

南極昭和基地第10居住棟木質パネルの曲げ強度試験

半貫敏夫¹・高橋弘樹²・石鍋雄一郎³・
佐野雅史²・平山善吉¹Bending strength tests of wooden panels of the old living hut built in 1969
at Syowa Station, AntarcticaToshio Hannuki¹, Hiroki Takahashi², Yuichiro Ishinabe³,
Masashi Sano² and Zenkichi Hirayama¹

Abstract: The old living hut was built by the 10th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-10) in 1969. Since then, it had been used continuously at Syowa Station in Antarctica. In 1998, the living hut was taken apart, which were taken back to Japan. To estimate the durability of the prefabricated wooden structural elements, namely, roof panels, wall panels and floor panels, the bending strength of the elements was tested. Structural performances of these elements were decreased little by little. Deterioration of the surface of the panels was marked on the outside part of the elements. The required strength of the elements for the structural design was adequate, although the strength was decreased as a whole.

It was found that surface protection of the structural wooden panel from erosion is most important to preserve the structural performance.

要旨: 南極昭和基地で約29年間使われてきた居住棟の主要構造部材、屋根、壁、床の各木質パネルの耐久性を評価するための曲げ強度試験を行った。その結果外気に接するパネルの構成材に部分的劣化が認められ、それが構造強度に影響していることが確かめられた。パネルの強度は総体的に落ちているとはいえ、設計強度はまだ十分に維持しており、南極で安全に使用できる構造性能を保っていることが確かめられた。

実験結果を整理すると、南極のような極限環境にある木質サンドイッチパネルの耐久性設計では、表面合板の保全が構造上最も重要な課題であることが分かった。

¹ 日本大学理工学部建築学科。Department of Architecture, College of Science and Technology, Nihon University, 8-14, Kanda-Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308.

² 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

³ 日本大学大学院。Graduate School of Science and Technology, Nihon University, 8-14, Kanda-Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308.

1. はじめに

南極昭和基地における越冬観測隊用居住施設としての役割を終えた第10居住棟の建築部品を29年ぶりに日本に持ち帰った。この木質プレハブ建築の耐久性を調査するため、構造用木質パネルについて強度試験を行った(半貫ら, 1999; 高橋ら, 1999)のでその要点を報告する。この第10居住棟は、1968年に日本国内で製作され、翌1969年1月、昭和基地に建設された木質パネルによるパネル構造のプレハブ建築である。スノウドリフト対策のため、コンクリートピアの上に鉄骨造プラットフォームを造り、その上に木質パネルで組立てた箱型建物を載せるという構成の高床式建物で、ブリザードが吹き抜ける床下空間は約1.2mの高さであった。製作当時、我が国でもようやくプレハブ住宅の生産システムが工業化ラインに載るところまで技術力が充実してきたこともあって、この建物は南極建築としては初めて、プレハブ住宅工場の工業化ラインを使って建築部品を製作した建物である。そして29年の後、昭和基地主要部の整備計画に従って1998年1月に第10居住棟を解体、耐久性調査のため、同年4月にその建物部品一式を観測船「しらせ」で日本に持ち帰った。輸送中、持帰り部品はすべて「しらせ」船倉に保管されていたので、雨水その他の水がかかることはなかった。耐久性調査に先立って日本大学理工学部船橋キャンパスの広場で居住棟の復元組立を行い、約1週間、一般に公開したが、この際に建物全体が約3日ほど雨にさらされた。屋根に防水シートをかけて養生した程度だったので外壁、床パネルの一部には雨水が浸透した。以下に述べる構造実験は一般公開の約1カ月後、自然乾燥したパネルを使用して行ったもので、実験で得られた構造性能に日本での雨水浸食がある程度影響していると思われる。しかし、その定量的な評価が難しいので実験データの考察ではこの期間に生じたと思われる性能劣化については考慮していない。

2. 木質パネルの構成と居住棟の構造システムにおける各パネルの役割

床パネルは厚さ130mmで、標準寸法が1m×5m、屋根パネルは軒先端の厚さ150mmが棟で400mmとなるゆるい山型の偏断面部材で標準寸法は0.5m×5m、壁パネルは厚さ100mmで、標準寸法は1m×2.34mである。各パネルの基本構成は、スプルースの枿材(幅30mm)と芯材(幅15mm)を相欠きで組合わせた格子構造の両側に厚さ6mmの難燃合板(タイプ1)を接着接合したもの(床パネルの室内側床面のみ厚さ12mm合板を使用)で、格子間には断熱用の発泡ポリスチレン板が挿入されている(図1)。このパネルに、必要に応じて塗装その他の仕上げが施される。屋根、外壁、床パネルの屋外側は防火のためにカラー鉄板貼りとなっている。建物全体をパネル構造システムで組上げるため、パネル相互の接合はパネルに取付けられた「結合材」と呼ばれる100mm×30mmの木材と結合用金物:コネクターを用いて行われる。

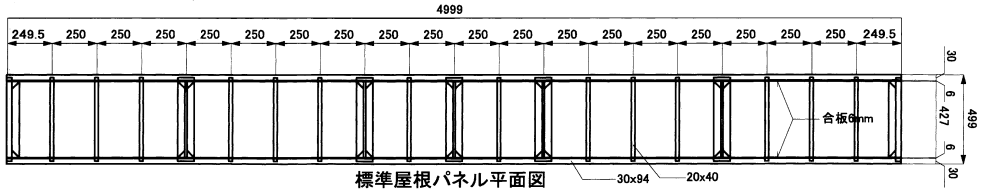
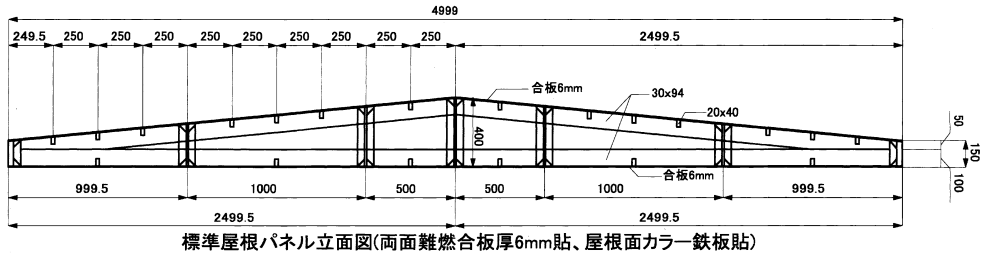


図 1a

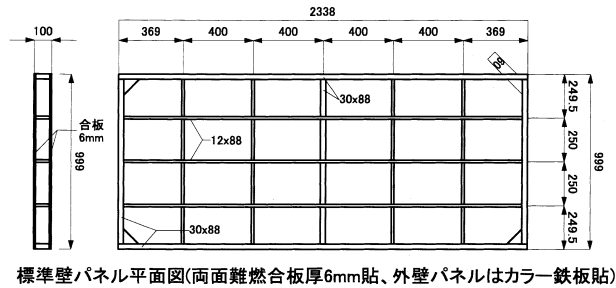


図 1b

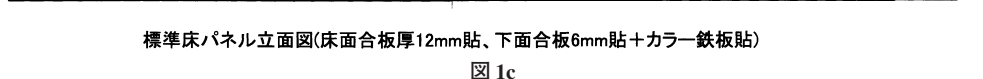
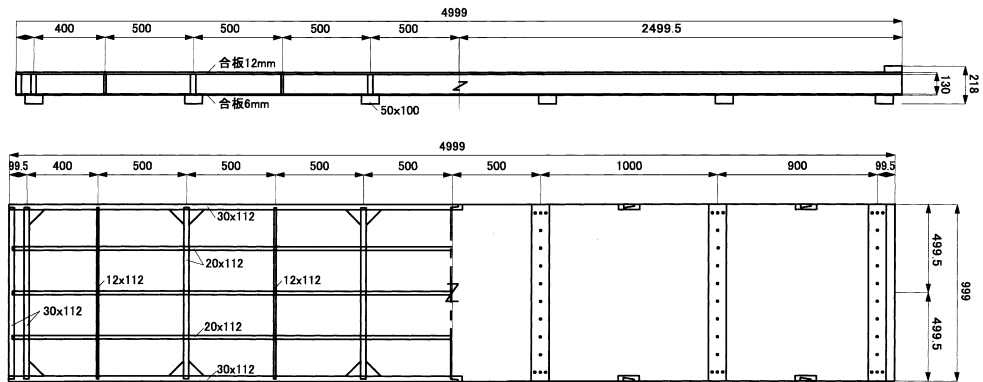


図 1c

図 1a-c 第10居住棟の構造用パネルの構成

(a) 標準屋根パネルの構成. (b) 標準壁パネルの構成. (c) 標準床パネルの構成

Fig. 1a-c. Constitution of structural panels used in the old living hut.

(a) Constitution of structural elements in a typical roof panel. (b) Constitution of structural elements in a typical wall panel. (c) Constitution of structural elements in a typical floor panel.

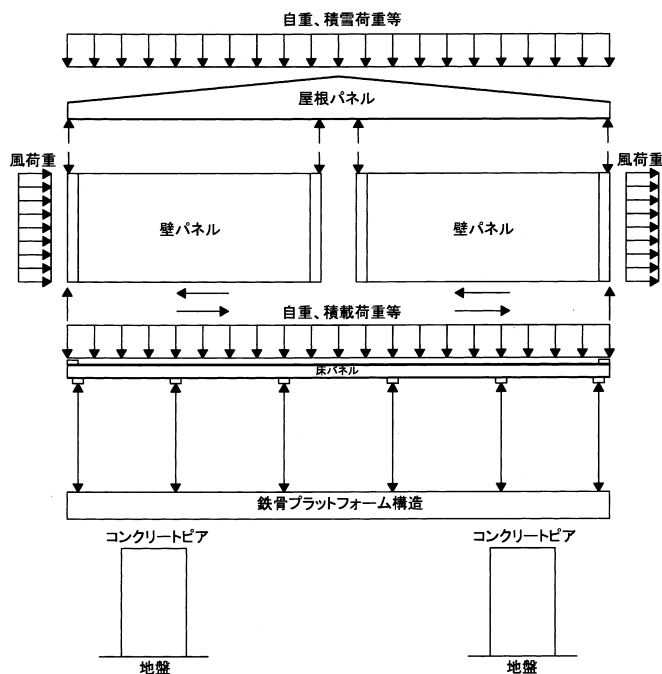


図2 居住棟の壁構造システムと荷重の伝達

Fig. 2. The structural system of the old living hut and load transmission.

床パネルは、鉄骨造プラットフォームの上に設置されて床荷重を支える役目を持つが、標準状態ではスパン1mの連続ばりとして床荷重を鉄骨プラットフォームに伝達する。壁パネルはその配置に応じて異なる荷重を伝える。外壁パネルは壁面に直角な風荷重を受けつつ、面内力として屋根荷重を床パネルに伝える。内壁パネルは屋根からの鉛直荷重を床に伝えるほか、主に風荷重を面内せん断力として建物全体に分散させる機能を持つ。屋根パネルは、通常、スパン5mの単純支持ばりとして屋根面の風荷重と自重を壁に伝える機能を持つ(図2)。曲げ材のスパンとしては屋根パネルが最も厳しい条件である。

3. パネルの曲げ強度試験

3.1. 屋根パネルの曲げ強度試験

図3, 4に示すように屋根パネルをスパン4.8mで単純支持し、トーナメント治具を用いて中央2点に集中荷重(全荷重 P)を加える試験を行った。パネルの変位は図3に示す5点で測定したが、以下の考察で使用するのは図中の①と④、⑤の相対変位(支点の影響を除いたパネル中央点変位 δ)である。荷重-変位関係を図5に、初期剛性と耐力を表1に示す。表中の含水率は、実験終了後の試験体表面の測定値で、合板、枠材の平均値である。これらは実験当時の気乾状態の値と考えてよい。南極昭和基地ではもっと低い含水率で使用されていたと

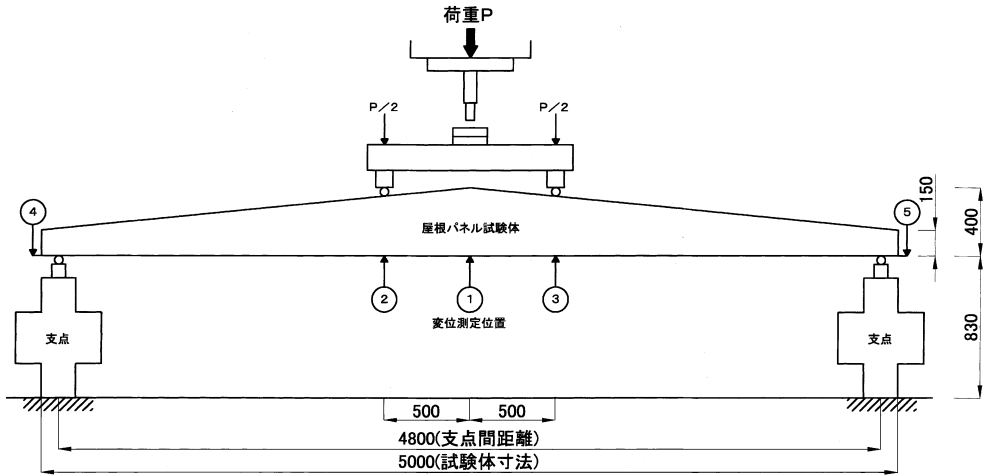


図3 屋根パネルの曲げ試験概要

Fig. 3. The outline of the bending test of roof panels prefabricated with the wooden frame sandwiched by surface plywood sheets.

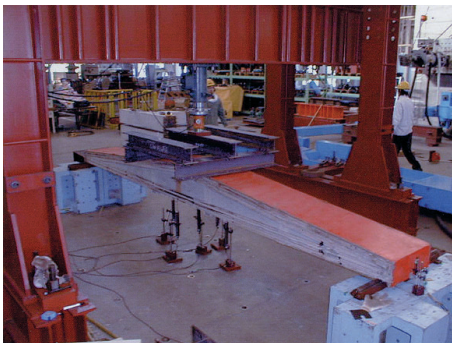


図4 屋根パネルの載荷試験

Fig. 4. A loading test of roof panels.

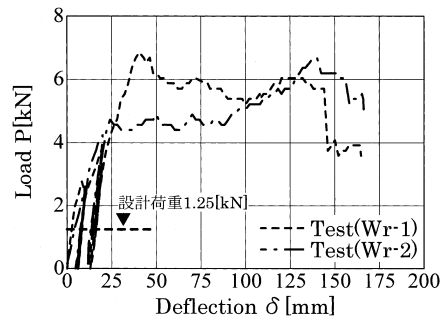


図5 屋根パネルの曲げ試験結果 (荷重 P-中央点変位 δ の関係)

Fig. 5. Load-deflection curves of the roof panels. P: Concentrated load on the panel in Fig. 3, δ : Deflection of the center point.

表1 屋根パネルの曲げ試験結果

Table 1. Results of the bending tests of the roof panel.

部材記号	含水率%	寸法(長さ・幅・厚さ)	初期剛性(kN/mm)	耐力(kN)	備考
Wr-1	11.4	5000 × 500 × 150,400	0.4998	6.86	
Wr-2	12.55	5000 × 500 × 150,400	0.6272	6.664	

思われる。

屋根パネルは長さ5mの大型部品のため、枠材、芯材とも材長(繊維)方向中間に継ぎ手があり、両面の合板も1.2m×2.4mの規格品から切り出して貼り合わせたものであるからパネルの長さ方向に目違いの継ぎ目がある。この合板の継ぎ目は釘を併用して枠材、芯材と接着結合しているが、時間が経過すると、どうしてもこのような接合部に故障が現れやすい。試験では図6、7の破壊状況に見られるように圧縮側表面合板の剥離、引張側合板、枠材の破損が他に先行して起こった。このパネル部材の外力に対する抵抗機構は、変断面梁部材としての挙動のほかに、扁平なトラスとしての抵抗機構が有効に働いた。軒部にあたる試験体支持点で合掌材に相当する枠材圧縮力の水平成分によりトラス接合部のずれが進行した(図7)。図5の荷重-変位関係に現れた長い塑性挙動はこのトラス節点のずれによるものである。枠材節点の補強、パネル両面合板継ぎ目の裏当て補強等の処置を加えれば、さらに屋根パネルの構造性能の向上が期待できる。

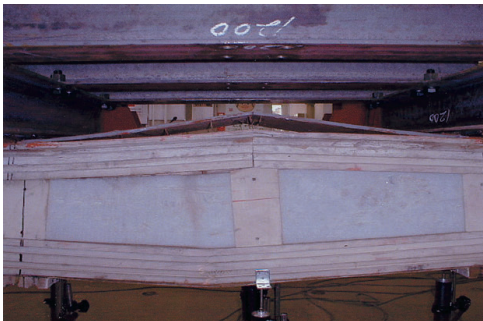


図6 屋根パネル圧縮側合板の剥離と引張り側合板の破断

Fig. 6. Separating fracture of the surface plywood plate of roof panels in compressive and tensile stress.

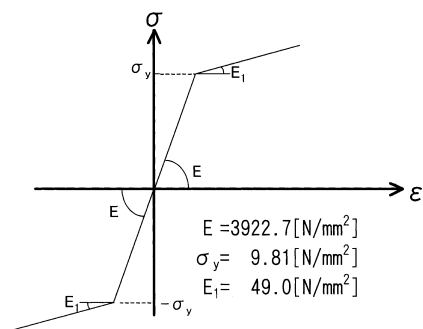


図7 屋根パネル支持点近傍の破壊状況(枠材節点のずれ)

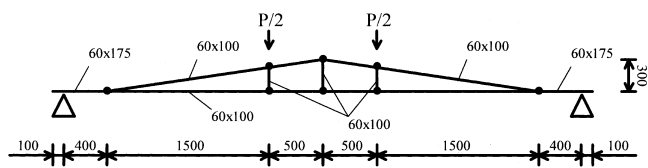
Fig. 7. The fracture of wooden framed members near the support points.

この屋根パネルを、図8のように枠材のみによる剛接トラスにモデル化して数値解析した結果と実験から得られた荷重-変位関係を比較すると(図9)、屋根パネルの構造特性がほぼ次のように把握できる。即ち、弾性範囲の荷重-変形関係における初期剛性には表面合板(屋根面と天井面の合板)が非常に有効に作用する。弾性限界を超えて荷重が上昇し、合板が剥離するなどしてその効果が失われると、トラスとしての抵抗機構の影響が卓越するようになる。パネルの終局強度は枠材による剛接トラスの耐力で評価してよいと思われる。ここで屋根パネルを図8の剛接トラスにモデル化した理由は、側面の合板によって枠材、束材の接点の変形がある程度拘束されると考えたためである。数値解析に用いた材料定数;降伏点応力及びヤング率等は平山ら(1999)の材料試験結果を参考にして設定した。

屋根パネルはカラー鉄板で外面を保護されているが、全体的に融雪水の浸食によると思わ



トラス部材の応力-ひずみ関係



剛接トラスモデル

図8 屋根パネルの数値解析モデル(剛接トラスモデル)

Fig. 8. A numerical model of the roof panel.

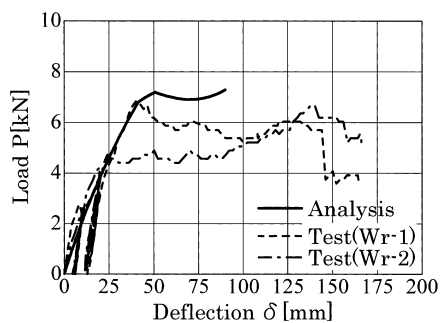


図9 屋根パネルのP-δ関係に関する実験と数値解析結果の比較

Fig. 9. Comparison between tests and analysis of the roof panel on P-δ relations.

れる屋外側合板の劣化が顕著であった。枺材表面にも部分的に材質の劣化が観察された。このように木質部を水から保護する意味で屋外側表面に接着したカラー鉄板の効果は大きい。木部の塗装も耐久性維持に寄与していると思われる。

3.2. 外壁パネルの面外曲げ強度試験

図 10 に示すように外壁パネルをスパン 2.24 m で単純支持し、トーナメント治具によって対称 2 点に漸増荷重 (全荷重 P) を加える試験を行った。外壁パネルは屋外側の表面にカラー鉄板が貼ってある。最も不利な風荷重は屋外側 (鉄板側) から室内に向かう力なので、鉄板側から作用させる荷重状態を標準とした。比較のために室内側からの加力、鉄板を除去したパネルの加力試験も行った。試験結果の荷重-変位関係を図 11 に、初期剛性と耐力の一覧を表 2 に示す。外壁パネルの実験においても考察対象のパネル中央点変位 δ は、図 10 の測定点①と④、⑤の相対変位である。

パネルの破壊は圧縮側表面合板の剥離、枠材切り欠き部の破壊の順で生じ、剛性が順次低下した。各パネルは総じて枠材、芯材よりも表面合板の劣化が著しかった。局部的に合板接着面の劣化も認められた。枠材切り欠き部側が引張となる室内側加力の試験体 Wo-4 と、屋外側加力で切り欠き部側が圧縮状態となる試験体 Wo-2, 3 ではパネルの曲げ耐力に明確な差が現れた (表 2)。パネル製作段階での木材加工、切り欠きの組み合わせには十分な注意が必要で

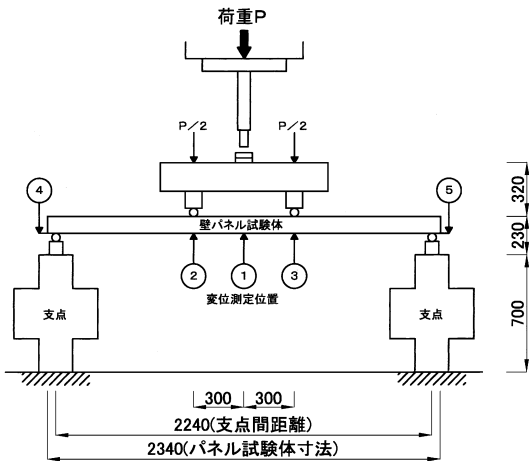


図 10 壁パネルの曲げ試験装置概要

Fig. 10. The outline of the bending test of wall panels prefabricated with the wooden frame sandwiched by surface plywood sheets.

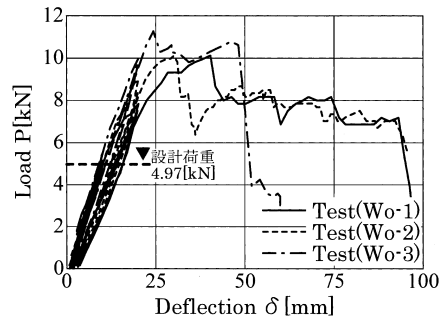


図 11 外壁パネルの曲げ試験結果 (荷重 P -中央点変位 δ の関係)

Fig. 11. Load-deflection curves of the exterior wall panels.
 P : Concentrated load on the center of the panel,
 δ : Deflection of the center.

表2 外壁パネルの曲げ試験結果

Table 2. Results of the bending tests of the exterior wall panel.

部材記号	含水率%	寸法(長さ・幅・厚さ)	初期剛性(kN/mm)	耐力(kN)	備考
Wo-1	11.9	2340×1000×100	0.5488	10.1234	窓付き標準加力
Wo-2	11.1	2340×998×100	0.5782	10.1234	標準加力
Wo-3	11.1	2340×998×100	0.5978	11.27	標準加力
Wo-4	9.7	2340×1000×100	0.5194	7.5068	内側加力
Wo-5	11.6	2340×1000×100	0.5978	11.4268	鉄板除去・加力
平均値	11.1		0.5684	10.094	

ある。また屋外側の鉄板を除去したパネルの試験 (Wo-5, 表2) と鉄板つきパネル (Wo-2, 3, 表2) の構造性能比較によると, 表面鉄板のパネル耐力への寄与は認められなかった。

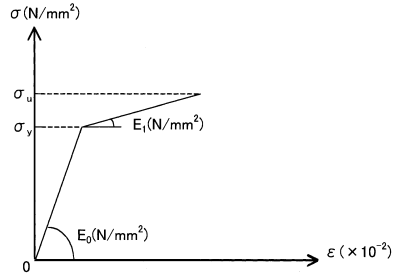
3.3. 簡単な数値解析による外壁パネルの力学特性の推定

ミサワホーム総合研究所技術開発部 (1999), 平山ら (1999) の材料試験結果を参考にして外壁パネルを構成する木質材料の合板, 枠, 芯材に関する材料特性を図12のように仮定し, パネルの曲げ挙動を簡単な梁モデルで近似的に再現することを試みた。パネル断面の曲げ変形に平面保持を仮定し, 断面を図12の材料特性を持つ薄層要素の連続体にモデル化してモーメント-曲率 ($M-k$) 関係を求めた。次にパネルをスパン方向に要素分割し, 試験体の応力分布にしたがって先に求めた $M-k$ 関係を適用して, スパン全体に渡って積分すると曲げ変形が得られる。このようにして計算した荷重-曲げ変形関係を実験結果と比較することにした。

この力学モデルで合板, 枠, 芯材の影響を調べた結果を図13に示す。パネルの剛性および耐力に対して断面の最外縁にある合板の影響が卓越していることがわかる。これらを実験と比較すると図14のようになり, 表面合板が経年劣化することによって合板の有効断面が減少すると仮定したモデルで実験結果がほぼ説明できると考えられる。

3.4. 内壁パネルの曲げ強度試験

内壁パネルが面外に荷重を受けることは殆どないが, 外壁パネルと同様な方法で強度試験を行い, その構造性能を比較した。総体的に外壁パネルよりも内壁パネルの保存状態がよいので同様の試験を行っても内壁パネルの強度が高く現れた (図15, 表3)。また枠材切り欠き部が引張応力を受けるような荷重状態でも, 枠材, 芯材と接着された表面合板が芯材の欠陥を補って働き, 強度があまり低下しない (Wi-4とWi-3の比較, 表3)。したがって構造部材としての壁パネルでは表面合板の保全が最も重要であることが分かった。



数値モデル	No.1		No.2	
	芯材	合板	芯材	合板
E_0	8140	5490	3920	3920
E_1	$0.039E_0$	$0.047E_0$	$0.05E_0$	$0.056E_0$
σ_u	28.4	14.7	13.7	12.7
σ_y	$0.69\sigma_u$	$0.7\sigma_u$	$0.71\sigma_u$	$0.69\sigma_u$

数値モデル	No.3	No.4	No.5
	材料特性は、No.2と同じ	合板厚を80% (4.8mm)に低減したモデル	合板厚を66% (4mm)に低減したモデル

図 12 材料特性及び表面合板の劣化を考慮した壁パネルの数値解析モデル

Fig. 12. Numerical modeling of material properties (σ - ϵ curves) and simulation of fall-off in structural performance of wall panels.

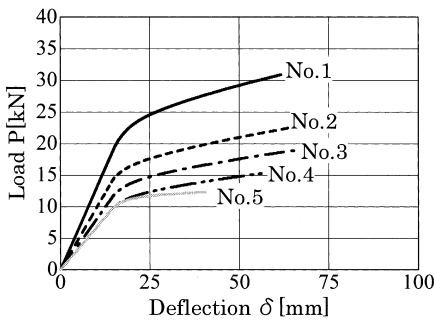


図 13 壁パネル数値モデル (図 12 に示した 5 種類) の解析結果

Fig. 13. P - δ relations of numerical models of the wall panel shown in Fig. 12.

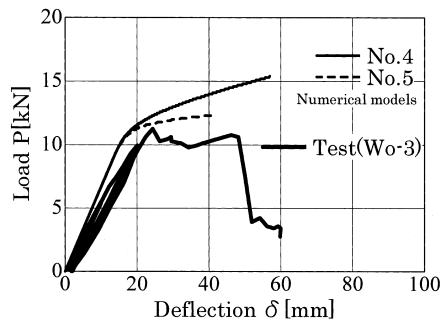


図 14 外壁パネルの P - δ 関係に関する実験と数値解析結果の比較

Fig. 14. Comparison between tests and numerical analysis of the outside wall panel on P - δ relations.

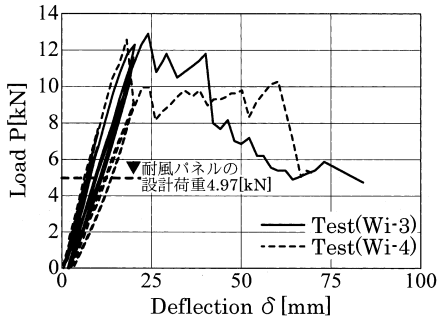


図 15 内壁パネルの曲げ試験結果 (荷重 P - 中央点変位 δ の関係)

Fig. 15. Load-deflection curves of the interior wall panels.

P : Concentrated load on the center of the panel, δ : Deflection of the center.

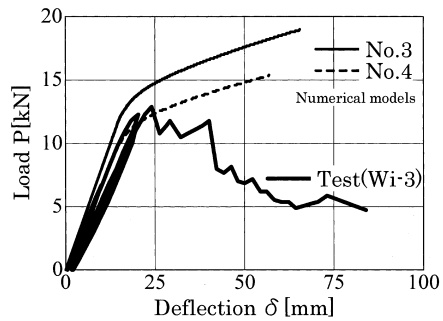


図 16 内壁パネルの P - δ 関係に関する実験と数値解析結果の比較

Fig. 16. Comparison between tests and numerical analysis of the inside wall panel on P - δ relations.

表 3 内壁パネルの曲げ試験結果

Table 3. Results of the bending tests of the interior wall panel.

部材記号	含水率%	寸法(長さ・幅・厚さ)	初期剛性(kN/mm)	耐力(kN)	備考
Wi-1	10.5	2340×998×100	0.9212	16.366	標準加力
Wi-2	9.5	2340×918×100	0.8036	11.564	標準加力
Wi-3	10.5	2340×870×100	0.7252	12.936	標準加力
Wi-4	9.5	2340×870×100	0.833	12.544	内側加力
平均値	10		0.8232	13.328	

この内壁パネルの実験結果も、外壁パネルと同様に梁モデルの数値解析ではほぼ再現することが出来る (図 16)。解析モデル上でも、外壁の場合より表面合板の性能劣化は少なく、したがって有効断面は外壁の場合よりも大きく評価できる。

3.5. 床パネルの曲げ試験

実際の使われ方では床パネルはスパン 1 m の連続梁として床荷重を支えているが、実験計画の便宜上、壁パネルと同様な試験装置を使って単純支持方式の対称 2 点集中荷重試験を行った。試験体は長さ 2.5 m に切断した床パネル 2 枚 (Wf0.5-1,2) と 5 m の床パネル 1 枚 (Wf-1) である (図 17, 18)。

供試体の床パネルは日本に持ち帰って復元展示した際、雨水が浸透して床仕上げ材、下地合板の傷みが促進されていたので、試験結果に大きなばらつきが現れた (図 19, 表 4)。試験では圧縮側の合板が早期に剥離して枠材、芯材とのサンドイッチパネルの効果が失われ、枠

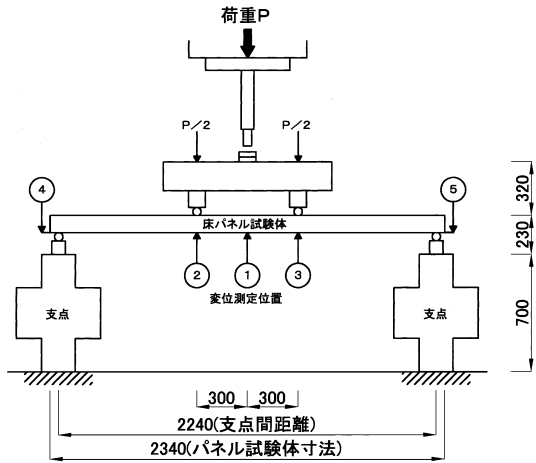


図 17 床パネルの曲げ試験装置概要 (1)

Fig. 17. An outline of the bending test of floor panels prefabricated with the wooden frame sandwiched by surface plywood sheets (1).

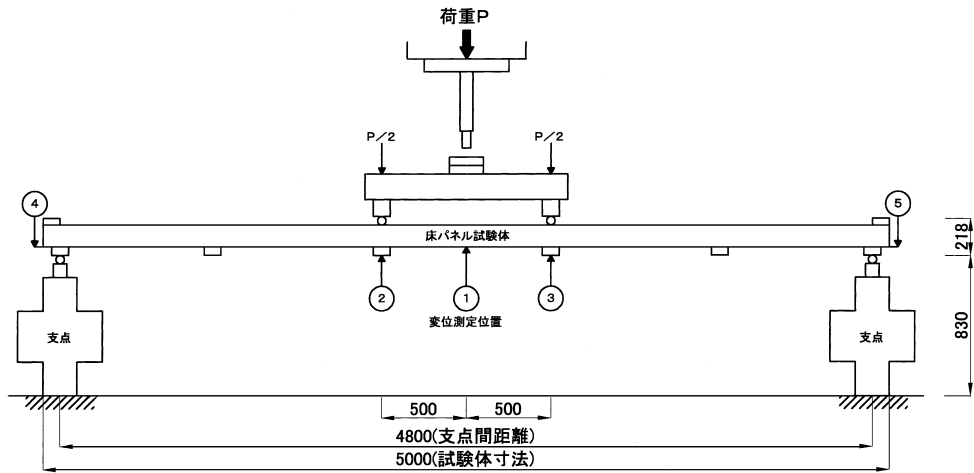


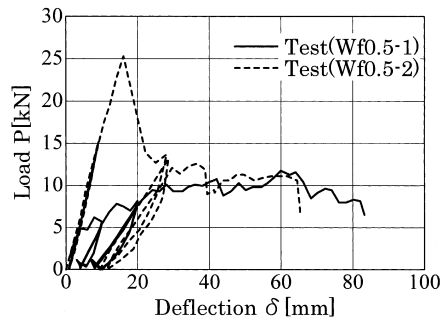
図 18 床パネルの曲げ試験装置概要 (2)

Fig. 18. The outline of the bending test of floor panels prefabricated with the wooden frame sandwiched by surface plywood sheets (2).

図 19 1/2 床パネルの曲げ試験結果 (荷重 P -中央点変位 δ の関係)

Fig. 19. Load-deflection curves of the half sized floor panels (shown in Fig. 17).

P : Concentrated load on the center of the panel,
 δ : Deflection of the center.



材切り欠き部の変形が急速に進んだ(図 20, 21). 表面合板が健全で枠材, 芯材と一体化していればパネル強度はもっと上昇するはずである. 図 22 は床パネルを 1/2 に切断した Wf0.5-2 試験体の結果と解析値の比較である. 実験の荷重-変位関係は, パネル表面合板の早期破損

表 4 床パネルの曲げ試験結果
Table 4. Results of the bending tests of the floor panel.

部材記号	含水率%	寸法(長さ・幅・厚さ)	初期剛性(kN/mm)	耐力(kN)	備考
Wf0.5-1	10.3	2500 × 998 × 130	1.372	11.76	1/2パネル
Wf0.5-2	10.8	2500 × 998 × 130	1.666	25.284	1/2パネル
Wf-1	14.6	5000 × 998 × 130	0.2352	5.684	



図 20 床パネル圧縮側合板の剥離
Fig. 20. Separating fracture of the surface plywood plate of floor panels.

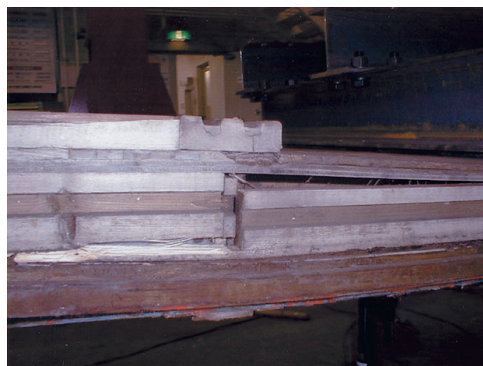


図 21 床パネル合板の剥離と枠材切り欠き部の破壊
Fig. 21. Separating fracture of the surface plywood plate and failure of the wooden frame with notch in the floor panel.

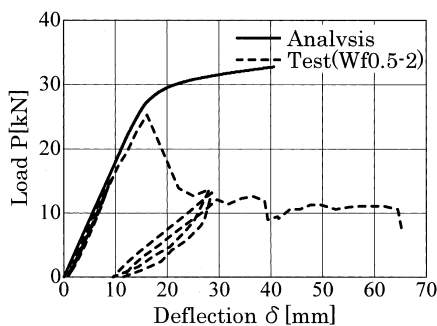


図 22 1/2床パネルのP- δ 関係に関する実験と数値解析結果の比較
Fig. 22. Comparison between tests and numerical analysis of the half sized floor panel on P- δ relations.

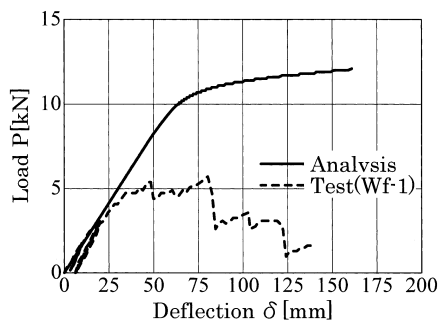


図 23 フルサイズ床パネルのP- δ 関係に関する実験と数値解析結果の比較
Fig. 23. Comparison between tests and numerical analysis of the full size floor panel on P- δ relations (shown in Fig. 18).

によって比較的小さな荷重で終局状態に至っている。ここで用いた数値モデルは、合板が破損した後のパネルの脆性的挙動までは表現できないが、初期剛性も含めて低荷重域のパネル挙動のよい近似を与えている。図23のWf-1についても低荷重域では実験と解析結果がほぼ一致した。以上の結果より、ここで用いた解析モデルは材料が降伏するまでの木質構造の挙動を比較的良好に再現できることが分かった。非線形域の挙動を予測するためには解析モデルをさらに工夫する必要がある。

4. ま と め

屋根、外壁、床の各パネルの中で水に浸食された形跡のあるものは、特に表面合板の劣化が顕著であり、それがパネルの構造性能劣化に直接的に影響した。総体的にみて内壁パネルの劣化が最も少なかった。しかし、パネル強度が総体的に落ちてはいるものの、設計強度はまだ十分に維持しており、現状でも南極で使える構造性能を保っている。

このような極限環境にある木質サンドイッチパネルの耐久性設計では、表面合板の保全が構造上最も重要な課題であることが確認された。

また枠材、芯材を繊維方向に接合して大型パネルを作る場合、長期的には接着接合位置で故障が現れやすいので、このような接合部を直接外気にさらすような使い方は避けたほうがよい。すなわち直接外気にさらされる部位には何らかの仕上げを施して構造材を保護する必要がある。構造用集成材についても塗装などの保護層なしで直接外気にさらすような使い方は、耐久性維持のためには避けるべきであろう。

謝 辞

本実験は日本大学理工学部船橋校舎大型構造物試験棟で行った。実験にあたっては国立極地研究所から研究費の補助を受けた。また平成10年度日本大学理工学部建築学科卒業研究生の協力のもとに実験を行った。関係者各位に感謝する。

文 献

- 半貫敏夫・田中寿幸・ギブ・パトリシア・高橋弘樹・岡村武士 (1999): 第10居住棟パネルの強度試験。南極昭和基地居住施設の耐久性。国立極地研究所設営専門委員会・建築分科会, 日本大学理工学部, 39-43.
- 平山善吉・斎藤俊一・荒井淳・宮澤裕紀 (1999): 南極昭和基地居住棟の床パネル芯材の強度試験。南極昭和基地居住施設の耐久性。国立極地研究所設営専門委員会・建築分科会, 日本大学理工学部, 53-56.
- ミサワホーム総合研究所技術開発部 (1999): 第10居住棟および放球棟の合板の性能に関する試験報告。南極昭和基地居住施設の耐久性。国立極地研究所設営専門委員会・建築分科会, 日本大学理工学部, 59-60.
- 高橋弘樹・韓昶・半貫敏夫・岡村武士 (1999): 南極昭和基地居住施設の耐久性—木質パネルの強度試験—。日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 95-96.

(2001年12月10日受付; 2002年2月6日改訂稿受理)