

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21380105

研究課題名（和文） 動的応答特性を考慮した木材接合部の耐力評価

研究課題名（英文） Estimation of lateral resistance of timber joints considering dynamic responsive characteristics

研究代表者

平井 卓郎 (HIRAI TAKURO)

北海道大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号：20173205

研究成果の概要（和文）：

木材の釘接合部について、調和波とホワイトノイズ合成波を用いた動的実験を行い、以下のような知見を得た。(1)木材の釘接合部の動的応答は明らかな周波数依存性を持つ。(2)調和振動を受ける釘接合部は、倒壊限界時剛性相当の周波数に共振して、静的加力と同様な破壊を生じる。(3)損傷限界時剛性相当の周波数に対しては、釘接合部は一旦共振して損傷するが、繰り返し劣化による共振周波数の低下により、静的加力と同様な破壊は生じにくくなる。しかし、入力加速度が小さくても累積サイクル数が増すと、釘の低サイクル曲げ疲労破壊を生じる危険性が生じる。(4)地震動に近いホワイトノイズ合成波でも、各周波数成分に対応して、上記と同様な挙動を示す。(5)複数の接合要素を含む構造モデルである合板釘打ち耐力壁も、上記の接合部単体の動的応答と同様な挙動を示す。上記の結果から、木質構造物では接合部単体から耐力壁までの各階層において、非線形の荷重-変形関係と動的繰り返し劣化により、損傷限界と倒壊限界では応答特性が異なること、入力レベルが損傷限界以下でも、長時間または繰り返し地震力が作用すると、釘の低サイクル曲げ疲労破壊による倒壊を招く危険性があることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

Dynamic tests of nailed joints are conducted under harmonic and white-noise waves. The principal results are as follows: (1) Dynamic response of nailed timber joints is clearly frequency dependent. (2) Under harmonic waves, nailed timber joints break in failure modes typical under static loading in resonance with the frequencies corresponding to safety limit stiffness. (3) Nailed timber joints once respond sensitively to the frequencies corresponding to damage limit stiffness, however, they do not break immediately in failure modes typical under static loading because of cyclic degradation. On the other hand, nailed timber joints may break in low-cyclic bending fatigue failure when they are subjected to many cycles, even if input accelerations are low. (4) The dynamic behavior above under harmonic waves is observed under white-noise waves consisting of similar frequency components. (5) Dynamic behavior of nailed shear walls, which are a model of multiple joint systems, behave in the same way as predicted from the behavior of single nailed joints. These test results show that the responsive characteristics of timber constructions vary due to change in equivalent stiffness along the static load-slip curves of single joints, structural subassemblies and whole structures. Test results also show that the low-cyclic bending fatigue failure of nails may lead timber constructions to critical collapse when the seismic forces act for many seconds and/or repeatedly, even if the maximum accelerations are below the damage limit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	9,900,000	2,970,000	12,870,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：強度・木質構造

1. 研究開始当初の背景

我が国では、阪神淡路大震災後、実大木造住宅や小型構造モデルの振動台実験が多数行われ、地震力に対する木質構造の動的挙動の理解や現行耐震規定の妥当性の検証という点で大きな成果をあげて来た。しかし、それらは限定された仕様に対する安全性の検証が中心となっており、構造各部、特に耐震性能上重要な接合部の動的挙動の理解が不十分であった。そのため、木質構造の耐震設計では、静的耐力性能に基づく接合部設計と実大構造物の概括的な耐震性能検証とが有機的に結び付いておらず、詳細な積み上げ型の耐震性能確認を行うことが出来ずにいた。

地震力に対する木材接合部の耐力性能評価で重要な点は、周波数依存性や繰り返し劣化などの木材接合部の動的応答特性に関する基本的な資料が欠落していたことである。

2. 研究の目的

本研究では上記の背景から、木質構造の耐震性能を支配する木材接合部の動的応答特性を実験的に把握し、この動的応答特性が、木質構造の耐震メカニズムにどのように関わっているのかを明らかにすることを目的とした。研究期間内には、木質構造で一般的な合板－木材釘接合部を中心として、調和波とホワイトノイズによる振動台実験を行い、木材接合部の動的挙動に与える入力加速度や入力波の周波数、サイクル数の影響について実験的検討を行うことにした。

3. 研究の方法

この研究では、以下のような実験を行った。
(1)合板－木材釘接合部の静的1面せん断実験

初めに標準的な試験方法によって、合板を側材、木材を主材とする静的1面せん断実験を行った。使用材料は9.5mm厚カラマツ (*Larix*

kaempferi) 合板 (平均比重：0.51、平均含水率7.5%)、トドマツ (*Abies sachalinensis*) 製材 (平均比重：0.40、平均含水率8.2%)、枠組壁工法用 CN50 釘 (釘径：2.87mm、釘長：51.0mm) である。試験体数は12体とした。組み立てられた釘接合部試験体には、木材および合板表板の繊維方向に平行に単調負荷を加え、12体の実験結果を平均して、コントロール荷重－すべり曲線とした。

(2)合板－木材釘接合部の調和波による1面せん断振動実験

図-1のような油圧式小型一軸振動台を用いて振動実験を行った。試験体は静的1面試験と同じ方法で釘接合し、主材である木材を振動台に固定した。一方、側材である合板は質量を与えるために可動式レールの上に置かれた鋼製治具に固定した。釘接合部に動的加力を行うための質量は、図-1に示される鋼板の枚数で調整した。振動台に固定された主材(木材)に加わる入力加速度、釘接合部を介して力の伝わる側材(合板)の応答加速度、主材－側材間のすべりをひずみゲージ式の加速度計(容量2G)と変位計(ストローク50mm)を用いて測定した。



図-1 釘接合部の振動台実験

静的実験から得られた最大荷重、接合部すべりに対応した等価割線剛性と振動台の能力を総括的に検討し、動的加力用の質量、入力加速度次のように決定した。質量：202kg、入力加速度：165gal、330gal、495gal。こ

の質量と入力加速度の積は、それぞれ静的最大荷重の1/3、2/3、最大荷重に対応する。入力調和波の周波数は、2、3、4、5、6、7 Hzとした。

上記の実験条件につき、各6体の一軸振動台実験を行った。試験体が破壊しかつた場合は、150秒で加振を打ち切った。

(3)合板一木材釘接合部のホワイトノイズ波による振動実験

前出と同様の試験体について、ホワイトノイズ合成波による振動台実験を行った。ホワイトノイズの周波数成分は、静的1面せん断実験で得られた荷重-すべり曲線と一般的なベースシアスペクトル分布を考慮し、1.0 Hzから8.0 Hzまで、0.5 Hz刻みとした。これらの周波数成分を等加速度、ランダム位相で組み合わせ、合成されたホワイトノイズ波の最大加速度が調和振動における入力加速度165 gal（静的最大荷重の1/3相当）、333 gal（静的最大荷重の2/3相当）、495 gal（静的最大荷重相当）と等しくなるようにした。

実験条件毎に6体の試験体について、20秒加振と20秒静止を一組とし、試験体が破壊するまで、または5回の繰り返し加振を行った。

(4)合板釘打ち耐力壁モデルのホワイトノイズ波による振動台実験

合板一釘接合部単体の動的応答特性と木質耐震要素の動的応答特性との関係を確認するため、上記(1)、(2)と同様な釘接合によって構成される、図-2のような合板釘打ち耐力壁モデルの1軸振動台実験を行った。この実験では、静的実験から得られた釘1本あたりの荷重-すべり曲線を用いて、耐力壁の荷重-変形角曲線を推定し、この荷重-すべり曲線から最大荷重と変形角に対応する等価割線剛性と共振周波数を概算した。ホワイトノイズ波の合成方法は(3)の釘接合部単体に対する入力波の合成方法と同様である。合成波の最大加速度は推定された静的最大荷重の1/3および2/3とした。



図-2 釘打ち耐力壁の振動台実験

4. 研究成果

研究成果は以下の通りである。

(1)合板一木材釘接合部の静的1面せん断曲

線

静的実験で得られたコントロール荷重-すべり曲線を図-3に示す。この荷重-すべり曲線から、静的最大荷重の1/3、2/3、最大荷重の概算値は333、667、1000 Nとなった。図中の1点鎖線は共振周波数7、6、5、4、3、2 Hzに対応する等価剛性を示している。

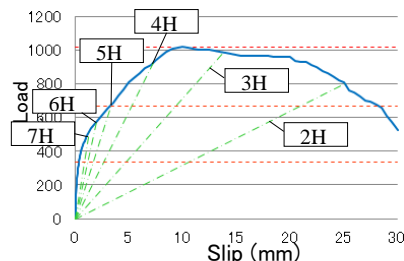


図-3 静的荷重-すべり曲線

(2)調和波に対する合板一木材釘接合部の動的応答

振動台実験で得られた主材側の入力加速度と側材側の応答加速度の例を、入力加速度330 galに対して図-4に示す。図中のレンガ色の実線が入力加速度、青の破線が応答加速度である。合板一木材釘接合部の動的応答には特徴的な周波数依存性が見られた。図-4(a)（入力周波数3 Hz）では、釘が共振により低サイクル曲げ疲労破壊したが、周波数が高くなると一旦共振を生じても、繰り返し剛性低下による共振周波数減少により、途中から応答が鈍り、曲げ疲労破壊は生じにくくなった。また、入力周波数が2 Hzのときには、わずかなサイクルで共振による加速度とすべりの増大を生じ、釘頭貫通による破壊を生じた。

図-4の動的応答挙動は、図-3の静的荷重-すべり曲線と連動している。入力周波数が高いと、初めは荷重-すべり曲線初期の高い周波数と共振して大きく応答するが、繰り返し劣化による共振周波数低下によって、サイクル毎に接合部共振周波数が入力周波数から離れ、応答が鈍くなる。一方、入力周波数が低いと、初めは応答が鈍くても、繰り返し劣化により徐々に接合部共振周波数が入力周波数に近づき、最終的に静的加力と同等の破壊または低サイクル曲げ疲労破壊を生じる。

上記の応答特性を比較するため、実測応答加速度を加速度応答比に変換した結果を図-5に示す。図に見られるように、加速度応答比は入力加速度と周波数の組み合わせに明白に依存している。入力加速度165 galの場合、3 Hz以上で敏感に応答し、周波数が3 Hzから7 Hzに増すにつれ、少しずつ応答比が増大する傾向を示した。入力加速度330 galの場合は2 Hzで最も応答が大きく、入力周波数が高くなるほど応答が鈍化した。入力加速度が495

gal になると、330 gal で観察された傾向がより顕著になる。この入力加速度はコントロール最大荷重に相当するので、応答加速度比は本来 1.0 前後を越えないはずであるが、2 Hz ではそれを大きく越えている。これは次の理由による。振動台実験では、使用振動台の機械的特性により、入力加速度が設定値に到達するまでに一定のサイクル数を要する。2 Hz の場合、接合部は想定入力加速度 330、495 gal に対し、実際の入力加速度がそれぞれ 305、321 gal に達した時点で破壊を生じた。

各条件における破壊までの平均サイクル数を図-6 に示す。図-6 は合板-木材釘接合部の動的応答に対する入力加速度と周波数の影響を示している。図-6 で注目すべき点の1つは、合板-木材釘接合部の動的応答は相対的に、入力加速度より入力周波数の影響を強く受けるということである。また、もう1つの重要な点は、曲げ疲労破壊を生じさせ易い周波数と静的加力で一般的な釘頭貫通破壊を生じさせ易い周波数は一致しないということである。

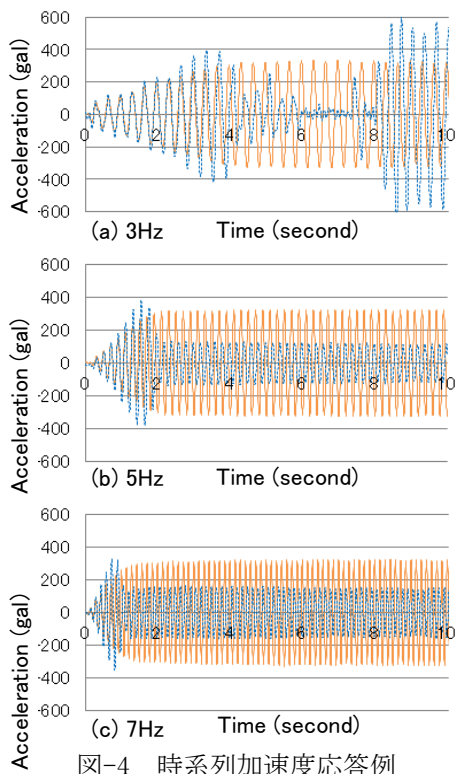


図-4 時系列加速度応答例

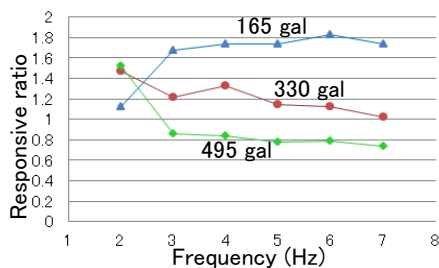


図-5 加速度応答比

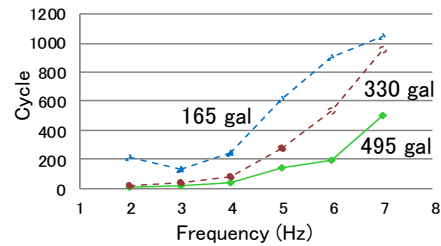


図-6 破壊時のサイクル数

(白抜きマーカーと破線は、150 秒の加振で破壊しなかった試験体があったことを示す。)

この実験結果は、釘接合部は損傷限界以下の剛性に対応する周波数成分で損傷するが、終局破壊は安全限界時剛性に対応する周波数成分で生じることを示している。このような釘接合部の動的応答挙動は、構造全体の耐震性能に影響を与えると考えられる。地震波の主要周波数成分が、釘接合による耐震要素の安全限界相当の共振周波数に近いと、建物は地震力によって倒壊する危険性を持つ。一方、地震波の主要周波数成分が、損傷限界以下の共振周波数に近い場合、当初は損傷を生じても、繰り返し劣化による共振周波数低下によって建物の応答が鈍り、強い地震力に対しても倒壊を免れる可能性がある。したがって、木質構造の構造設計では、安全限界設計で要注意の周波数成分と損傷限界設計で要注意の周波数成分とを区別して考える必要があるといえる。ここで重要な点は、安全限界に対応する周波数成分を持つ地震力が連続的にあるいは繰り返し作用すると、最大加速度は損傷限界レベル以下であっても、建物を倒壊させる危険があるということである。

この実験では、使用振動台の制約により、入力周波数 2~7 Hz についてのみ検討を行った。7 Hz 以上の周波数に対しては、この実験結果から類推可能であるが、2 Hz 以下の周波数に対する応答特性については、今後の検討を必要とする。この研究項目についての結果をまとめると次のようになる。

- 1) 合板-木材釘接合部が動的加力を受けると、静的加力下で生じる破壊形態以外に、釘の低サイクル曲げ疲労破壊を生じることがある。低サイクル曲げ疲労破壊を生じ易い周波数と静的加力で一般的な破壊を生じ易い周波数は一致しない。
- 2) 合板-木材釘接合部の動的応答は入力周波数と加速度に明確に依存する。
- 3) 安全限界耐力を左右する周波数成分と損傷限界耐力を左右する周波数成分とを区別する必要がある。
- 4) 上記の周波数依存性は、釘接合部の非線形荷重-すべり特性と繰り返し劣化特性によって生じる。繰り返し劣化による剛性低下は同じ接合部の共振周波数を低下

させ、動的応答特性を推移させる。5) 釘接合部の安全限界に対応する周波数成分が連続的または繰り返し作用すると、最大加速度が損傷限界レベル以下であっても、建物を倒壊させる危険がある。

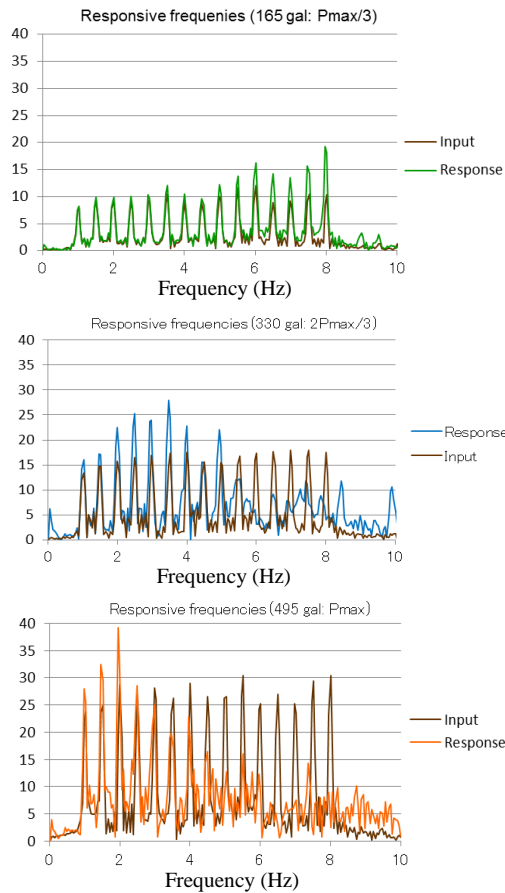


図-7 入力加速度と応答周波数

(3) ホワイトノイズ波に対する合板-木材釘接合部の動的応答

図-7はホワイトノイズ波の最大加速度と応答周波数成分の分布（リニアスペクトル）を比較した例である。入力加速度が 165 gal ($P_{max}/3$ 相当)→330gal ($2P_{max}/3$ 相当)→495 gal (P_{max} 相当)と増加するにつれ、主要応答周波数成分が高周波側から低周波数側に推移している。この結果は調和波を用いた動的実験の結果と一致している。すなわち、合板-木材釘接合部は複数の周波数成分によって振動させられた場合でも、入力加速度が小さいと相対的に高めの周波数成分に対して敏感に反応し、入力加速度が大きいと相対的に低めの周波数成分に対して敏感に反応する。

図-7は加振時間全体について応答周波数成分を求めたものであるが、主要応答周波数の時間的推移を同じ試験体について比較してみると、図-8 のようになる。入力加速度 165 gal ($P_{max}/3$ 相当)のときは、当初は主要応答周波数が全体にやや低下したが、5 秒程度経過した後はあまり変化が見られず、おおむね 4

～8 Hz 程度で安定的に反応した。この試験体は通算 80 秒 (20 秒間の加振 4 回) の加振で、破壊を生じなかった。一方、入力加速度 495 gal (P_{max} 相当)のときは、当初は主に 2～4 Hz 程度で反応し、徐々に 1～3 Hz 程度の範囲に移行した。この試験体は、最初の加振 10 秒程度で破壊を生じた。最も顕著な時間的推移を示したのが入力加速度 330 gal ($2P_{max}/3$ 相当)の場合である。この場合、当初は主に 4～8 Hz 程度で反応したが、最初の 3～4 秒で応答周波数が大きく低下し、それ以降は入力加速度 495 gal の場合と同程度の周波数範囲で反応するようになった。この試験体は、2 回目の加振約 15 秒 (通算約 35 秒) で破壊を生じた。

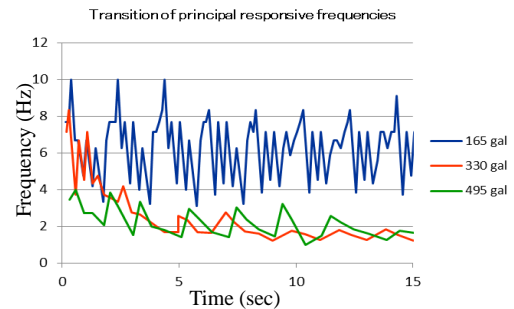


図-8 応答周波数の時間的推移

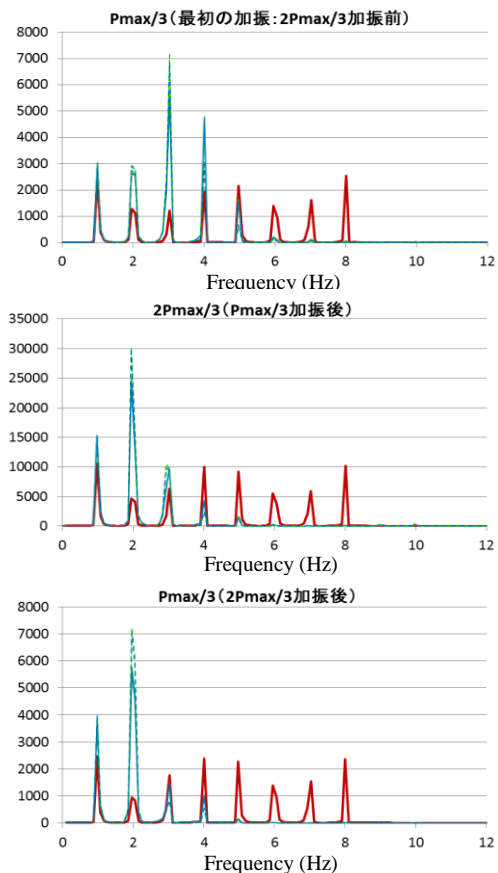


図-9 合板釘打ち耐力壁の応答周波数

上記の結果は、入力加速度が等価な静的最大荷重の 2/3 程度であっても、長時間または

繰り返しの加振を受けると、繰り返し劣化により、共振周波数が最大荷重相当の共振周波数に近づき、結果的に終局破壊を生じてしまう危険性があることを示している。

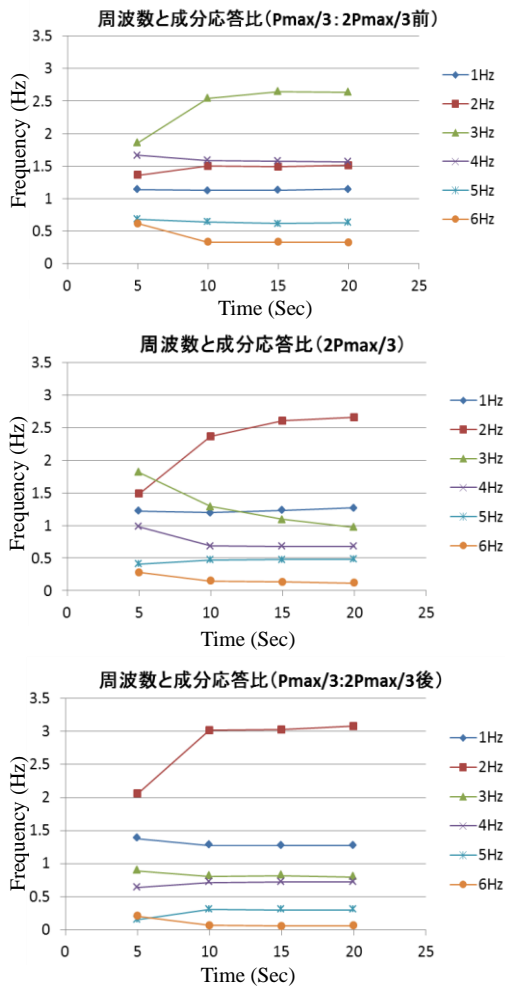


図-10 合板釘打ち耐力壁における応答周波数の時間的推移

以上の結果から、複数の周波数成分からなるホワイトノイズ合成波に対する合板一木材釘接合部の動的応答特性は、各周波数成分に対する応答挙動を、対応する調和波に置き換えて考えてよいことが明らかとなった。

(4) ホワイトノイズ波に対する合板釘打ち耐力壁モデルの動的応答

合板釘打ち耐力壁の振動台実験では、まず推定最大荷重の1/3に対応する入力加速度で加振し、一旦静止した後、引き続き推定最大荷重の2/3に対応する入力加速度で加振した。その後、同じ試験体について推定最大荷重の1/3相当の入力加速度で再加振した。この3回の加振における応答周波数成分の分布（リアスペクトル）を比較した結果が図-9である。この実験でも、釘接合部単体に対する実験結果と同様な傾向が見られ、 $2P_{max}/3$ 加振では $P_{max}/3$ 加振よりも低い周波数成分に敏感に

応答した。この実験で注目すべき点は、 $2P_{max}/3$ 加振後に再度 $P_{max}/3$ 加振を行ったときには、最初の加振よりも低い周波数成分に対して敏感に応答するように変化していることである。

この結果は、繰り返し劣化による剛性低下が同じ耐力壁の共振周波数を低下させたことを示している。このような耐力壁に、劣化後の共振周波数に近い周波数成分を含む動的な力が作用すると、入力加速度が小さくても、建物の倒壊をもたらす危険性を生じる。これを実際の地震と関係づけて考えると、強い地震によって共振周波数の低下を生じたものの倒壊は免れた建物が余震を受けた場合、その余震の周波数成分特性によっては、最大加速度が小さくても倒壊を生じる危険があるということになる。

図-9の応答周波数特性の時間的推移を比較してみると、図-10のようになる。加振時間（秒）の経過につれ、徐々に応答特性が推移して行くことが分かる。

以上の結果から、合板一木材釘接合部単体の動的応答特性の詳細な把握が、合板釘打ち耐力壁の耐震性能評価の基礎となることが検証された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

T. Hirai, K. Sawata, A. Awaludin, Y. Sasaki and T. Uematsu: Dynamic response of wall-floor joints of wooden light-frame constructions under forced harmonic vibrations, *Journal of Wood Science*, 58, 128-134, 2012. 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平井 卓郎 (HIRAI TAKURO)
北海道大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号：20173205

(2) 研究分担者

澤田 圭 (SAWATA KEI)
北海道大学・大学院農学研究院・助教
研究者番号：10433145
植松 武是 (UEMATSU TAKEYISHI)
北海道立総合研究機構・建築研究本部・北方建築総合研究所・環境科学部・研究員
研究者番号：60462347
戸田 正彦 (TODA MASAHIKO)
北海道立総合研究機構・森林研究本部・林産試験場・性能部・研究員
研究者番号：60446317