

ポリエステル繊維織物を用いた木造住宅の耐震補強効果に関する振動実験

Shaking Table Tests on a New Seismic Retrofit Technique
for Existing Wooden Houses using Polyester Fiver Belt

小原学¹, 佐藤晃章¹, 内田崇彦¹, 三辻和弥², 前田匡樹³, 五十嵐俊一⁴

Manabu OHARA¹, Teruaki SATO¹, Takahiko UCHIDA¹,
Kazuya MITSUJI², Masaki MAEDA³ and Shunichi IGARASHI⁴

¹ 東北大学大学院工学研究科, 大学院生 Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.

² 東北大学大学院工学研究科, 助手 博士(工学) Research Assoc., Graduate School, Tohoku Univ., Dr. Eng.

³ 東北大学大学院工学研究科, 助教授 博士(工学) Assoc. prof., Graduate School, Tohoku Univ., Dr. Eng.

⁴ 構造品質保証研究所, 工博 Structural Quality Assurance Inc., Dr. Eng.

SUMMARY: : Authors have developed a new seismic retrofit technique for existing wooden houses using polyester fiver belts. The retrofit technique includes two type of reinforcing: one is to fasten joint of timbers with bonding polyester belts. Another is to install braces composed by the belts into wooden frames. In this paper, shaking table test of full-scale wooden frame specimens with proposed seismic retrofit technique was conducted in order to grasp seismic response characteristics and confirm effectiveness of proposed technique. From experimental result, it was shown that seismic capacity of retrofitted frames was improved by the use of polyester fiver belts as much as by conventional retrofitting method.

1 はじめに

既存木造住宅の耐震診断・耐震改修は地震防災対策において重要な課題であるが、木造住宅を対象とした補強工法の開発は行われているものの、耐震改修の促進には至っていないのが現状である。

筆者らは既往の研究^[1]でポリエステル繊維のベルト補強材を用いた新しい耐震補強工法の開発をした。この補強工法はポリエステル繊維のベルト補強材を部材に直接接着することで耐震壁を構成し、対象建物の耐震性能の向上を図るもので、木造架構を用いた静的加力実験の結果、在来の補強工法に匹敵する十分な補強効果を確認できた。

そこで本研究では補強された木造架構の地震時の応答性状を把握し、既往の静的加力実験で得られているポリエステル補強材を用いた補強工法の性能が実地震時に発揮されるか検証することを目的に振動実験を行った。

2 補強工法概要

2.1 材料の特性

本補強工法で使用するポリエステル繊維のベルト補強材は、高強度ポリエステル繊維を編みこんだ材料である。繊維材料であるため、曲げ・せん断・圧縮に対する抵抗力はなく、引張力にのみ作用する。破断時まで線形の応力-ひずみ度関係を示す高弾性の材料であるため、大変形に追従して耐力を発揮する特徴がある。Photo. 1 にベルト補強材、Table 1 に補強材の性能規格値を示す。

接着剤は弾力性に富んだポリウレタン系の1液性・無溶剤タイプの接着剤である。無臭で有害物質を含まず、木材に対する平均接着強度は約1N/mm²である。

Table1 Material Properties of
Polyester Fiver Belt

材料名	ベルト1(B1)	ベルト1(B2)
材料	高強度ポリエステル繊維を織り込んだベルト材	
規格値[mm]	厚さ	2.7
	幅	100.0
実験値[mm]	厚さ	2.7
	幅	99.9
ヤング係数	平均値	8300
	[N/mm ²] 下限値	4500
破断時強度[N/mm ²]		654.8
	破断時歪度[%]	12.4

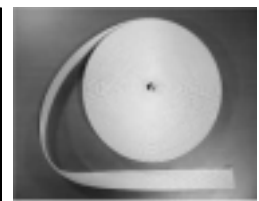


Photo. 1 Polyester Fiver Belt(B1)

2.2 補強工法概要

本補強工法は既存木造家屋を補強対象として想定し、部材表面に接着剤を塗布してベルト補強材を筋交い状に直接接着して筋交いを構成する、あるいは接合金物の代わりとして部材を接合することで耐震性能の向上を図るものである。木造住宅が地震によって被害を受ける主な要因は、筋交いや合板などの耐力壁の不足、柱と梁・土台の接合部や筋交いの仕口部での緊結不足などが挙げられるため、本補強工法ではこうした点をベルト補強材により改善することを目標としている。

以下に本研究で対象とした工法のうち、「ベルト筋交」「接合部補強」「応急補強」3つの概要について説明する。

(1) ベルト筋交

本研究での基本的な補強工法であるベルト筋交は、通常の耐震補強としての使用を想定しており、在来の筋交い工法と同様に補強対象建物の外壁または内壁を撤去し、露出した軸組(柱・土台)にベルト補強材を接着して筋交いを構成する。ベルト筋交いの配置は、せん断抵抗を最も効果的に発揮させるため傾斜角を45°として3層並列する(Fig. 2(d))。また、ベルト補強材の引張力に対する反力を確保す

るため水平部材(中棧)を軸組に追加する。

(2) 接合部補強

旧耐震基準の既存木造家屋では接合部が釘打ち程度であるため、十分な接合強度を保持していない場合が多い。また、接合金物をを用いた接合部の緊結には、接合用の穴を開ける必要があるためこの部分が弱点になる、大変形により接合金物が塑性化し残留変形を生じるといった問題が存在する。接合部補強では、変形性能に富むベルト補強材を柱と梁・土台の接合部または筋交いの仕口部に直接接着することで、木材に損傷を与えることなく接合強度の向上を図るものである(Fig. 1)。

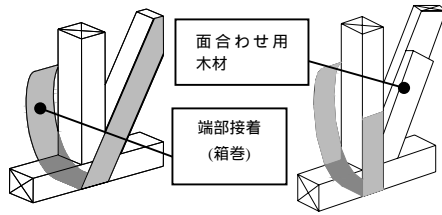


Fig. 1 Timber Joint with Belt

(3) 応急補強

地震被災地では、自宅に倒壊の恐れがあると判断されたために避難生活を余儀なくされる被災者が少なくない。こうした状況では、余震による家屋の倒壊防止を確実に達成し、短期間で容易に実現可能な補強が適していると考えられる。

そこで本補強工法では、耐震要素と接合部要素ともにベルト補強材を用い、建物倒壊防止を目的とした応急補強を提案する。ある程度の変形を許容し、補強箇所・ベルト本数ともに必要最小限に抑えて補強するため、ベルト補強材の端部は必ず柱や土台・桁梁に巻き付けて定着する。(Fig. 2(e))

3 実験計画

3.1 試験体概要

実験に用いる軸組は、加振方向 1.5 間[2730mm]・高さ 2730mm で中央半間部分にのみ耐震要素を設置した。本研究では木造筋交いを耐震要素とした試験体 3 体とベルト筋交および応急補強の試験体各 1 体の計 5 体を用いて振動実験を行った。試験体の諸元を Table 2 に、試験体概要を Fig. 2 に示す。

Table 2 Parameter of Specimens

試験体名称	耐力要素	耐力要素接合部	柱頭・柱脚接合部	初期周期[sec]
筋交・金物なし	筋交い	N90釘斜め打ち	N90釘斜め打ち	0.18
筋交・金物あり		筋交いプレート	HD金物	0.16
筋交・ベルト接合	[90mm×45mm]	N90釘斜め打ち+	N90釘斜め打ち+	0.20
		B1ベルト	B2ベルト	
ベルト筋交	B2ベルト 4枚	接着	HD金物	0.30
応急補強	B1ベルト 2枚	接着+端部巻付	接着+端部巻付	0.38

在来の補強工法が施された[筋交・金物なし]試験体(Fig. 2(a))は、両筋交いを耐震要素とし接合部は釘打ちのみである。これは旧耐震基準に基づく仕様であり、現行の耐震基準を充たしていない古い木造家屋を想定した試験体である。

対する[筋交・金物あり]試験体(Fig. 2(b))は、柱と梁・土台接合部に HD 金物を、筋交いの仕口部に筋交いプレートを用いて十分な緊結を施してあり、現行の耐震基準による最近の木造家屋を想定した試験体である。

一方[筋交・ベルト接合]試験体(Fig. 2(c))は、接合金物の代わりにベルト補強材を接合部要素として使用しており、本補強工法による接合部補強を想定した試験体である。

[ベルト筋交]試験体(Fig. 2(d))は、柱と梁・土台の接合部に HD 金物を使用し、耐震要素として筋交いの代わりにベルト筋交いを用いたものである。

[応急補強]試験体(Fig. 2(e))は、耐震要素と接合部要素の両方にベルト補強材を使用している。ベルト補強材を 1.5 間にわたり筋交い状に配置し、梁と土台をベルトで直接繋いでいる。各ベルト端部は梁または土台に巻きつけ定着を確保した。

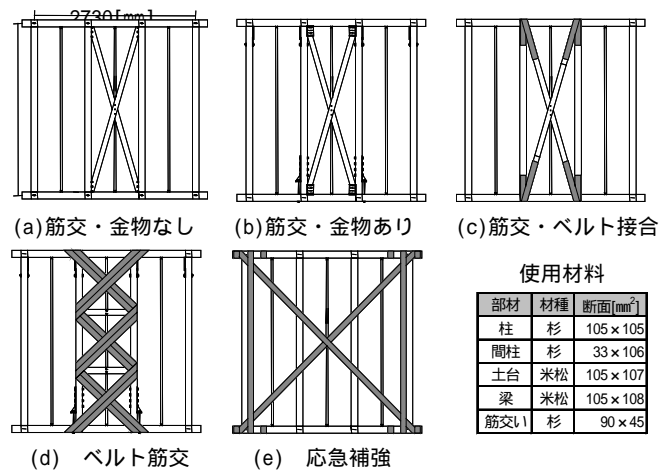


Fig. 2 Outline of Specimens

3.2 静的加力実験結果に基づく性能評価

各試験体について、既往の静的加力実験結果^[1]と建築防災協会の耐震診断基準^[2]による基準耐力や診断結果を Table 3 に示す。ここで[筋交・金物あり]の耐震診断基準による基準耐力は 45×90 筋交いの値を用い、[筋交・金物なし]は、それに接合部の低減(0.8×0.7)を乗じた。

また[筋交・ベルト接合]については、柱接合部をベルトの箱巻としているのに対し、静的加力実験の試験体では HD 金物としているため条件が異なる。しかし他の静的実験結果からベルト箱巻(接着長さ 300mm)と HD 金物の接合強度についてはほぼ同等であることから、これを採用した。

Table 3 Capacity of Specimens Based on Previous Experiments and Seismic Evaluation Standard

試験体名	実験結果				耐震診断基準		
	最大耐力 [kN/m]	剛性 [kN/rad]	基準耐力 [kN/m]	壁倍率	基準耐力 [kN/m]	剛性 [kN/rad]	壁倍率
筋交い・金物なし	3.74	292	2.02	1.03	3.58	728	-
筋交い・金物あり	14.20	633	5.37	2.74	6.40	1300	4.00
筋交い・ベルト接合	11.99	682	6.15	3.14	-	-	-
ベルト筋交	13.08	430	2.71	1.38	-	-	-

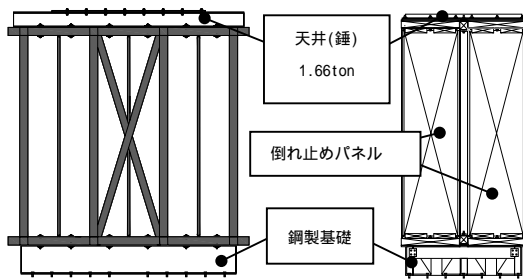
各試験体の保有耐力、評点、固有周期を Table 4 に示す。なお、Table 4 中の灰色網掛け部は静的実験結果から、白色部は診断基準から算出した。ここで評点は(保有耐力/必要耐力)で算出される。なお、建物質量は後述する錘の質量とした。

Table 4 Seismic Capacity Indices

試験体名	耐震診断(0.91m壁1枚分)					弾性時	
	必要耐力	保有耐力		評点		固有周期 [sec]	
	[kN]	[kN]	[kN]				
筋交い・金物なし	3.32	3.26	1.84	0.98	0.55	0.30	0.48
筋交い・金物あり		5.82	4.89	1.74	1.46	0.23	0.32
筋交い・ベルト接合		-	5.60	-	1.68	-	0.31
ベルト筋交		-	2.47	-	0.74	-	0.39

3.3 実験方法

試験体設置後の状況を Fig. 3 に示す。実験は各種耐震要素を組み込んだ軸組を、直交方向への倒壊を防止するために構造用合板を用いて作成したパネルで接合した。試験体上部に負荷させる錘の質量(1.66ton)については、耐力壁の終局時の応答性状を把握する目的と振動台の許容転倒モーメントを考慮した上で設定した。



立面図 右：加振方向 左：加振直交方向

Fig. 3 Experimental Apparatus

入力する地震波は、試験体の異なる固有周期に対しても一定の応答加速が生じるように、建築基準法の限界耐力計算を参考に第2種地盤に対する目標加速度スペクトルに近似するような応答スペクトルを持つ模擬地震動(以後、告示波)を作成し^[3]これを使用した。

4. 実験結果

Table 5 に実験結果の概要を Fig. 4 に履歴ループの例を、Fig. 5 に各入力地震波倍率での最大慣性力と最大層間変形のグラフを示す。なお Table 5 に示す慣性力については、試験体上部で計測した加速度と試験体に負荷した錘の質量(1.66ton)から算出した。また、Fig. 5 中の Sa-Sd 曲線については、入力地震波である模擬地震波(告示波)作成の際に用いた目標加速度応答スペクトル(減衰定数 h=5%)から求めたものを表している。

[筋交い・金物なし]

[筋交い・金物あり]や[筋交い・ベルト接合]に比べ初期剛性が低く、75%入力で筋交い接合部の抜け出しが生じ、筋交いが交差する部分の間柱が折損した。ここで耐力の低下が確認されたので加振を終了した。

筋交いの耐震性能を十分に発揮させ維持するためには、柱頭・柱脚部や筋交い端部の接合強度を確保する必要があることを改めて確認できた。

[筋交い・金物あり]

75%入力から剛性が低下し始め、100%入力で振動台の加振能力の限界に達したため、100%入力を繰り返した。それにより、筋交いプレートの釘の抜けが生じ始め、少し

ずつ最大変形が増加し、耐力はほぼ頭打ちとなった。

以上より、ホールダウン金物や筋交いプレートなどの接合金物の効果が確認された。

[筋交い・ベルト接合]

接合金物に代わりベルトで接合部を補強した[筋交い・ベルト接合]は、[筋交い・金物あり]に比べ、Fig. 5(a)に示すように初期剛性は高いが、100%入力から剛性が低下し、その後の繰り返し入力によって筋交いの折損に至った。しかし、ベルト補強材の接着に剥れはほとんど見られなかった。

また、100%入力から負方向における剛性が著しく低下する結果となったが、これは面合わせ用木材にベルト補強材を接着した部分が、引張力に対し弱点となったためと考えられる。

以上のように、[筋交い・金物あり]と比較すると、正方向においては同程度の応答を示したため、ベルト補強材の施工方法を工夫すれば、ベルト接合は金物接合同等の性能を期待できると考えられる。

[ベルト筋交]

[ベルト筋交]は、Fig. 4(d)の履歴ループに示すようにスリップ性状が顕著であるが、これはベルト補強材施工時に生じるたわみによるものと見られる。エネルギー吸収能力が低く、同一の入力倍率に対して最大応答加速度は[筋交い・金物あり]に比べて大きくなるが、ベルトが剥れるまで弾性的挙動を示し、最大耐力は[筋交い・金物あり]と同等あるいはそれ以上となった。

Table 5 Summary of Experimental Result

試験体名	入力倍率	層間変形[mm]		慣性力[kN]	
		正	負	正	負
筋交い・金物なし	25%	18.68	20.30	5.21	4.62
	50%	48.53	45.63	9.28	8.22
	75%	112.18	97.48	11.31	9.67
筋交い・金物あり	25%	9.16	9.14	3.75	4.33
	50%	20.27	21.86	8.67	9.53
	75%	32.89	36.41	13.01	14.15
	100%	50.90	59.91	16.88	19.29
	100%	64.11	70.82	18.63	20.15
筋交い・ベルト接合	25%	5.73	7.92	4.70	5.37
	50%	12.47	17.01	8.91	8.87
	75%	23.11	33.01	13.80	11.64
	100%	78.38	85.37	18.96	13.38
	90%	81.46	80.80	19.04	12.03
	75%	81.33	76.37	18.03	10.86
	80%	89.18	131.24	17.06	10.03
ベルト筋交	75%	86.19	149.99	15.71	6.27
	25%	31.17	25.68	8.48	9.85
	50%	44.35	38.72	14.88	17.75
	50%	48.09	39.09	15.25	18.09
	50%	54.48	43.55	18.36	20.19
	70%	59.14	46.83	18.36	20.80
	70%	60.01	47.77	18.77	20.70
	70%	83.94	51.89	17.65	23.31
	50%	82.45	41.37	10.60	16.13
応急補強	60%	116.61	50.06	11.60	21.00
	25%	33.83	33.61	6.99	6.71
	50%	66.34	67.26	13.23	13.48
	65%	77.98	79.32	14.97	15.30
	70%	84.25	87.22	15.74	16.00
	75%	88.79	92.37	16.45	16.78
応急補強	80%	94.77	97.46	17.21	17.40
	90%	110.18	114.81	18.92	19.47

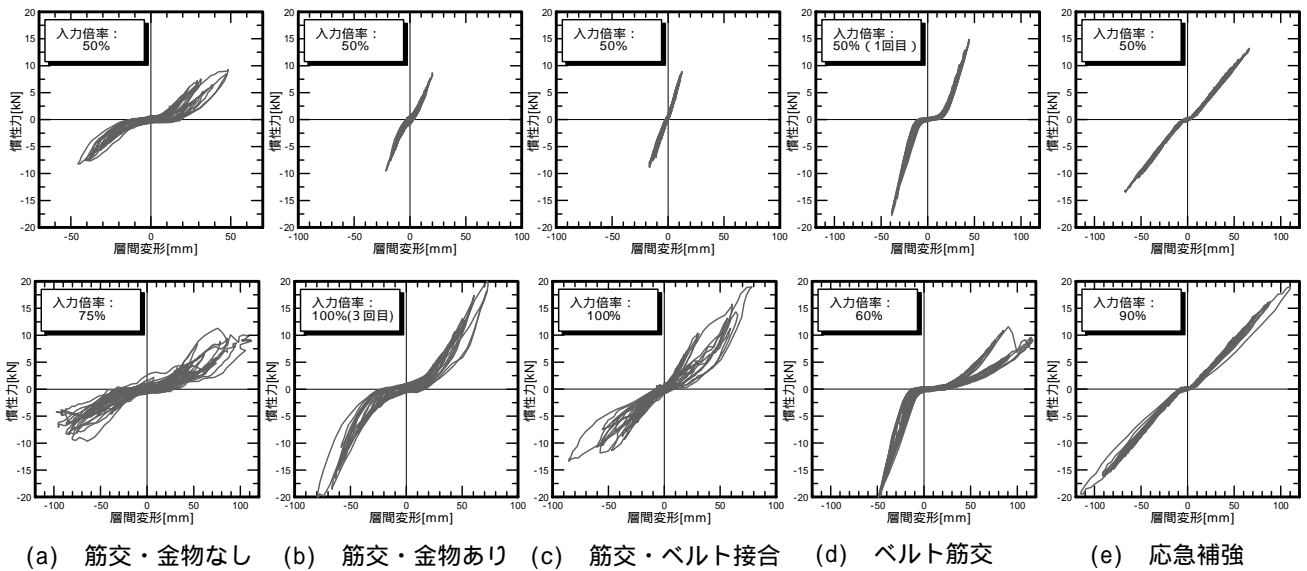


Fig. 4 Inertia Force – Lateral Displacement

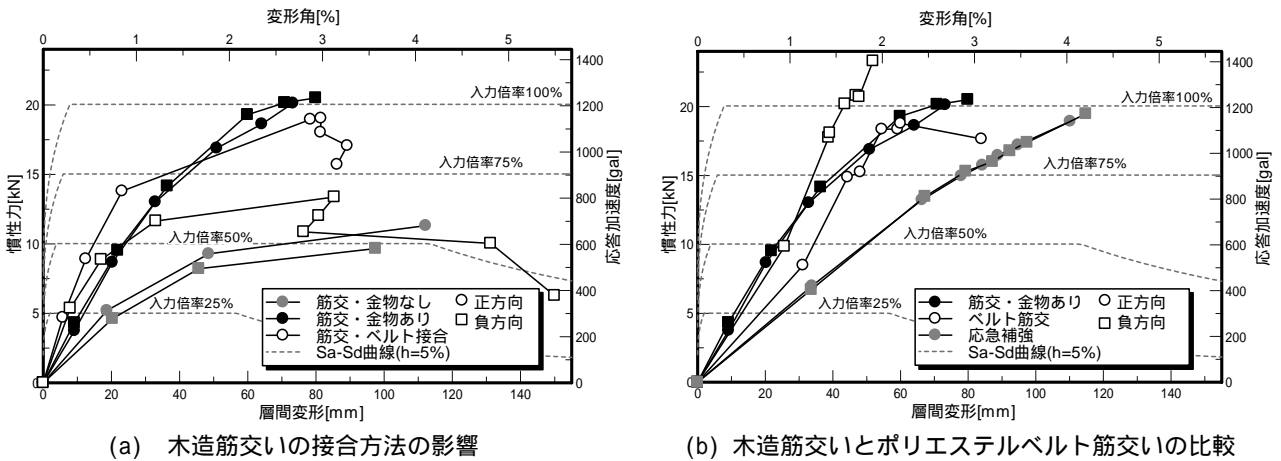


Fig. 5 Inertia Force – Displacement

70%入力から正方向で引張りに効くベルト補強材が剥れ始め、最終的にはベルトが剥落した。ベルト補強材を重ねて接着した部分が剥れやすく、それが片側に集中していたためであり、施工段階でこれを改善すれば、[筋交・金物あり]以上の性能が期待できると考えられる。

[応急補強]

[応急補強]は、ベルト端部を引張りながら木材に巻き付けて定着するために、接着のみによる[ベルト筋交]と比較してベルトの初期たわみが抑制され、Fig. 4(e)に示したように履歴ループのスリップ性状は少なくなった。しかしながらベルトの弾性的挙動が卓越し、エネルギー吸収能力が少ない点は[ベルト筋交]と同様である。また、[ベルト筋交]と比較すると筋交いを構成するベルトの断面積が1/4と少ないため、試験体の剛性はさらに低くなる。加えて、等価粘性減衰係数 h_{eq} が小さいことから同一の地震波入力倍率に対する応答加速度および変形は、木造筋交い試験体と比較するとかなり大きくなる傾向がある。しかし、90%入力で115mm程度(変形角 1/50)と比較的大きな変形が生じるものの、ベルト補強材の損傷は全く見られず、余震に対する倒壊防止という点ではこの補強法が十分に有効な手法となりうると考えられる。

5 まとめ

本研究で行った振動実験結果から、ポリエステルベルト補強材を用いる本補強工法について以下の知見を得た。
 ・ベルト補強材で接合部を補強することによって、金物接合同等の補強効果が期待できることを確認できた。
 ・耐震筋交いの代わりとしてベルト補強材を用いることで、これと同等の補強効果が期待できることを確認できた。
 ・耐震要素、接合部要素共にベルト補強材を用いた[応急補強]は余震に対する倒壊防止という点では十分に有効な手法となりうると考えられる。

参考文献

[1] 佐藤晃章他：ポリエステル繊維織物を用いた既存木造建物の耐震補強工法の開発その1~5、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp131-140、2005.9
 [2] 財団法人日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法、木造住宅の耐震精密診断と補強方法(改訂版)、2004.3
 [3] 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、朝倉出版