

木材と薄板鋼板のハイブリッド化による新住宅構法の開発 —木とスチールのそれぞれの長所を活かした混合構造化の提案—

Engineering Development of a New Structuring System for Wooden Two-by-four Housing Based on the New Optimized Designing Concept

平川 智久^{*(1)}
Tomohisa HIRAKAWA

須田 敬之^{*(2)}
Takayuki SUDA

村橋 喜満^{*(3)}
Yoshimitsu MURAHASHI

抄 録

三井ホームと新日本製鐵は住宅のコスト競争力確保と生産性向上を目的に、木と鋼のそれぞれの長所を活かした新しい住宅構法の開発を進めており、その概要について述べた。これは、木造ツーバイフォー住宅の“木の文化”の中に“鉄の文化”を持ち込み、互いの文化の中から設計、生産、物流、商流、施工の最適値、いわゆる“ハイブリッド化”を追求したものである。住宅業界は右肩上がりの成長の時代が終わり、本格的な競争時代に突入すると予測される中、このハイブリッド化の方向性はこれらの動きを先取りした取り組みと言える。

Abstract

Mitsui Homes Co. and Nippon Steel Corporation have developed a new structuring system for wooden two-by-four housing to secure cost competitiveness and improve productivity. This is meant to bring “steel culture” into “wood culture” of two-by-four housing to pursue what is called “hybridization”, the optimum values of design, production, logistics, distribution and construction, from each culture. The housing industry has ended the era of consecutive growth and entered the severe competitive age. The direction of this hybridization is expected to be a basic standard to overcome such competitive age.

1. 緒言

枠組壁工法の木造ツーバイフォー住宅は、1960年代後半に北米から導入された。その後、都心部を中心に着実に増加を続け、特に、1991年度から1996年度までの5年間で、戸建住宅市場の10%の年間10万戸規模の着工実績を上げるまでに成長した。

木造ツーバイフォー住宅は、その名が示すように、基本的には2インチ×4インチの木材に構造用合板などの面材を緊結して壁を作り、間取りに合わせて配置を行った上で床と緊結することによって耐震安全性が高い壁式構造を形成する点にその特徴がある。壁式構造であるため断熱性や気密性も確保しやすく、エネルギー効率が高い住宅としてその性能の高さが注目されてきている一方で、近年、住宅生産に関しコスト競争力を確保する上で解決を図らなければならない二つの大きな環境の変化に直面している。

一つは、居室の大空間化のように大空間化のニーズが高まってきていることである。床を例に述べると、大空間化により床を支える壁間隔が拡大し床根太の断面は大きくなる。このため、天井高さを確保するには建物全体を高くすることも考えられるが大幅に建設費

がアップする。現実的には、大空間化が必要な床の根太を部分的に多く配置することで現状並みの建物高さや天井高さを確保しているが、抜本的な大空間化対応技術の構築が緊急課題となっている。

もう一つは、木材の多くは輸入材で価格は為替レートや輸入元の景気の影響を受け大きく変動すること、長期的には上昇傾向にあること、及び大空間化に伴い適用が増大すると予測される大断面の木材は、品質確保が難しくコスト的にも割高となることである。

木造ツーバイフォー住宅が今後更に普及拡大していくためには、このような住宅生産を取り巻く環境の変化に対応できる技術を構築することで、コスト競争力を確保していくことが重要になる。三井ホームと新日本製鐵は、1995年7月にスチールハウス建築物の性能評価基準に基づき0.8mm以上2.3mm未満の垂鉛めつき薄板材の使用が認められたのを契機に、木と鋼のそれぞれの長所を活かした混合構造化、いわゆるハイブリッド化による新しい住宅構法の開発を共同で進めてきている。

本報では、ハイブリッド化の基本的な考え方、開発対象の部位の選定、及び具体的な開発の展開について報告する。

*⁽¹⁾ 建材開発技術部
東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-5073

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

*⁽³⁾ 建材開発技術部 マネジャー

2. ハイブリッド化の基本的な考え方と開発対象部位

2.1 ハイブリッド化の基本的な考え方

ハイブリッド化の目的は、木材と鋼材の異なる材料の互いの長所を活かしながら組み合わせを行い、的確に課題解決を図ることにある。木材は断熱性と現場での接合性や加工性は優れているが、価格や品質が不安定で、強度や剛性も低い。一方、鋼材は強度や剛性が高く、価格や品質は安定しているが、断熱性確保と現場での接合や加工性には課題が多い。

これらの木と鋼の相互補完的な関係を踏まえ、現行の木造ツーバイフォー住宅を構成する部位のうち、鋼の長所が引き出せる部材については置換えを行うことにより、

- (1)断熱性、気密性に優れている(木)
- (2)現場での加工と接合が容易(木)
- (3)高強度、高剛性の部材を使うことにより大空間化の対応が容易(鉄)
- (4)価格と品質が安定している(鉄)

といった、木と鋼のそれぞれの特長を持つ住宅が実現できるとともに、住宅生産を取り巻く環境の変化にも的確に対応できる可能性が出てくる。

2.2 開発対象部位の選定

開発対象部位の選定にあたっては、今後、木造のままではコスト上昇の可能性が高く、かつ、課題解決の緊急性が高い三つの部位を選定した。

2.2.1 小屋トラス

小屋トラスは比較的大きな空間を構成する主要な部位で、その構成部材には高い強度と剛性が要求される。このため木材の場合は大断面となり、その使用量も多い。強度と剛性が高い鋼材を使うことで、更なる大空間化の要求にもコスト競争力を確保して対応できる可能性がある。

2.2.2 二階床組

床の根太材には、木造ツーバイフォー住宅の構造部材の中で最も長尺で大きな断面の木材が使用されている。スパンが4 550mmを超える居室空間の要求に対しては、現状では根太材の大断面化と本数アップによって対応している。コスト上昇を抑える観点から鋼材化による抜本的な解決策が期待されている。

2.2.3 一階天井根太

天井根太は、天井仕上げの下地として用いる部材である。根太の部材精度が直接仕上げの精度を左右するため、コスト上昇は承知の上で高い剛性を有し反りや曲がりを矯正した集成材を使用していた。今後、大空間化により更なるコスト上昇が予測されることから、鋼材化により仕上げ精度を確保しながらコスト削減が実現できる方策の検討が急務となってきている。(図1参照)

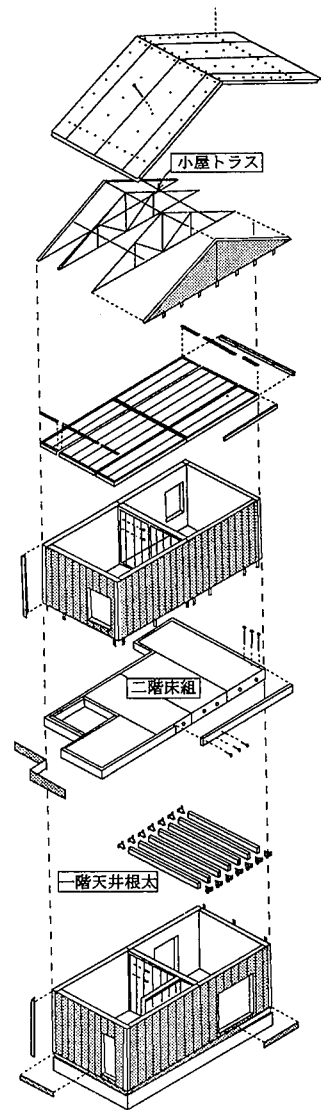


図1 開発対象部位

3. ハイブリッド化の対象の個別部位開発

3.1 小屋組トラス

3.1.1 開発課題

トラスは構造的な特性から応力が接合部に集中するため、その設計にあたっては細かな配慮が必要となる。特に、薄板鋼板に応力が集中すると局部変形を起しやすいため、薄板材によるトラスを開発する場合は集中する応力の分散化を図り、局部変形の発生を抑制した接合部の開発が必要となる。

3.1.2 課題解決に向けた展開

トラス接合部での局部変形が全体強度に及ぼす影響を定量的に把握するために、スパンが7 280mmの鋼製トラスによる加力試験を行った。トラスには上弦材の中央部の2点を油圧ジャッキでの繰返し載荷と破壊までの載荷を行った。なお、実際の小屋組を正確に再現するため、水平方向に910mm間隔で、上弦材が面外方向に変形するのを抑える治具を設置した(写真1参照)。

図2(a)に示すように、トラス弦材を片面のみのガセットプレートで接合した場合、荷重が作用する面とガセットプレート面が偏心の関係にある影響を受け、繰返し載荷の最初の段階からガセットプレ

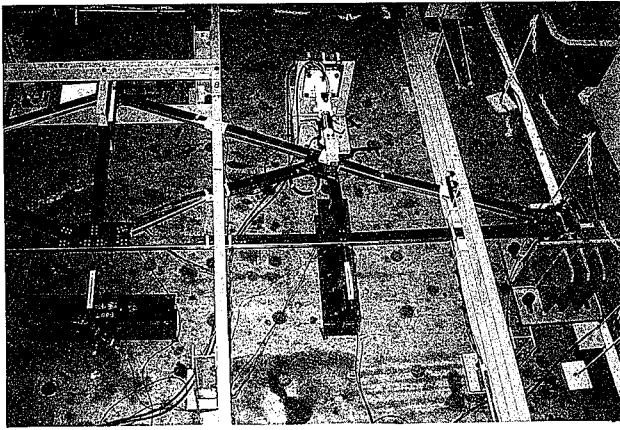


写真1 小屋トラスの構造試験風景

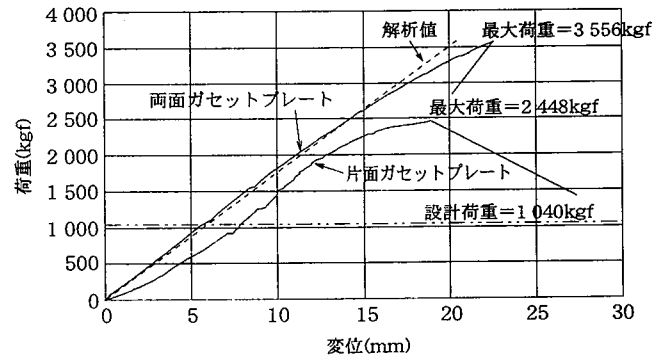
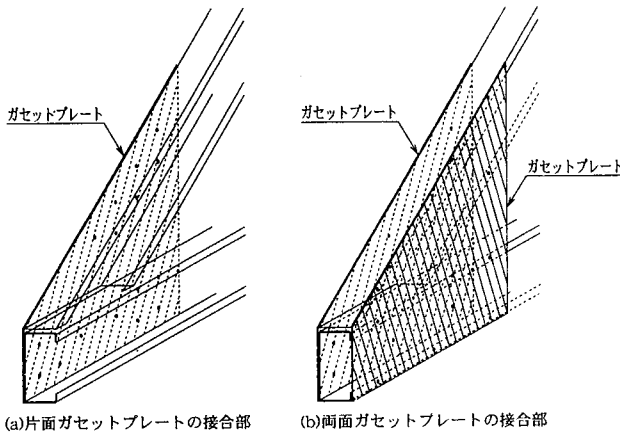


図3 小屋トラスの荷重-変位曲線



(a)片面ガセットプレートの接合部 (b)両面ガセットプレートの接合部

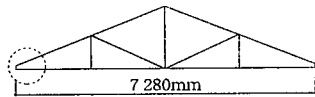


図2 片面・両面ガセットプレートの接合部

プレートが局部変形し、最大荷重は2448kgfと設計荷重1040kgfの2.35倍にとどまった。そこでトラスの弦材を両面ともガセットプレート接合(図2(b)参照)することで偏心を無くし、接合部における局部変形が起りにくくした試験を再度行った。

結果は、最大荷重は3556kgfとなり、設計荷重の3.34倍、片面接合の約1.4倍の耐力向上が確認できた。設計荷重時の変位は5.58mmで、これはスパン7280mmの1/1305に相当する。図3に示すように、試験による荷重と変位の関係を高い相関で解析により再現できたことから、薄板鋼板を用いたトラスは、接合部における局部変形を極力防止することによって、従来の構造計算指針に則った設計が可能であることが判明した。

3.1.3 実施物件による施工性の検証

設計技術が確立できたことから、鋼の強度的な特性を引き出しながらトラスを含む小屋組全体を構成する部品数の削減などの設計の最適化を実施した。最適化が図られた小屋組は戸建住宅の実施物件によって施工検証が行われ、鋼の利点である工場加工の比率を高め、逆に弱点である現場での接合を極力絞込むことで、施工精度を含め従来の木材による小屋組以上の施工性を確保することができた(写真2参照)。

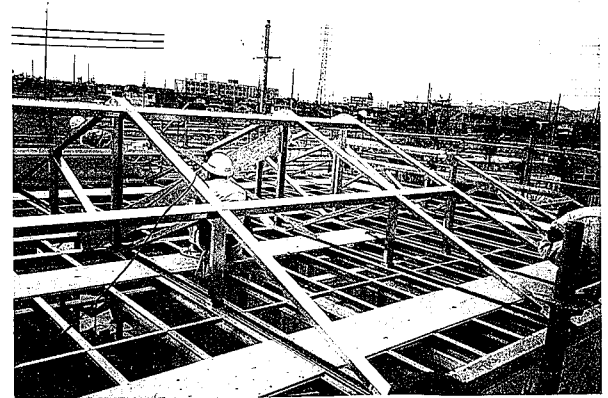


写真2 戸建住宅における小屋組の施工性試験

3.2 二階床組

3.2.1 開発課題

二階床組に要求される性能の内、当面、構造と振動の性能に絞った開発を進めてきた。

構造性能についての二階床組の役割は、床にかかる自重や積載物等の鉛直力と暴風時や地震時に二階壁に流れてきた水平力を一階壁に伝達することである。床を鋼材化する場合、鉛直力に対しては、小屋トラス同様に壁との接合部において床根太材の端部が局部変形を発生しない工夫をすれば問題はない。一方、水平力の伝達については、従来の工法では水平力の伝達経路が全て木材であるが、図4に示すように、鋼材の場合は木の二階壁から木の二階床合板に水平力が伝達し、その後、鋼材の床根太を経由して木の二階壁へと伝達される。水平力が、まさしく木と鋼のハイブリッド部分を伝達する

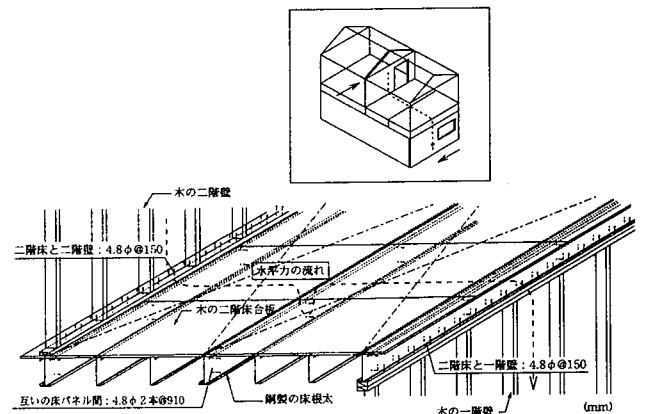


図4 ハイブリッド床組の水平力伝達経路

ため、この一連の水平力伝達能力を定量的に把握する必要がある。

また、振動性能についての二階床組の役割は、人間が不快に感じる振動を発生させないこと、及び床に発生した振動を素早く除去することである。鋼材は、強度と剛性は高いが発生した振動を素早く除去する性能、いわゆる振動減衰性能は木より劣る。このことを踏まえた上でコスト上昇を極力抑制した振動防止機構を開発する必要がある。

3.2.2 構造性能についての課題解決に向けた展開

水平力を伝達する経路の接合は、二階壁の枠材と二階床の構造用合板との接合は4.8mm径のねじでピッチ150mm、互いの床パネルの枠材間はピッチ910mm、二階床と一階壁はピッチ150mm間隔と、従来の木並みの仕様で試験体を製作した(写真3参照)。試験体の大きさは、1 820mm×3 640mmの鋼製床パネル3体を配置した10 920mm×3 640mmとし、4 200kgfの設計荷重を床根太と平行な方向に正負繰り返して荷した。

結果を図5に示す。最大荷重は10 920kgfで設計荷重の2.6倍、設計荷重時の水平たわみは21.2mm(スパンの1/515)、更に、設計荷重の荷重までは弾性的な変形状を示すこと、及び設計荷重時における床パネル間すべりと開きもそれぞれ0.1mmで、0.5mm以下であることが確認できた。このことは、接合ピッチが従来の木並み程度であれば、水平力の伝達経路がハイブリッド化に変更されても従来並み伝達能力は確保できることを意味する。

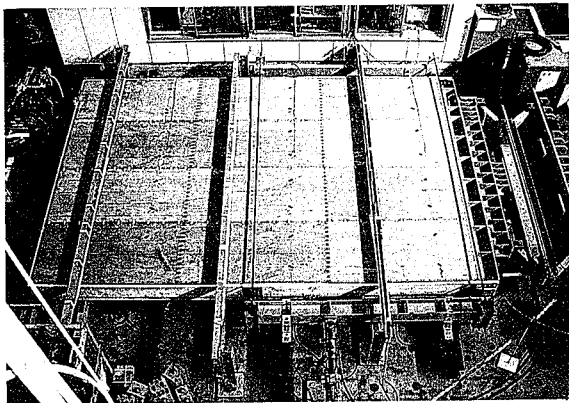


写真3 水平力伝達能力の定量的把握に関する試験風景

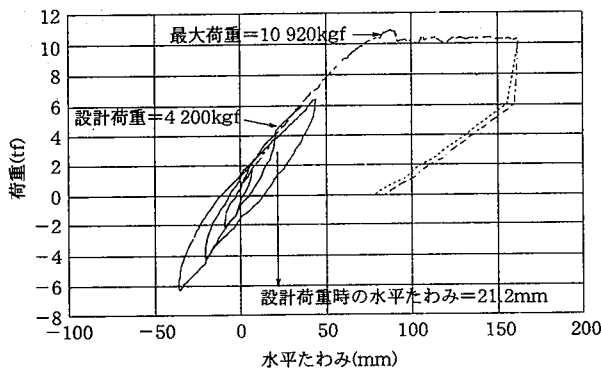


図5 試験体の荷重-変形曲線

3.2.3 振動性能についての課題解決に向けた展開

床組に使用する亜鉛めっき薄板材を使った大型のリップ溝型鋼は、スチールハウス用の部材として既に生産体制が整備されているため流通品並みのコストで調達が可能である。床部材の選定にあたってはコスト面からはリップ溝型鋼の適用が妥当ではあるが、構造的にはせん断中心と図芯とのずれにより鉛直方向の衝撃荷重に対して部材がねじれ振動を起すことが従来から懸念されていた(図6参照)。

まずは、リップ溝型鋼の振動特性を把握するために、実際に鋼製床パネルを施工した現場において、重さが3kgの粘土を50mmの高さから落下させ、床根太材として使用されているリップ溝型鋼の鉛直と水平方向の加速度波形を測定した。

結果を図7に示す。鉛直方向の振動よりも根太下端の水平方向が

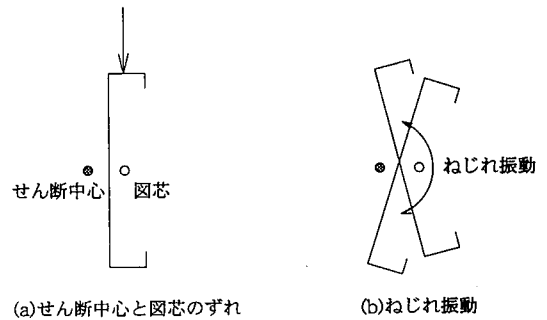
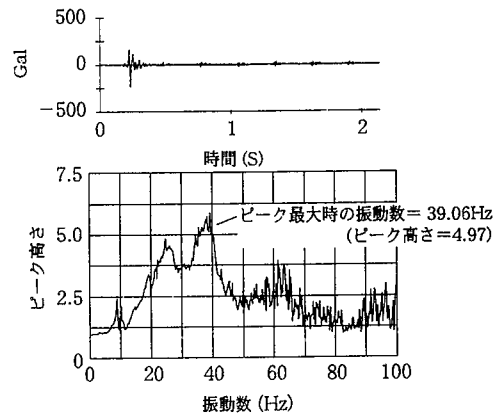
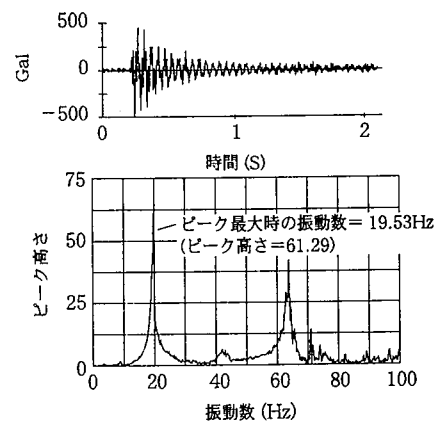


図6 リップ溝型鋼の構造特性



(a)鉛直方向の加速度波形とフーリエスペクトル



(b)水平方向の加速度波形とフーリエスペクトル

図7 リップ溝型鋼の振動特性(改善前)

約2倍以上であること、鉛直方向の卓越振動数は39.1Hzであるが水平は19.5Hzと人間が感じやすい範囲に近づいていること、及び振動減衰定数は鉛直方向が12.1%と振動を素早く除去しているにも関わらず、水平は1.7%と減衰性能が非常に小さいことが判明した。

改善策として、図8に示すようにリップ溝形鋼の下フランジが水平方向に振動するのを抑制する簡易金物を床根太中央部に設置した。更に、水平振動の振動減衰効果を向上させるために、溝形鋼の下フランジからの振動が簡易金物に伝わってきたとき、金物が図8(b)の方向に弦振動を起す工夫を加えた。

改善後の振動測定の結果、鉛直方向の加速度値と卓越振動数は改善前と変化はなかった。しかし水平方向は、図9に示すように、振動抑制金物をスパンが4550mmの中央一ヶ所に設置しただけで、加速度は約30%減少し、卓越振動数も19.5Hzから人間が不快感として感じる領域を大きく外れた50.3Hzに変わった。減衰定数も対策前の1.7%から10.6%となり、振動性能として実用上問題がないレベルまで高めることができた。

3.3 一階天井根太

3.3.1 開発課題

木造ツーバイフォー住宅の着工件数が近年急速に伸びてきた理由の一つは、フリープラン等の間取りの自由性が高い点にあるが、これは木が現場加工性と接合性に優れる特徴に起因しているとも言える。従来の一階天井根太を木部材からスチール部材に置き換える場合は、鋼材が木とは違って精度が高い工場加工が可能な特徴を活かしながら、如何に現場加工性と接合性を確保するが課題となる。(図10参照)

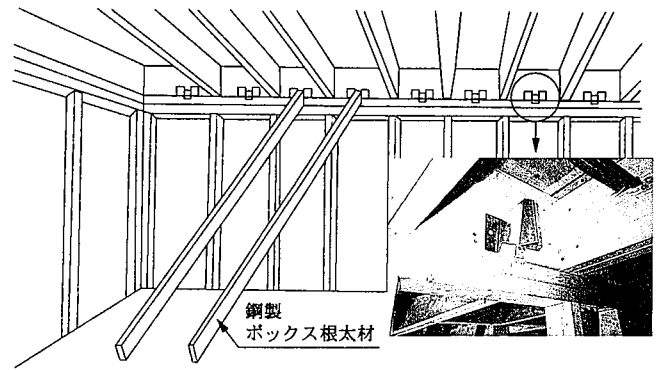


図10 開発した鋼製の天井根太システム

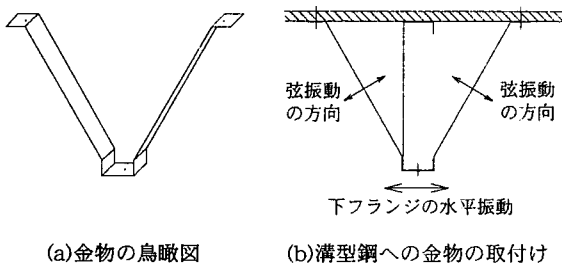
3.3.2 課題解決に向けた展開

課題解決にあたりまず着目したのが木と鋼材の断面形状の違いである。鋼部材の断面をボックス形状とすることで断面は中空となる。その空間に取付金物を入れ込みスライドさせることによって、根太材を現場加工をすることなく長さを自在に調整する方法を考案した。

更に、この方式だけではボックス根太材と取付金物が簡単にスライドすることから、次に着目したのが金物の工場加工による高い製作精度の確保である。具体的には、金物に微妙な角度を取り付けることで、両端の金物が周辺の木部材と締結されたとき、ボックス根太材とは特別な接合をしなくても、少々の外力では両者のずれが生じない方法を実用化した。

3.3.3 実施施工による施工性検証

開発した鋼製の天井根太システムは、実機化のための生産設備の構築等の負荷が比較的少なく、かつ、建設費削減の期待効果も大きかったことから実物件での施工検証と部品の改良を精力的に進めた。16棟もの実物件への試用の結果、天井根太は従来の25%減の1m当たり1.3kgの重量に軽量化が図れたこと、及び天井根太と取付金物の接合を省略することで天井根太1本当たりの接合数は12か所から8か所へ33%の低減が実現できたことにより、結果として、従来の2人1組の作業から1人での作業化が可能となり、大幅な生産性向上を達成することができた。(写真4参照)



(a)金物の鳥瞰図 (b)溝型鋼への金物の取付け

図8 リップ溝形鋼の振動抑制金物

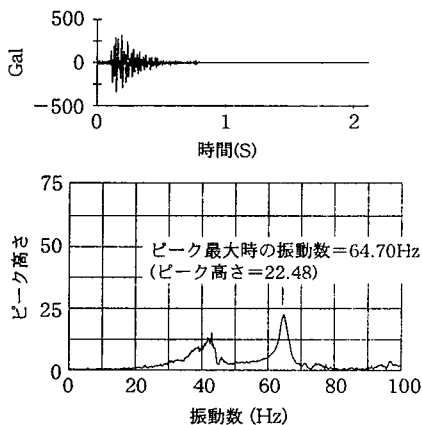


図9 リップ溝形鋼の振動特性(改善後)
水平方向の速度波形とフーリエスペクトル



写真4 鋼製吊天システムの施工風景

4. 結言

木造ツーバイフォーという“木の文化”の中に“鉄の文化”を持ち込み、それぞれの特長を活かすことによってコスト競争力を確保した新しい住宅構法を実現するとの基本的な考え方に立ち、この2年間、開発してきた。

その結果、ハイブリッド化仕様は、二階床組には防火性能確保等の課題は一部残っているものの、一階天井根太では設計、生産、物流、商流、施工との一連の目途がたち、順次、商品メニューの中に組み込まれつつある。

現在、住宅業界は右肩上がりの成長の時代が終わり、本格的な競争時代に突入したと言われている。今後、大工等の住宅を取り巻く建設労働者の減少が避けられない状況、及びプレファブ化と施工現

場での機械化が進んできているとは言え、人手に頼る部分が非常に多い住宅施工の状況とを考えると、今まで以上にコスト競争力と生産性向上を目指した新たな住宅構法の開発が本格化していくと予測している。木と鋼の互いの長所を活かしながら進めてきたこのハイブリッド化の方向性は、これらの動きをまさしく先取りした取り組みと言える。

5. 謝辞

本開発に関係された、三井ホーム技術開発研究所の河合誠氏、福田一郎氏、大橋修氏、及び製造管理部パネル生産課の小坂順一氏、竹嶋康雄氏に対し、また、高いチャレンジ精神と目標達成意欲の下で進められてきた関係者の着実に粘り強い取り組みに対して御礼を申し上げる。