

論文 自己圧着型コンクリートブレースによる耐震補強工法に関する研究

渡邊 有香子^{*1}・宮崎 覚^{*2}・谷 昌典^{*3}・渡邊 史夫^{*4}

要旨：既存不適格建物の「居ながら耐震補強」工法の一つとして、端部に多層バネ要素を組み込んだ X 字型プレキャスト RC ブレースによる補強工法を提案し、実験によりその補強効果を確認した。本工法は、ブレース端部に鋼管と皿バネから成る多層バネ要素を組み込むことで引張側ブレースの外れを防止した点、およびプレストレスカの解放によりブレースと周辺骨組みを圧着接合する点を特徴とする。実験は縮尺 1/2 の 1 層 1 スパン RC フレームにブレースを設置した試験体を用い、水平方向に繰り返し载荷を行った。結果としてフレームのみの場合に対して水平耐力が約 3~4 倍向上し、大きな補強効果が得られることがわかった。

キーワード：耐震補強，コンクリートブレース，プレストレス，圧着，プレキャスト

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震以降、既存不適格建物の耐震性能を向上させることが被害を最小化するための重要な課題として挙げられ、より施工性・経済性に優れた耐震補強工法の開発が望まれている。特に工事期間中も建物の使用を妨げることのない「居ながら耐震補強」が、既存不適格建物の耐震化を進める鍵となっている。

従来の耐震壁や鉄骨ブレースの増設による補強工法では、補強部材と既存骨組みを一体化させるためのあと施工アンカー工事が必要であり、その際の騒音や振動が問題とされていた。本研究は、プレキャスト RC ブレースを用い、プレストレスカの解放により既存骨組みとブレースを圧着接合することでアンカー工事を不要とした、新たな耐震補強工法に関するものである。

本研究では 1/2 スケール 1 層 1 スパン試験体を用いて水平载荷実験を行い、補強効果および力学的性状を確認した。

2. 耐震補強工法概要

本耐震補強工法の概要を図 - 1 に示す。この

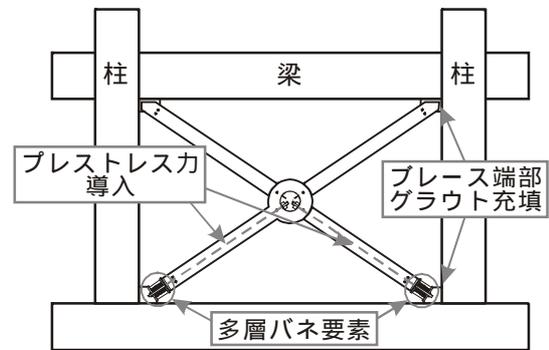


図 - 1 本耐震補強工法の概要

工法は、X 字型プレキャスト RC ブレースを用い、周辺骨組みとの圧着接合により耐震効果を得るものである。

2.1 特徴

本工法は以下のような特徴を持つ。

- (1) 強度抵抗型の補強方法である
- (2) 多層バネ要素に作用させたプレストレスカの解放によってブレースと周辺骨組みを一体化（圧着）させるため、あと施工アンカー工事等が不要である
- (3) ブレース端部の多層バネ要素により、引張側ブレースの外れを防止する

*1 京都大学 大学院工学研究科 (正会員)

*2 関西電力株式会社

*3 三菱重工業株式会社

*4 京都大学 大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

2.2 ブレースユニット

本工法で用いる X 字型ブレースは、図 - 2 に示すように 4 パーツに分割して製作したプレキャスト RC 部材から成り、以下の手順で周辺骨組みに圧着接合する。

- (1) 4 つの部材を、突出鉄筋端部に切削したネジとナットで中央円形部に接合する
- (2) 同時に下部ブレースにプレストレスを導入する
- (3) ブレースをフレーム内に設置し、フレームとの隙間に無収縮グラウトを充填する
- (4) 中央円形部の PC 鋼棒ナットを緩めてプレストレスを解放することにより、ブレースと周辺骨組みを圧着する

なお、下部ブレースの端部には多層バネ要素を組み込んでおり、詳細は次項で説明する。

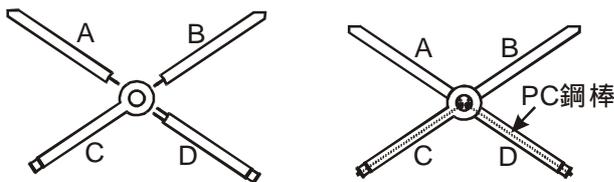
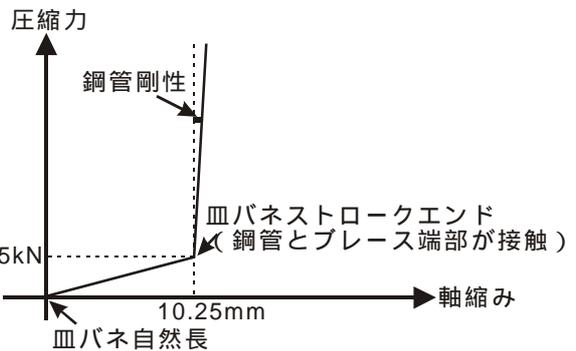
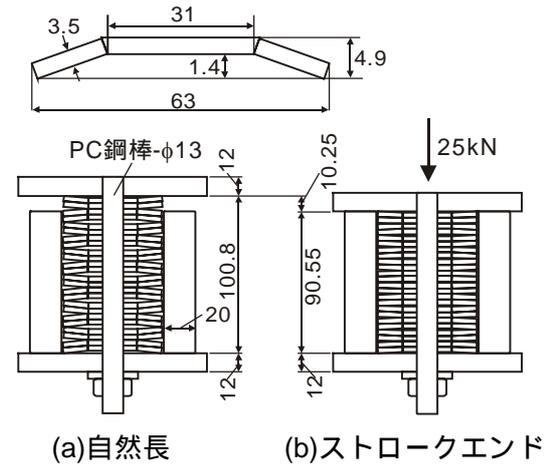


図 - 2 ブレース組み立て図

2.3 多層バネ要素

地震応答時に引張側となるブレースが骨組みから外れるのを防ぐため、ブレース端部に、鋼管と皿バネを組み合わせた図 - 3 のような 2 段階の剛性を持つ多層バネ要素を組み込む。

これにより、ブレース全体の軸挙動は図 - 4 のようになる。地震時に引張側となるブレースでは、C 点を境として剛性がブレースと鋼管による高いものから皿バネのみによる低いものへと変化するため、軸変形が最小となる D 点においても圧縮力を作用させることができる。この圧縮力を、
 「圧縮力」×「ブレース端部の摩擦係数」
 > 「ブレースに生じる慣性力（設計では 1G）」
 を満たすように設計すれば、面外方向の力に対してもブレースが外れることはない。これを設計最小圧縮力とする。



(c)多層バネの軸挙動

図 - 3 多層バネ要素詳細図

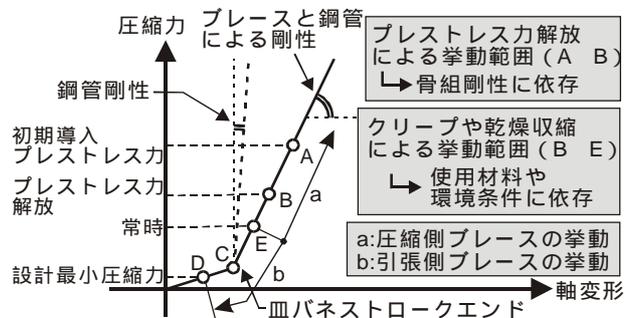


図 - 4 ブレース全体の軸挙動

3. 実験概要

3.1 実験の目的

実験は以下のことを目的として行った。

- (1) 本耐震補強工法の力学的性状の把握
- (2) 本耐震補強工法による補強効果の確認

3.2 試験体概要

試験体は、1 層 1 スパン縮尺 1/2 の柱・梁からなるフレームに、以下に示す 2 種類の破壊形式を想定して設計したブレースを設置したものをを用いた。

- (1) パンチングシヤ破壊型 (試験体 A とする):
 図 - 5 に示すように, 接合部近傍のパンチング破壊領域におけるフレームの局部せん断破壊が先行する破壊形式
- (2) ブレース座屈破壊型 (試験体 B とする):
 ブレースの座屈破壊が先行する破壊形式

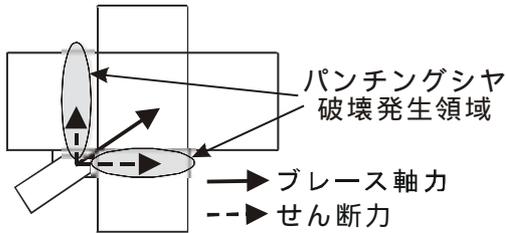


図 - 5 パンチングシヤ破壊発生領域

なお, 設計条件と耐力算定式は以下である。

試験体 A :

ブレースの座屈耐力 ACI Code²⁾による式
 > フレームのパンチングシヤ耐力
 ACI Code Commentary³⁾による式

試験体 B :

ブレースの座屈耐力 Navier⁴⁾による式
 < フレームのパンチングシヤ耐力
 ACI Code による式

3.3 試験体詳細

図 - 6 にフレームの詳細を, 図 - 7 にブレースの詳細 (試験体 A のみ) を示す。なお, ブレース断面は以下である。

- (1) 試験体 A : 120mm × 150mm
 (2) 試験体 B : 100mm × 120mm

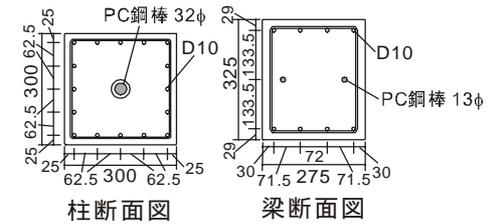
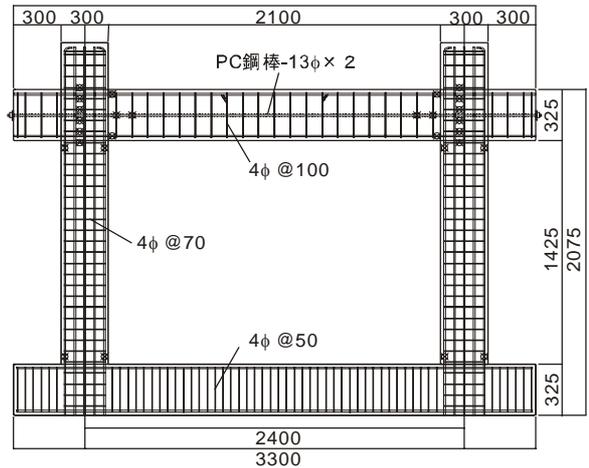
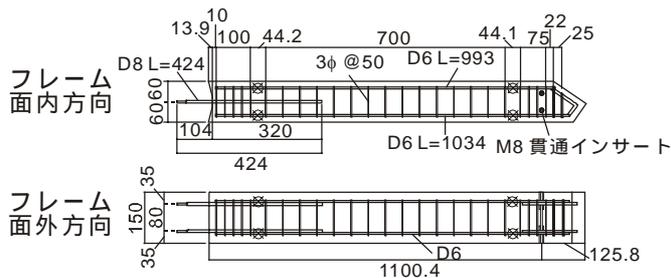
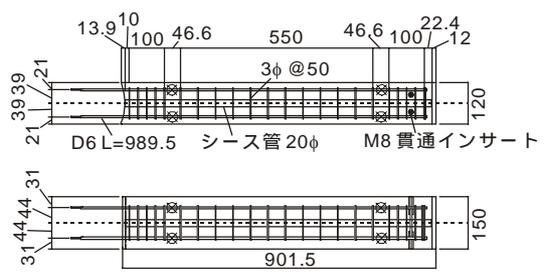


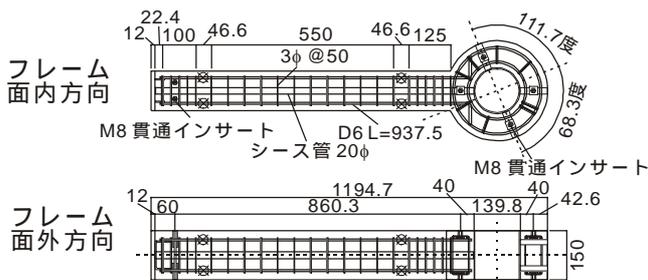
図 - 6 フレーム詳細図



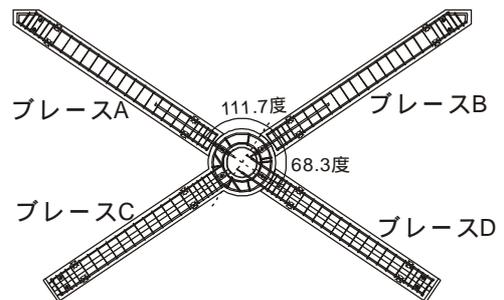
(a) ブレース A および B



(b) ブレース D



(c) ブレース C



(d) ブレース全体図

図 - 7 試験体 A ブレース詳細図

なお、梁には引張破壊防止のため、柱には最下層柱を想定した柱軸力として、それぞれアンボンド PC によりプレストレスを導入した。実際の設計においては、スラブ有効幅を含む梁が軸引張降伏する時が限界になる。

表 - 1 ~ 4 に各材料特性を示す。

表 - 1 鉄筋の材料特性

	公称強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D10	295	378	555	184
D8	490	576	645	215
D6	295	360	515	171

表 - 2 コンクリートの材料特性

		公称コンクリート強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
パンチング	フレーム	18	25	2.51	24.3
シヤ破壊型	ブレース	60	64.1	4.52	33.3
ブレース	フレーム	18	27.5	2.53	26.1
座屈破壊型	ブレース	30	24.9	2.58	23.3

表 - 3 皿バネの材料特性

変形 (mm)	0.35	0.7	1.05	1.4
荷重 (kN)	5.40	10.37	15.03	19.56

表 - 4 グラウトの材料特性

		圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
パンチング	フレーム隅部	87	2.82	22.7
シヤ破壊型	ブレース円形部	55.7	-	23.7
ブレース座	フレーム隅部	71.9	5.02	22.9
屈破壊型	ブレース円形部	41.4	-	17.8

3.4 荷重方法

荷重は図 - 8 に示す荷重装置を用い、制御は柱頭水平変位の南北平均値によって行った。

図 - 9 に示すように、水平変位が $\pm 1.0\text{mm}$ 、

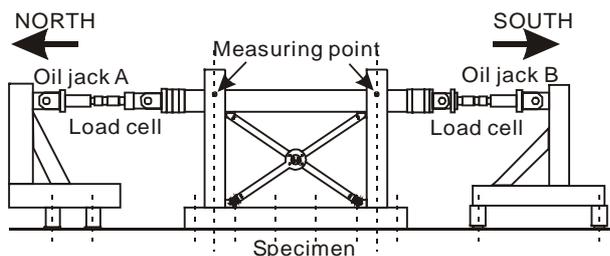


図 - 8 荷重装置図

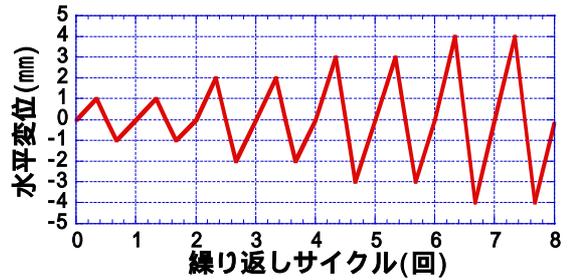


図 - 9 荷重履歴

$\pm 2.0\text{mm}$, $\pm 3.0\text{mm}$...となるよう南北方向に水平荷重を作用させ、各変位振幅を 2 回ずつ繰り返した。なお、南側に変形する時の荷重、およびそれに伴って生じる変位を正とする。

4. 実験結果

以下に実験の結果を示す。

ただし、3.2 で述べた 2 種類の破壊形式に反し、いずれの試験体でもブレース部コンクリートの圧壊により破壊に至った。

4.1 荷重 - 変位関係

図 - 10 に、実験より得られた水平荷重 - 水平変位関係を示す。

初期剛性、最大耐力ともに試験体 A の方が大きいことがわかる。

また、試験体は履歴ループの小さな原点指向型を示し、本補強工法は強度抵抗型の補強方法であるといえる。

原点付近においては、剛性が低下するスリップ挙動が認められる。これは、水平荷重が小さ

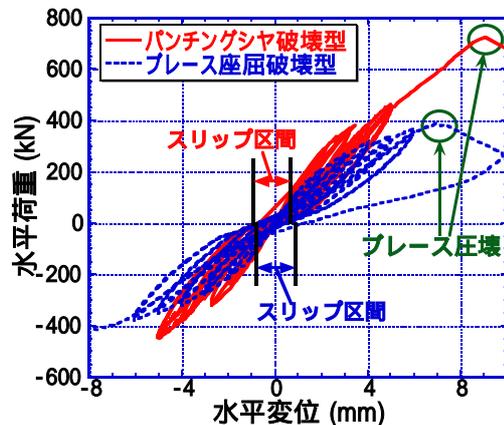
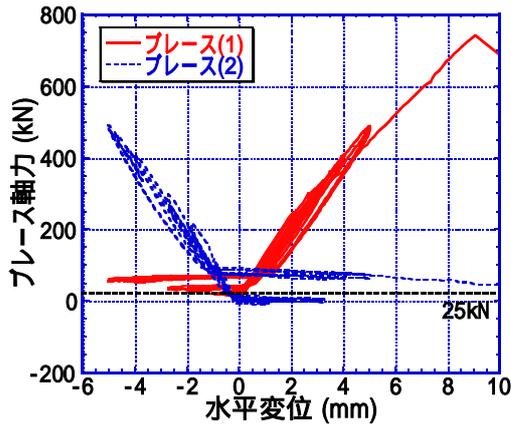
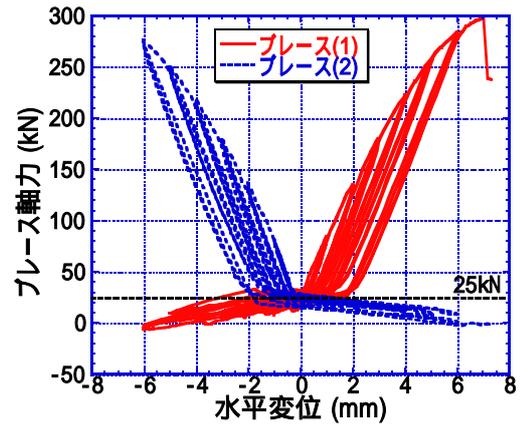


図 - 10 水平荷重 - 水平変位関係



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図 - 11 ブレース軸力 - 水平変位関係

い状態では多層バネ要素がストロークエンドより伸び出し、ブレース全体の剛性が小さくなるためであり、また、繰り返し载荷によって柱および梁に生じた残留伸びにより、フレームの対角線が伸びることも影響すると考えられる。

4.2 ブレースの挙動

図 - 11 にブレース軸力 - 水平変位関係のグラフを示す。ブレース軸力は、図 - 12 に示す断面において内部鉄筋およびコンクリート表面に添付したひずみゲージ値より算出した。正方向荷重時に圧縮側となるブレースをブレース(1)、引張側となるブレースをブレース(2)とする。

両ブレースともほぼ皿バネストロークエンド時の軸力 25kN 以下では剛性が低下しており、図 - 4 に示したブレースの軸挙動に従った剛性の変化が確認された。図 - 11(b)で若干引張力が生じたように見えるのは実験誤差であり、実験観察によるとバネが伸びきった状態はなかった。

4.3 ブレース軸力の偏心の影響

ブレース軸力の偏心によりブレースに曲げモーメントが作用すると、曲げひび割れや不安定現象が生じる可能性がある。

図 - 12 に示す断面におけるひずみゲージ値から、ブレースに作用する軸力およびモーメントを算出し、偏心量を割り出した。各载荷サイクルのブレース軸力最大時(計 8 回)における偏心量を、図 - 13 に示す。図 - 12 のブレース断面図中央菱形部および図 - 13 の破線で囲んだ領域はブレース断面の核を示し、偏心量がこの内部にあれば部材に引張応力を生じない。

図 - 12 に示す断面におけるひずみゲージ値から、ブレースに作用する軸力およびモーメントを算出し、偏心量を割り出した。各载荷サイクルのブレース軸力最大時(計 8 回)における偏心量を、図 - 13 に示す。図 - 12 のブレース断面図中央菱形部および図 - 13 の破線で囲んだ領域はブレース断面の核を示し、偏心量がこの内部にあれば部材に引張応力を生じない。

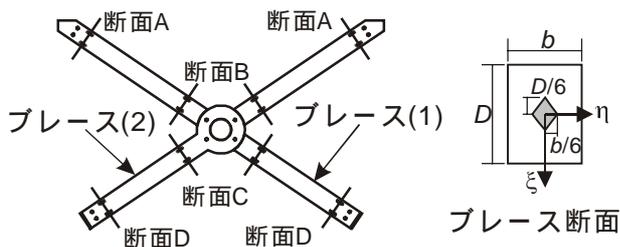
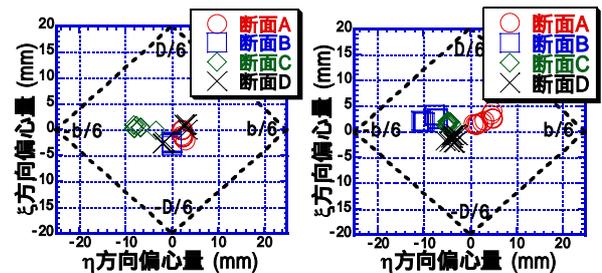


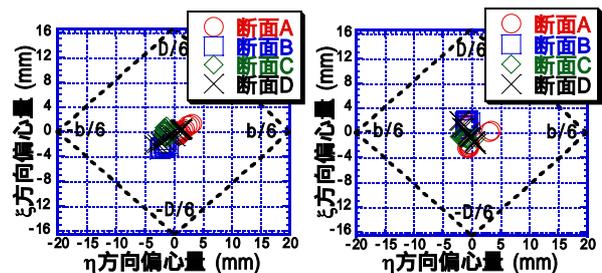
図 - 12 軸力およびモーメント測定断面位置



試験体 A

(a) ブレース(1)

(b) ブレース(2)



試験体 B

(c) ブレース(1)

(d) ブレース(2)

図 - 13 ブレース軸力偏心量

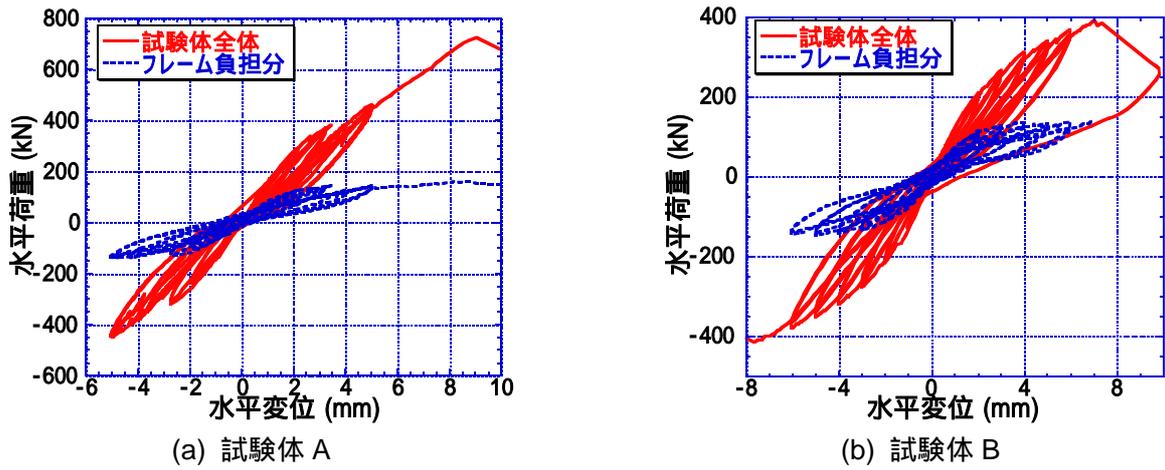


図 - 14 フレーム負担水平荷重 - 水平変位関係

図 - 13 より，偏心量はすべて核内に収まっており，ブレースは全断面圧縮となって曲げひび割れを生じないことがわかる。

4.4 補強効果

本工法の補強効果は無補強のフレームのみの場合と比較するため，ジャッキにより加えた水平荷重からブレース軸力の水平成分を差し引いて，水平荷重のフレーム負担分を算出した。図 - 14 に各試験体におけるフレーム負担水平荷重 - 水平変位関係を示す。

図 - 14 の荷重 - 変位関係から得られた初期剛性および最大耐力を補強の有無により比較し，補強効果の倍率を算出した。結果を表 - 5 に示す。耐力の増加は試験体 A で約 4 倍，試験体 B で約 3 倍弱であり，本工法を用いることで，大きな補強効果を見込めると結論付けることができる。

表 - 5 補強効果

		初期剛性 (kN/mm)	最大耐力(kN)	
			正側	負側
パンチング シヤ破壊型	補強なし	80.8	148.0	-141.7
	補強あり	161.6	621.9	-450.5
	剛性・耐力倍率	2.00	4.20	3.18
ブレース 座屈破壊型	補強なし	67.1	168.6	-145.9
	補強あり	121.7	369.9	-409.9
	剛性・耐力倍率	1.81	2.86	2.81

5. 結論

以下に本研究の結論を示す。

- (1) 試験体は履歴ループの小さな原点指向型の

挙動を示し，スリップ区間を持つ。本工法は強度抵抗型補強である。

- (2) ブレースは多層バネ要素のストロークエンドを境に剛性が変化するが，引張側となる場合でも十分な圧縮軸力が保持され，フレームから外れることはない。
- (3) ブレース軸力の偏心は十分に小さく，ブレースには曲げによるひび割れや不安定現象は生じない。
- (4) 水平耐力は，フレームのみの場合に比べて約 3~4 倍となり，大きな補強効果がある。

謝辞

本研究を遂行するに当たり，供試体製作を含め資金補助をいただいた(株)ダイワ，(株)竹中工務店に感謝いたします。

参考文献

- 1) 宮崎覚：自己圧着型コンクリートブレースによる耐震補強に関する研究，京都大学修士論文，2002.3
- 2) ACI Committee318: Building Code Requirement for Reinforced Concrete, pp.121-124, 1989
- 3) ACI Committee318-R: Building Code Requirement for Reinforced Concrete, pp.159-163, 1989
- 4) Timoshenko, P. S.: Theory of Stability, pp.310, 1961