

近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 14 年度		番号 氏名	98168006
指導教官	藤井 大地 助教授		飯田 健太郎
題名	プレハブ住宅への間伐材の利用に関する研究		

1. はじめに¹⁾²⁾

近年、日本の造林面積は、約 1000 万 ha を超え、その過半数が間伐期を迎えている。しかし、間伐には労働力や資金がかかり、間伐がなかなか進んでいないのが現状である。このまま間伐をしなければ森林はその機能を低下させ、間伐の作業はますます困難になるという悪循環に陥ってしまう。これまでの、間伐材の主な活用法としては、コンクリート型枠用部材やガーデニング製品、ベンチ、食器などがある。しかし、住宅用の建材としては、コストの面や間伐材自体が細く、節や湾曲が多いため製材の段階で利用できる物が限られてしまうだけでなく、強度も落ち、長さもそう長い物は取れないため、北海道を除いては、ほとんど利用されていないのが現状である。

そこで本研究では、このような間伐材を住宅構造壁部材として利用することを検討する。一般に壁式構造では、ツーバイフォー工法やプレハブ構法が用いられているが、間伐材は上に述べたような欠点を有するため、このままでは利用できない。これを解決するために壁材の構成を見直し、骨組の新たなレイアウトを探ることにより、間伐材をより有効に利用できる方法を模索する。本研究では、このような最適なレイアウトを考える上で、有限要素法による位相最適化手法を用いる。さらに壁式構造の開口部を大きくとれないというデメリットがあったが、このような手法を用いることにより、補強による重量増加を抑え、強度を落とすことなく開口部を大きく取れる新しい壁式構造を提案する。

本論文の構成は第 2 章では、間伐の必要性や間伐が進まない理由、間伐材の利用状況を調査することで、現時点での間伐状況や間伐材の置かれている問題を明確にし、建材として利用価値があるかを検討する。第 3 章では、壁式構造（プレハブ住宅）で開口部が大きく取れるようなものを提案するため、現時点での特徴を把握し、間伐材が使用可能な部分を模索する。第 4 章では、第 3 章での調査を元に壁式構造の基本モデルを作成し、最大応力と許容応力度との比較を示した上で、有限要素法による位相最適化手法を用い、壁骨組の最適レイアウトを行う。最後に、基本モデルと最大応力の比較を行い、新しい壁式骨組の設計案を示す。第 5 章では、以上の結論を述べる。

2. 間伐材について

2.1 間伐の役割¹⁾

間伐とは、込み合って成長に支障が出ることが予想される森林で、ある程度の間隔で間引きをすることである。世界で 34 億 5 千万 ha、日本では国土面積の 7 割弱にあたる 2515 万 ha を占める森林は人間をはじめ生物が生きていくうえで欠か

せない機能をいくつも担っている。もっとも大きな役割は大気の浄化作用であり、森林は地球温暖化の大きな要因となる二酸化炭素を吸収し光合成をして酸素を作り出す。日本では車などが年間 1 億 3500 万の二酸化炭素を排出しているが、森林はそのうち 1 億トンを吸収し 7300 万トンを放出している。山地に降った雨を地中にためるダムの役割も重要であり、豊かな森林では雨水のうち 60% を地下水として蓄え、水質の浄化を行う。さらに土砂災害防止、野生生物の生息などがあり、森林にはかなりの価値があるとされている。

間伐をしなければ森林は、これらの機能を十分に発揮できない。木々が密集すれば 1 本ずつに栄養が行き届かず、細長く弱い、風雪で折れやすい木に育つ。地面には日光が届かず、下草が生えないため地表が雨で流されやすくなる。それにより、脆弱な地面になり、土砂災害なども誘発する。

2.2 現時点での間伐材の利用¹⁾

間伐材が安定した価格で売れば、間伐も進む。国も 2001 年 4 月に都道府県や自治体に間伐材の利用促進を義務付けた「グリーン購入法」を施工するなど、後押ししている。そして現在、安定して大量の木材を利用できる物として期待されているのが、公共事業への利用で、京都府は、治山ダムへの間伐材利用を本格的に始めている。現在間伐材を建材として使っている例は少ない、しかし全国的にも北海道は先進的で間伐材を建材として加工している会社や日本で唯一の間伐材を利用したツーバイフォー工場を持つ会社も存在している。その理由としては、様々な問題がありながらも本州や九州に比べると流通や間伐作業の段階で比較的成本を抑えることができ、建材としての品質も安定しているためである。

2.3 間伐が進まない理由¹⁾

一口に間伐材問題といっても本州と北海道では大きく異なっている。まず根本的に違うのが、本州の間伐材は「杉」であり、北海道では「ドドマツ」をさしている。北海道ではすでに、2×4 部材や一部プレハブ住宅メーカーの構造材としてドドマツの間伐材から製材が生産されている。しかし、本州の杉に関しては径級の面からいっても製材することも無理であるし、プレハブ住宅部材（構造材）を生産しているメーカーはない。北海道のドドマツ間伐材と本州の杉間伐材とでは、樹種による違いは当然あるが、最も根本的な問題は製材工場まで持ってきた段階での原木価格にある。北海道でドドマツ間伐材を製材工場に仕入れる場合は、12～13cm の径級で 7000 円以下であり、14～24cm の径級で 9000 円以下くらいの価格である。本州・九州でスギ間伐材を製材工場に仕入れる場合は、14～16cm の径級で 12000 円前後（すべて立方メートル当たり）であり、価格の差も歴然である。

また、間伐にもいろいろ種類があり、択伐といって森の中

で一定の本数に対して1本という割合で切る木を選んで伐採していく方法や一伐二残とって、三列植えてある内、一列のみを間伐して二列を残し、また一列切るといった方法等などがある。実際択伐というのはうっそうとした森の中をやぶを漕ぐように歩いて行き一本伐採してはまた歩くという作業の繰り返しで、そしてそれを集材するにも一本ずつ拾い集めるようにしていくものである。北海道では、比較的開けたところでパーベスタやユンボ等の重機を使用して作業しているが、本州では谷にワイヤーを渡して集材しているなど大変困難な作業である。

もうひとつ流通の問題として、間伐材は、末端消費者（個人）には割と好まれているのだが、中間業者（流通）には評判がよくない。環境問題であるとか山を守るためであるなど見掛けは格好の良いことばかりだが、実際には、やはり間伐材は材質が良くない。価格が国内製材に比べると安いといったイメージだけで、売りにくいといった現場の声が多い状況である。環境問題ははまだ一部の人間にしか関係ない問題であり、環境問題を言っている企業でさえ判断基準は価格であるというのが現状である。このようなコスト、流通の問題を解決するためには、全国の木材関連会社や国、各都道府県が協力し大きな生産体制を作らなければ不可能であるといえる。

3. 壁式構造住宅について

3.1 2×4 工法の概要^{3) 4)}

2×4（ツーバイフォー）工法（図-1）は、壁の面と床の面とで組み立てる壁式構造の工法である。この工法の名前は、その壁の枠材に多く使われる構造用製材の北米での呼び名がtwo by fourであることに由来して、壁の主要部材に2×4インチの断面を持った木材を用いることからつけられている。在来工法が柱・梁工法なのに対して、この工法は壁構造で主に2×4インチの部材を枠組みとして、構造用合板や石膏ボードを釘打ちし、これを耐力壁として構成するものである。床も同様に剛性を持つようにし水平力を負担する。

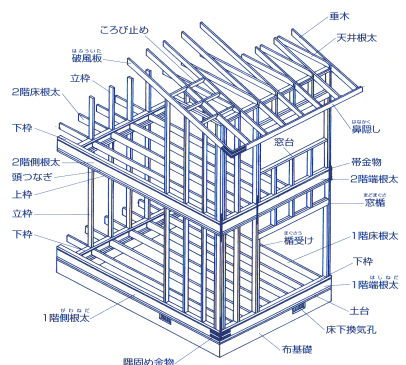


図-1 2×4 工法



- 2×4 インチ材 (38mm × 89mm)
- 2×6 インチ材 (38mm × 140mm)
- 2×8 インチ材 (38mm × 184mm)
- 2×10 インチ材 (38mm × 235mm)
- 2×12 インチ材 (38mm × 286mm)
- 4×4 インチ材 (89mm × 89mm)

図-2 部材の寸法

各部の接合は、釘打ちを主体として、要所に補強金物を使用している。釘については緊結する部分によって、本数、種類、規格、打ち込み方法などが決められている。通常であれば、建築の構造方法を構法というが、2×4 工法の場合は構造方法よりむしろ施工方法のシステムに近いので工法と呼ばれている。その他の部材断面には2×6（ツーバイシックス）、2×8（ツーバイエイト）、2×10（ツーバイテン）などがあり、サイズは図-2の通りである。

在来工法等に比べると、耐震性、気密性に優れていて比較的広い空間を確保でき、工期も約80～120日と施工性も高い。工場加工しているため現場での作業も少なく、性能も安定している。しかし、壁で支える耐力壁のため開口部のとり方に制限があるために窓等が広く取れず、増改築の際にも制約されることが多い。

3.2 木質パネル工法の概要^{5) 8)}

木質パネル工法（図-3）は、構造体に柱や梁は使わず、床、壁、天井を規格化したパネルとして工場生産し、現場に搬入して組み立てるプレハブ構法である。面で支える構造なので基本的には2×4工法と同じで、壁の合板が耐力材として働く枠組壁工法である。相違点としては、2×4工法が現場で構造パネルを組み立て、構造用合板に釘打ちするのに対して、木質パネル工法では構造パネルを工場組み立て、合板は接着剤で枠材に固定するものであり、枠材そのものも2×4工法の枠材より細い。部材は一定のモジュール寸法が決められており、モジュールの倍数単位で寸法が決められている。木材は工場内で一定に乾燥されたものを使用し、パネル内部に断熱材を入れ工場内で加圧接着されている。建具もあらかじめパネル化（図-4）するなど現場での作業を極力減らす工夫がされている。パネルは大型のものから小型なものまで各種あり、様々な仕様に対応でき、特に大型のパネルにはクレーン等も利用する。基本的には壁式構造住宅なので、耐震性、耐風性、耐火性、気密性、断熱性などの性能は、2×4工法とほとんど同じであるが、木質パネル工法はパネルをほとんど工場製作してしまうので、品質にばらつきがなく、断熱性や気密性に関してはより精度が高い。その上、現場での作業が少ないため工期も約60日で短いというメリットがある。しかし、2×4工法と同様に開口部が大きく取れず、増改築が難しいといった難点があり、さらにパネルの設置にクレーンを使用するため、車の入らないような敷地では作業が難しくなる。



図-3 木質パネル工法



図-4 壁パネル

3.3 木質ユニット工法概要⁵⁾⁶⁾⁷⁾

ユニット工法(図-5)は、工場ではユニットを生産して、現場で各ユニットをボルトで連結していくプレハブ構法である。構造材の種類によってユニット工法には、軽量鉄骨系のラーメン構造と、木質系の木質2×4ユニット等に分かれる。この工法は、住宅をいくつかのユニットに分け、あらかじめ電気配線やガスなどの設備を組み込んだ機能別のユニットを造り、各ユニットごとに内装材や建具設備も設置してしまうために家全体の7~8割が工場生産される。内装仕上げの多くも出荷時には完了しているため現場での作業も非常に少なく、品質も安定している。工期も標準で40日から60日と短期間であり、建て方も基礎の上にクレーンで吊り上げたユニットをおいて接続するだけなので施工のばらつきも少ない。だが工場では組み上げたユニットを輸送する関係で、運搬や設置する際に道路や敷地に十分なスペースが必要である。



図 5 木質ユニット工法

4. 新しい壁式構造の提案

4.1 設計条件⁹⁾

本研究では2×4住宅を対象に、間伐材を利用した新しい壁式構造を提案する。新しい壁式構造の有効性を検討するために従来の壁式工法の基本構造との比較を行う。まず解析を行うために、次節では基本構造を参考にして基本モデルを作成する。その際に寸法や荷重の計算など必要な数値を図-6と表-1に示す。なお、斜材、補強材に関しては1×4材を使用する。

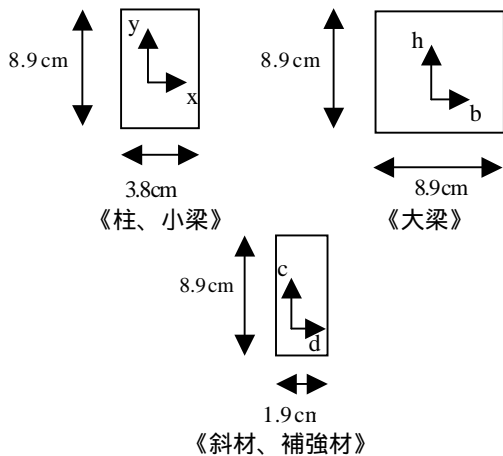


図 - 6 部材寸法

表 - 1 設計における必要数値

ヤング係数	$E = 1 \times 10^5 \text{ (N/cm}^2\text{)}$	【木(ベイマツ)】
断面積	$A_1 = 3.8 \times 8.9 = 33.82 \text{ cm}^2$	【柱、小梁】
	$A_2 = 8.9 \times 8.9 = 79.21 \text{ cm}^2$	【大梁】
	$A_3 = 1.9 \times 8.9 = 16.91 \text{ cm}^2$	【斜材、補強材】
断面2次モーメント	$I_y = \frac{8.9 \times (3.8)^3}{12} = 40.7 \text{ cm}^4$	$I_x = \frac{8.9 \times (8.9)^3}{12} = 522.85 \text{ cm}^4$
	$I_z = \frac{8.9 \times (1.9)^3}{12} = 5.09 \text{ cm}^4$	
	$Z_y = \frac{40.7}{1.9} = 21.42 \text{ cm}^3$	
断面係数	$Z_y = \frac{40.7}{1.9} = 21.42 \text{ cm}^3$	$Z_x = \frac{522.85}{4.45} = 117.49 \text{ cm}^3$
部屋面積	$S = 3.6 \times 3.6 = 12.96 \text{ cm}^2$	
積載荷重	物品荷重 × 集中係数 + 人間荷重 × 集中係数	
居室の場合(床)	積載荷重 = $30 \times 6 + 35 \times 0 = 180 \text{ (kgf/m}^2\text{)}$ $= 12.96 \times 9.8 \times 180 = 22861.44 \text{ (N)}$	
単位容積重量	(ベイマツ) = 4.9 KN/m^3 梁の長さ = 3.6m 小梁の使用本数 = 7本 大梁の使用本数 = 4本 (小梁8本分)	
固定荷重	$0.003 \times 3.6 \times 4.9 \times 15 = 0.7938 = 793.8 \text{ (N)}$	
全荷重	積載荷重 + 固定荷重 = $22861.44 + 793.8 = 23655.24 \text{ (N)}$	
一枚の壁にかかる荷重	全荷重 ÷ 4 = 5913.81 (N)	
設計時、施工時等の荷重のばらつきを考慮するので、一枚の壁にかかる荷重	= 6520 (N) とする。	

4.2 壁骨組の最適レイアウト⁹⁾

本論文では、3パターンの基本モデルを作成し、解析を行っているが、ここでは開口部を設置した場合の基本モデル1(図-7)と高さを調節した基本モデル2(図-9)について、有限要素法による骨組解析により、長期荷重と短期荷重における柱、梁の解析を行った結果を示す。最大応力は、基本モデル1を表-2、表-3に、基本モデル2を表-4、表-5にそれぞれ示している。この基本モデルをもとに、有限要素法による位相最適化手法を用いて、壁骨組の最適レイアウトを行う。様々な設計条件について解析を実施した中で、最大応力が大幅に低減し、尚且つ施工性が高いと思われる設計案を示す。基本モデル1に関して位相最適化を行ったものを図-8に示し、最大応力を表-2、表-3にまとめる。基本モデル2に関しては、比較対象を、開口部を縦に45cm横に90cm拡げ、位相最適化を行ったものを図-10に示す。また、最大応力を表-4、表-5にまとめる。応力の単位についてはすべて N/cm^2 とする。

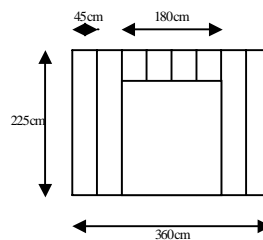


図 - 7 基本モデル 1

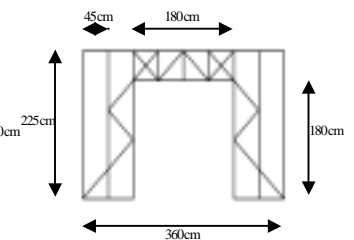


図 - 9 設計モデル 3

表 - 2 応力の比較表【長期許容応力度 = $814 \text{ (N/cm}^2\text{)}$ 】

(柱) 【短期許容応力度 = 1480 (N/cm²)】

	モデル1 長期	モデル1 短期	モデル3 長期	モデル3 短期
N	4.640×10 ³	2.691×10 ³	2.659×10 ³	5.499×10 ³
M	9.238×10 ²	4.494×10 ⁴	3.203×10 ²	8.321×10
N/A	137.28	79.62	78.67	162.69
M/Z	43.13	2098.04	14.95	3.88
	180.41	2177.66	93.62	166.57

表 - 3 応力の比較表【長期許容応力度 = 649 (N/cm²)】

(梁) 【短期許容応力度 = 1180 (N/cm²)】

	モデル1 長期	モデル1 短期	モデル3 長期	モデル3 短期
N	3.409×10	2.223×10 ²	1.273×10 ³	2.452×10 ²
M	2.628×10 ²	4.859×10 ⁴	2.607×10 ³	5.047×10 ³
N/A	0.43	2.81	16.07	3.10
M/Z	223.68	413.57	17.59	42.96
	223.25	410.76	33.66	46.06

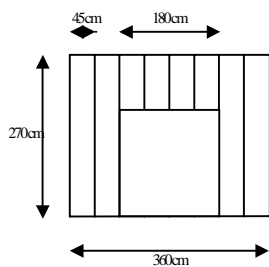


図 - 8 基本モデル 2

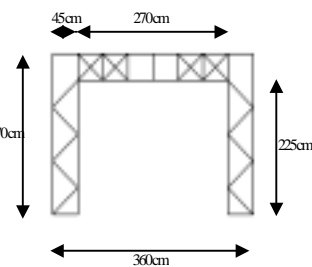


図 - 10 設計モデル 4

表 - 4 応力の比較表【長期許容応力度 = 814 (N/cm²)】

(柱) 【短期許容応力度 = 1480 (N/cm²)】

	モデル2 長期	モデル2 短期	モデル4 長期	モデル4 短期
N	2.170×10 ³	2.900×10 ³	3.443×10 ³	8.292×10 ³
M	2.753×10 ³	5.177×10 ⁴	5.283×10 ²	8.217×10
N/A	64.20	85.80	101.86	245.33
M/Z	128.52	2416.90	24.66	3.84
	192.72	2502.70	126.52	249.17

表 - 5 応力の比較表【長期許容応力度 = 649 (N/cm²)】

(梁) 【短期許容応力度 = 1180 (N/cm²)】

	モデル2 長期	モデル2 短期	モデル4 長期	モデル4 短期
N	4.013×10	2.651×10 ²	2.959×10 ³	2.942×10 ³
M	2.409×10 ⁴	6.352×10 ⁴	7.403×10 ³	8.022×10 ³
N/A	0.51	3.35	37.36	37.15
M/Z	205.04	540.64	63.01	68.28
	204.53	537.29	100.37	105.43

以上の結果より、まず、基本モデル 1 と設計モデル 3 に関

して最大応力を比較すると、柱において長期荷重の場合に基本モデル 1 の約 50% になり、短期荷重に関しては基本モデル 1 の約 10% になった。梁においては長期、短期荷重ともに基本モデル 1 の 10% まで下がった。次に、基本モデル 2 と設計モデル 4 の最大応力の比較を行った結果、柱において、長期荷重の場合、基本モデル 2 の約 60% になり、短期荷重の場合、基本モデル 2 の 10% になった。梁においては、長期荷重の場合に基本モデル 2 の 50% になり、短期荷重においては、基本モデル 2 の 20% になった。この結果から、すべて許容応力度内に収まったことで、壁式構造の開口部を広く取れないというデメリットを解決することが可能であるといえる。

5. 結論

本論文では、間伐の促進のために、間伐材を住宅構造壁部材への利用を視野にいれ、壁式構造の構成を見直し、より有効に利用できる方法を検討した。その結果、間伐材の現状や壁式構造の特性を把握する事で、間伐材が壁式構造の枠材として利用できる事がわかった。また壁式構造の最適レイアウトを考える上で有限要素法による位相最適化手法を用いて、間伐材を補強材として使う事により、最小限の補強で、従来の壁式構造より大幅に応力を下げることが可能にした。さらに壁式構造の開口部を大きく取れないというデメリットをこのような手法を用いることにより、強度を落とすことなく開口部を大きく取れる新しい壁式構造の提案を行った。

今後の展望としては、間伐材の調査結果から、間伐がほとんど進んでないことや、間伐材への意識の薄さ、間伐することでのコストが問題であることがわかったため、この問題を解決するために、より多くの有効な利用法を検討する必要性がある。また、本論文で提案した壁式構造の提案を実現化するためには、補強材の施工性を考慮した接合方法を考える必要がある。

謝辞 本研究をまとめるにあたり、広島県森林整備室 玉垣雅史様、株式会社関木材工業常務取締役 山内聖昭様、株式会社ヨシダ専務取締役 吉田弘長様にご協力頂きましたことをここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 朝日新聞 (3月28日 23面 森の間伐はなぜ必要?)
- 2) 間伐推進研究会, 間伐材の有効活用事例集, 地球社, 1983年
- 3) 平野組住宅事業部 (peco.hiranogumi.co.jp)
- 4) 大脇賢次, 建築・土木の仕組み, 日本実業出版; 1999年
- 5) リフォームネット (www.reform-net.com)
- 6) アサヒ家ネット (www.asahi-ie.net)
- 7) 新潟積水ハイム (www.niigata-sekisui.co.jp)
- 8) プレハブ建築協会 (www.purekkyo.or.jp)
- 9) 藤井大地, パソコンで解く構造デザイン, 丸善株式会社, 2002年