚づつ
3枚	1+1+1+0枚	1、2、3または2、3、4通りに1枚づつ
	1+1+0+1枚	1、2、4または1、3、4通りに1枚づつ
4枚	1+1+1+1枚	1、2、3、4通りに1枚づつ

配置を相違とするものである。CB壁を考慮したRCラーメン高架橋のせん断耐力は、せん断破壊を前提とした壁部材を有する建築RC構造物のせん断耐力の算出法⁴⁾を準用して柱とCB壁のせん断耐力を累加して算出した。柱のせん断耐力については、鉄道構造物の設計指針⁵⁾に従って算出し、CB壁分のせん断耐力は、表-1によるせん断強度にCB壁のせん断面積を乗じて

算出している。なお、経年劣化は考慮せず、水平剛性計算時のCB壁倍率は1.0とする。

4.2 解析結果と考察

パラメトリック解析結果を図-10に示す。CB壁を考慮せずに、解析を行った結果では、線路方向、線路直角方向の両方において構造耐震指標が0.4程度であり、建築構造物の耐震診断で必要とされる0.6よりも小さいことが分かる。

CB壁を考慮した線路方向の解析結果では、補強、拘束の両条件が満たされる場合($\tau = 2.0 \text{ N/mm}^2$)、CB壁が1枚で構造耐震指標が0.6を超える、基本的な耐震性能が確保される。これに対し、一方の条件が満たされない場合($\tau = 0.3, 0.71 \text{ N/mm}^2$)は、必要な壁は3枚以上となる。

線路直角方向についても、同様な傾向が確認できる。例えば、補強、拘束の両条件が満たされる場合、構造耐震指標が0.6を超えるために必要な壁数は、線路直角方向に2枚であるが、どちらかの条件が満足されない場合は、必要な壁が3~4枚となる。また、線路直角方向壁1+0+0+0枚において、CB壁のせん断強度が大きくなってしまっても、構造耐震指標が小さくなっている。これは、偏在するCB壁のせん断耐力が大きくなり、高架橋にねじりの影響が作用するためである。補強計画では、ねじりの影響が小さくなるように補強する壁の配置を設定する必要がある。

5.まとめ

- (1) 連続繊維シートを壁表面の片側に接着することにより、CB壁のせん断耐力を向上させることができる。仕切り壁に対する繊維シート接着工法は、施設利用されている高架橋のせん断補強に適していると考えられる。
- (2) 繊維シート補強されたCB壁により、橋脚全体のせん断耐力を増加できることを、RCラーメン高架橋の1/2試験体に対する正負交番載荷実験により確認した。ただし、効果の程度は、CB壁下面の拘束条件により変化する。

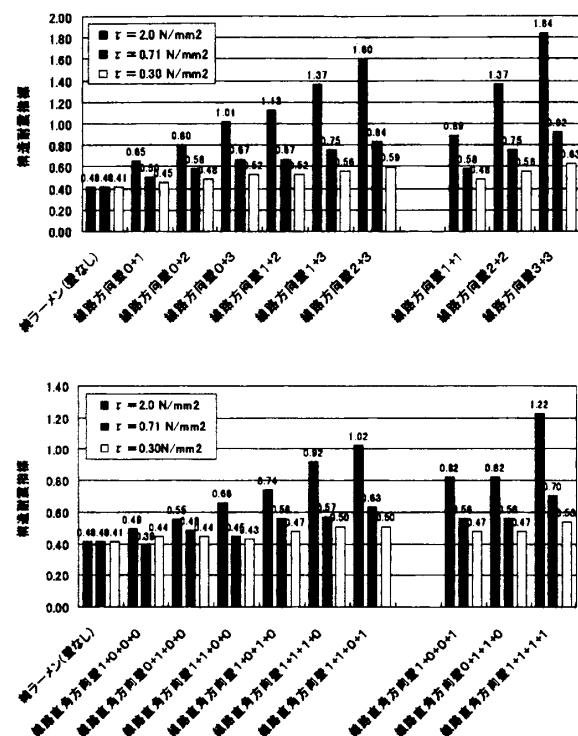


図-10 パラメトリック解析結果

- (3) 仕切り壁として利用されているCB壁への繊維シート補強により、RCラーメン高架橋全体の耐震性能を向上させることができる。ただし、その効果は、繊維シート補強、拘束の有無およびCB壁の配置に大きく影響される。

参考文献

- 1) 例えば、田畠 裕、安原 真人、岡本 大:コンクリートブロックで充填されたRCラーメン構造の交番載荷試験、土木学会第52回年次学術講演会、V-269、1998年10月
- 2) (社)日本建築学会:補強コンクリートブロック造設計規準・同解説、1997年
- 3) (財)鉄道総合技術研究所:アラミド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、平成8年11月
- 4) (財)日本建築防災協会:2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、2001年
- 5) (財)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、平成16年