

## 鳥取県環境学術研究等振興事業費補助金研究実績報告書（環境創造部門）

研究期間（ 3年目/ 3年間）

研究者 又は 研究代表者	氏名	(ふりがな) いなだ ゆうじ 稲田 祐二
	所属研究機関 部局・職	米子工業高等専門学校 建築学科・教授 電話番号 0859-24-5172 電子メール inada@yonago-k.ac.jp
研究課題名	地場産木材を用いた建築空間構造システムの開発	
研究結果	<p>本研究では、まず、新構造システムに於ける接合部の設計のためのビスやボルトあるいは両者の併用といった、より合理的な接合法を見出すための接合部の構造性能実験を行った。次に、これまでの研究成果を十分に考慮しながら、コストを支配する部材加工性や施工性も考慮した総合的な視点にたった新構造システムの設計およびコストスタディーを行った。最終的には、製品開発につなげるために実物大プロトタイプの実験を行いコストと施工性能を確認した。ここで、実施した接合部の実験は、鳥取産の杉間伐材あるいはLVLを用いた角材どうしの剪断試験試験である。また、想定している構造計算は、新しいスペースフレーム構造が既往の平面架構システムと全く異なるペーストラックチャーであることから設計荷重に対する3次元解析に基づくものとした。更に、性能実験は小規模プロトタイプ供試体（スパン3m級）による、その後の中大規模プロトタイプ供試体（スパン6m級）による改良設計および中大規模プロトタイプ供試体（スパン6m級）による実験棟の施工実験を行った。なお、建築基準法への適合性確認用の構造計算を実施した。</p>	
研究成果	<p>平成26年度および27年度の研究成果をもとに平成28年度は新構造システムの開発研究を完了させた。研究開発の最終目標とする6m スパンの改良型プロトタイプ実験棟の施工実験を鳥取市で行った。構造システムに付随する部分である基礎スラブ・腰壁等については、標準構造設計を実施し、仕様を確定した。また、施工計画を精査し合理的な施工法を実践することにより、本研究で開発した新構造システムが様々なスパンの建築構造物に展開が可能なシステムであることの実証例とすることができた。また、完成した実験棟は、新構造システムの実施例とし今後の展開の起爆剤として活用できる。</p> <p>一方、新構造システムの耐震設計に必要となる地場産LVLを用いたボルト接合部の復元力特性を正負交番繰り返し載荷実験により確認した。得られた復元力特性を用いて耐震性能を確認するシステムの構築を検討した。更に、平成27年度に施工実験に用いたプロトタイプを実験供試体とした新構造システムの鉛直載荷実験の検討を行った。これらの学術的な研究成果は平成26年度と27年度に実施した研究成果とあわせてまとめ、本構造システムの中大規模の建築構造物への適用の基礎資料が完成した。</p>	
次年度研究計画	本年度が研究最終年度であり、本研究テーマの研究は終了するが、次年度以降も新たなテーマで鳥取県産材の活用策テーマとした研究を実施する予定である。	
報告責任者	所属・職 氏名	総務課企画・社会連携係 福留 のぞみ 電話番号 0859-24-5007 電子メール kikaku@yonago-k.ac.jp

注1) 表題には、環境創造部門、地域振興部門、北東アジア学術交流部門のいずれかを記載すること。

2) 「研究期間（ 年目/ 年間）」及び「次年度研究計画」は、環境創造部門及び地域振興部門において記載すること。

3) 研究者の知的財産権などに関する内容等で、非公開としたい部分は、罫線で囲うなど明確にし、その理由を記すこと。

4) 研究実績のサマリーを併せて提出すること。

# 地場産木材を用いた建築空間構造システムの開発

米子高専 建築学科

稲田 祐二

## 1. はじめに

### 1. 1 背景・目的

日本は、国土における森林面積の割合が3分の2を占める世界でもトップクラスの森林大国である。しかしながら、国内の木材自給率が2割程度で、多くは海外からの輸入材を使用している。また、戦後急速に植林された人工林が成熟期を迎え、国産材を使用しなければならない時代を迎えている。一方、戦後の需要に供給が追いつかず、比較的成本のかからない輸入材に頼ったことや、燃料革命で薪炭材としての需要が激減したことで、国産材の需要は低迷している。結果として、産業として立ち行かなくなった林業は衰退し、森林の整備が行われず荒廃している人工林が少なくない。

地元山陰地方は、森林の現状に関して同様の問題を抱えているが、総面積の8割弱が森林であることを考慮すると、森林を豊富な資源として活用してやれば、地域活性化に極めて有効であると考えられる。そこで、地域材の新たな需要を喚起するために新しい構造システムの開発を行う。採用する構造形式は、木材が圧縮力に強いという特徴を活かし、荷重を主として圧縮力で伝えるヴォールト構造システムを採用する。また、構造材料として地域材から製造された杉LVLや間伐材を用いることによって、小径木を有効に活用した力学的合理性を有する大空間建築システムの構築をはかるものとする。

### 1. 2 LVLについて

LVLとは、「単板積層材(Laminated Veneer Lumber)」のことであり、丸太を大根のかつらむきのように剥き、薄く切削した単板(ベニヤ)を乾燥させ、繊維方向をそろえて

接着し、積み上げながらつくられる木材加工品である(図1)。間伐材のような短小材からも材料特性に優れた長大材が生産できる。本研究では、大空間への転用も視野に入れているため、LVLならびに間伐材の活用が期待できる。

## 2. ヴォールト構造の試設計

### 2. 1 設計コンセプト

設計条件としては、実用化を目指していることから建築基準法に適合させるため、1次設計を実施する。また、熟練した技術を持たない者でも容易に施工ができ、低コストで十分な強度を保持するものとする。さらに、構造躯体を表しとすることから意匠性も兼ね備えたものとする。

### 2. 2 ヴォールト構造の概要

ヴォールト構造の主架構は斜交アーチで、横架材以外はトラス部材としており、軸力だけで力を伝達する図2に示すようなスペースフレームとなっている。図3に示すように使用している部材は横架材、斜材、下弦材、けらば材の4種類である。主材は鳥取県産LVLの等級60E-225F・35V-30Hを使用する。尚、各部材の接合は、本システム用に設計した接合金物を用いたボルト接合である。

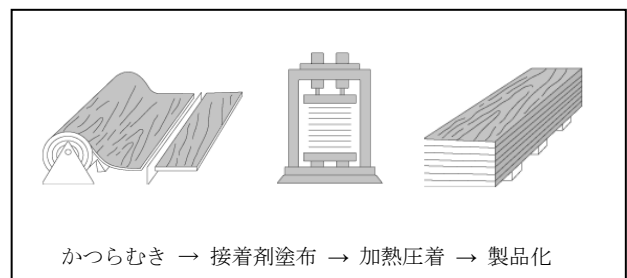


図1 LVLの製造工程

## 2. 3 設計用荷重

- ①材料 鳥取県産LVL等級60E-225F・35V-30H,  
接合金物：SS400, ボルト：JIS B 1180
- ②規模 スパン6m 高さ3m 奥行6.8m
- ③建設想定地 鳥取県日南町

設計にあたり多雪地域を想定するため、鳥取県の中で比較的積雪量の多い日南町を建設想定地に選定した。設計荷重は表1の組み合わせにて行う。垂直積雪深度は186cmである。表2に設計用荷重条件を、図4に節点荷重積算用の支配面積を示す。

## 2. 4 ユニット式ヴォールト構造

図5 (a) に示すようにはじめに3種類の部材を使い、長方形の枠にブレースの入った基本となるユニットを作る。作ったユニットとユニットを図5 (b) に示すようにボルトで接合し、4種類目の部材（下弦材）を使い位置を決める。同様の過程で結合することにより斜交アーチを基本としたヴォールト構造が形成される。

写真1はユニット式ヴォールト構造の模型である。模型によって施工性の確認を行った結果、各ユニットをボルトで接合すると、締め固められ半円の形をしっかりと形成し、自立することを確認することができた。また内部からも軸組み構造が形成する意匠の美しさが見て取れた。

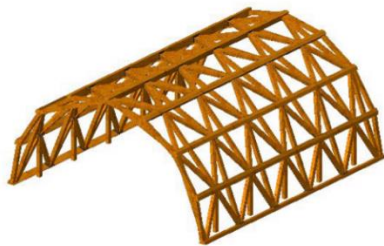


図2 ヴォールト構造のイメージ

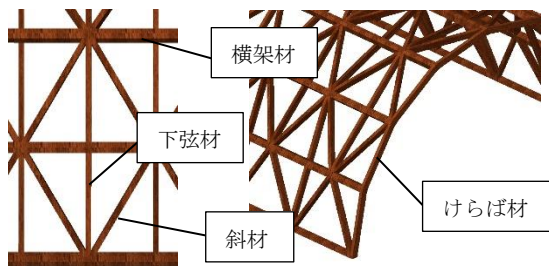


図3 ヴォールト構造の部材区分

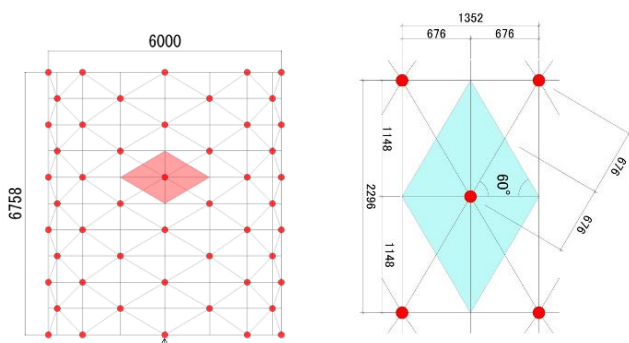


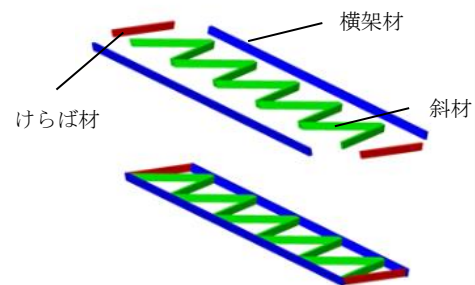
図4 各節点と支配面積

表1 荷重の組み合わせ

長期	ケース L - 1	G+0.7S	
短期	S - 1	G+S	固定荷重 (G)
	S - 2	G+W	積雪荷重 (S)
	S - 3	G+0.35S+W	風荷重 (W)
	S - 4	G+0.35S+K	地震荷重 (K)

表2 設計用荷重条件

区分	設計値	備考
仕上げ重量	200KN/m <sup>2</sup>	
地震荷重	振動特性係数 1.0	
	地域係数 1.0	
積雪荷重	長期 0.7S	多雪地域
	短期 0.35S	
風荷重	地表面粗度 I	



(a) ユニットの組立



(b) ユニットの結合によるヴォールトの組立

図5 ユニット式ヴォールト構造の組立法

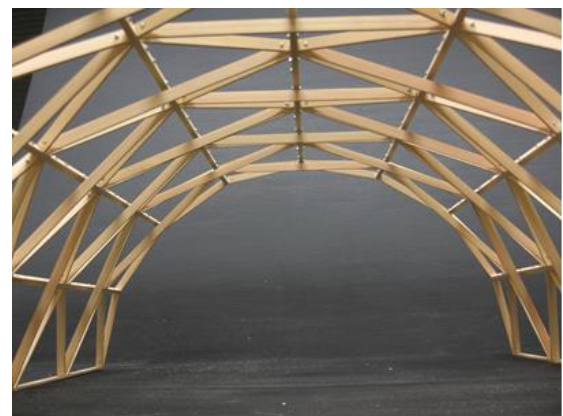


写真1 ユニット式ヴォールト構造の模型写真

## 2. 5 プロトタイプヴォールト構造

### 2. 5. 1 プロトタイプヴォールト構造の概要

ユニット式ヴォールト構造で解析を行った結果、風荷重時の変位が厳しいため、力学的により合理的になるように図6に示す部材を柱脚部と妻面に追加し、柱脚部を固定に近づけ、構造上イレギュラーとなる部分をなくした。

また、ユニット式ヴォールト構造ではユニットとユニットをボルトで接合する提案であったが、接合部のボルトの露出が多く、力の伝達能力と意匠性を含めて接合部のディテールの検討を行った。日本は災害列島で重力以外にも地震力、風圧力等を設計上考慮する必要があり、部材や接合部に引張力が作用することは避けられない。また、本構造は力学的、施工的、更にはコスト的にも接合部が要となる。今回は意匠性を重視して金物を部材の中に挿入し、ボルトで接合する図7のようなディテールを採用した。ディテール決定後、施工性をチェックするため1/1スケールのモックアップを製作した(写真2)。



図6 改良による追加部材

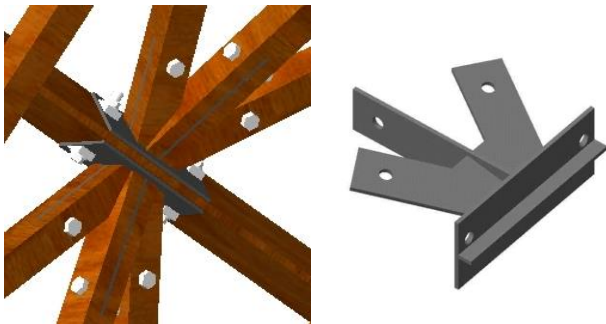


図7 接合部のディテール及び接合金物



写真2 プロトタイプの1/1スケールモックアップ

### 2. 5. 2 プロトタイプヴォールト構造の施工実験

6mスパンで設計を行ったプロトタイプヴォールト構造を半分のスパンの3mスパンモデルによって施工実験を行った。プロトタイプヴォールト構造は横架材を半割りにすることで、ユニット化も可能になっているが、今回の施工では重機等は使用しなかったため、ユニットを組んで結合する方法はとらなかった。写真3は施工の様子である。施工の手順は両側から順に斜材、下弦材、横架材の順に組み立てた。単純に両側から組立てた結果、頂部の金物が入らず、ボルトを緩く仮止めし余裕を持たせて組立てを行い、ヴォールト全体が組みあがった後に本締めを行う方が良かったことが分かった。しかし、スパンが6mやそれ以上の規模になると部材の重量も重くなり、頂部で調整することが困難になるため施工方法の検討を行わなければならないことが分かった。

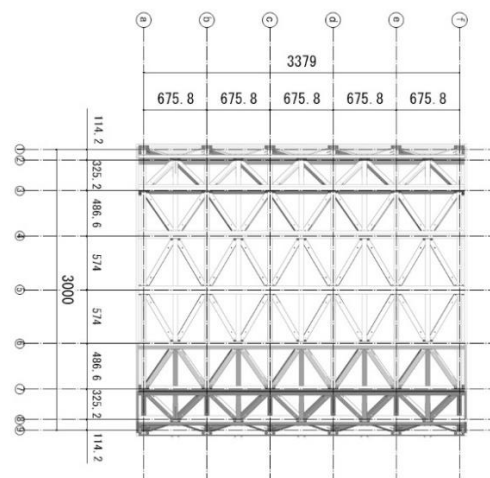


図8 3mスパンヴォールト伏図

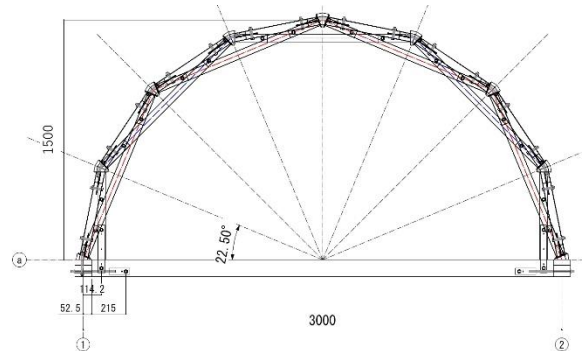


図9 3mスパンヴォールト軸組図



写真3 3mスパンヴォールトの施工状況



## 2. 6 改良型プロトタイプヴォールト構造の設計

### 2. 6. 1 接合金物の設計

プロトタイプの接合部ディテールは、横架材に対し両側から金物ではさみ、金物に斜材および下弦材を取り付けるディテールとなっていた。これはユニット化する際に、横架材を半割りにするためであった。しかし接合金物に引張力が生じた際、図10のような金物のプレートが曲げ破壊を生じ、構造全体の耐力低下に繋がっていた。この問題解決のために、1接合部当たり2個使っていた接合金物を図12のように1個にし、サイズも可能な限り小さくした(図11)。

### 2. 6. 2 横架材の設計

プロトタイプのヴォールト構造では、写真4に示すように横架材が1本の長尺物であり設計コンセプトとの相違があった。1本の長尺材で作られていた横架材を図13に示すように2パートもしくは3パートに分割し、部材の短縮化を図った。図13の白と黒で分かれている部分が分割した位置である。分割することで部材長さを短縮化し、コストの削減を行った。図13の△は横架材と接合金物の接合位置を示している。分割する上で、横架材の回転を防止するために、横架材が接合金物と2箇所以上接合されるように設計した。

### 2. 6. 3 モックアップ製作

改良型プロトタイプヴォールト構造の施工性の確認のために1/1スケールのモックアップを製作した(写真5)。プロトタイプに比べ、接合金物の見え掛かりは少なくなり意匠性の改善にも成功した。部材の施工条件の確認を行うために、モックアップを製作した結果、図14に示すように2つの接合金物の位置が決まると間に入る斜材は組み立てが不可能になることが分かった。また、図15に示すように下弦材は側面から見ると円の中心に向かった台形となるため外側から挿入する必要があることを確認した。

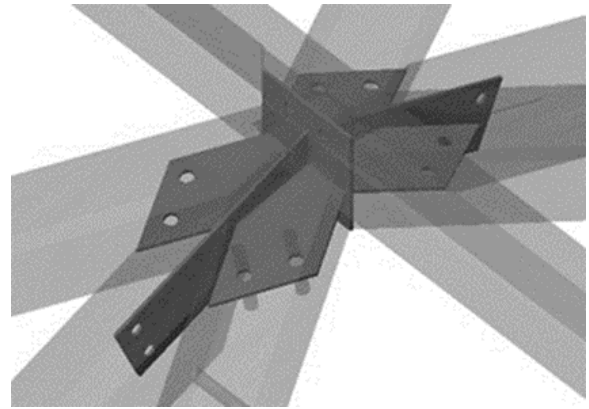
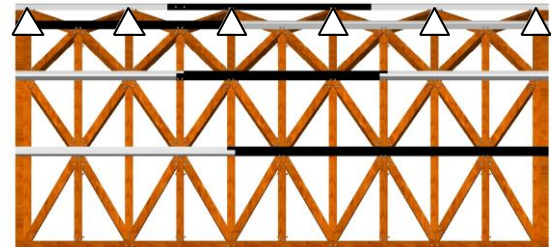


図12 改良型の接合金物



写真4 プロトタイプヴォールト構造の横架材



△ 横架材の接合位置

図13 横架材の分割

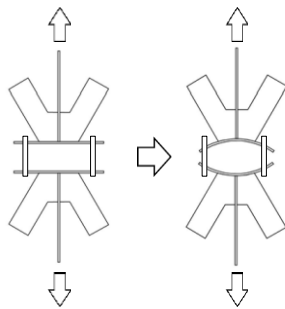


図10 接合金物の曲げ破壊

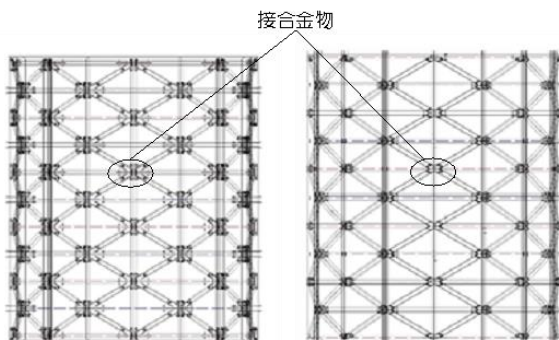


図11 プロトタイプ伏図(左) 改良型伏図(右)



写真5 改良型の1/1スケールモックアップ

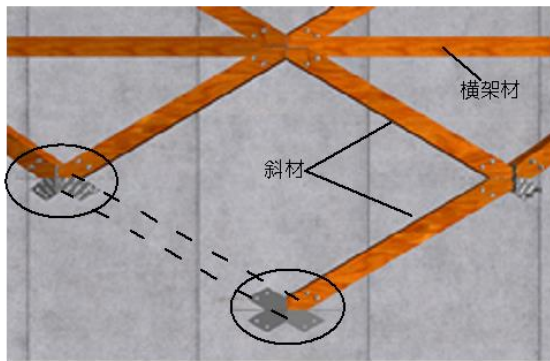


図14 斜材の施工条件

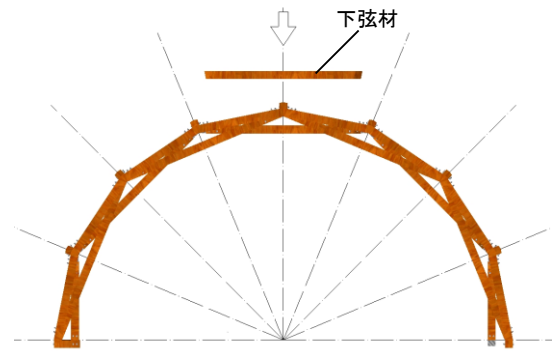
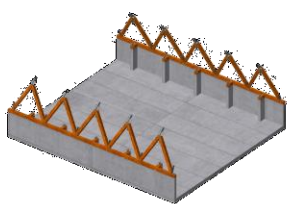
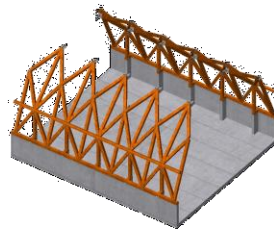


図15 下弦材の施工条件

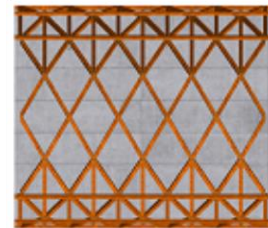
建て方パターン1



Step.( 1-1)

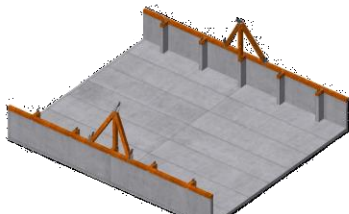


Step.( 1-2)

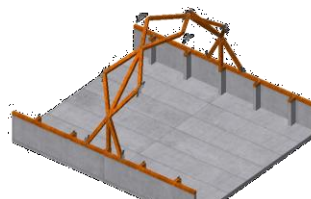


(a)

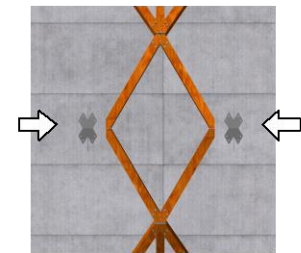
建て方パターン2



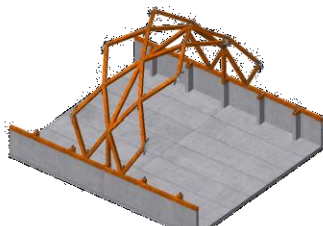
Step.( 2-1)



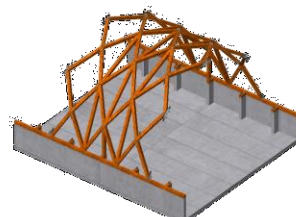
Step.( 2-2)



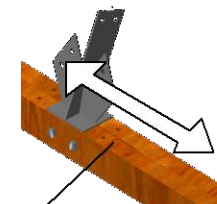
(b)



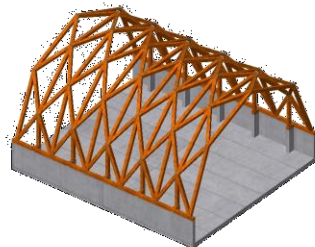
Step.( 2-3)



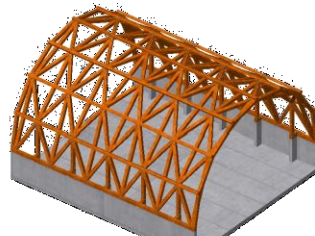
Step.( 2-4)



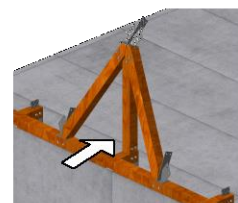
(c)



Step.( 2-5)



Step.( 2-6)



(d)

図16 施工計画



## 2. 7 改良型プロトタイプヴォールト構造の施工計画

施工計画を検討した結果を図16に示す. 図16に示すパターン1は施工出来ないパターンである. 図16のStep. (1-1)からStep. (1-2)のように両側から組み立てていくと頂部で図16(a)のようになり, 頂部の接合金物が入らない状況になる. 解決策として, 頂部の斜材を片側のみ半割りにすることで施工が可能になるが, 構造部材を割ることは合理的ではないといった観点から採用しない. 図16に示すパターン2が採用した施工方法である. 両側から順に組み立てる点はパターン1と同様であるが, パターン2ではStep. (2-1)からStep. (2-2)のように中央部のみを頂部まで組み立てる. 頂部まで組み立てたら図16(b)のように横から頂部の接合金物を取り付ける. 次に, 斜材を横から差し, Step. (2-3), Step. (2-4)と外側に組み立てていく. 斜材および接合金物を横から差し組み立てるにあたり柱脚部の接合金物については, 図16(c)のように土台に接合金物をスライドするための溝孔を作っておくことで, 横から接合金物を差すことを可能とした. Step. (2-5)のように斜材および下弦材の組み立てが完了したら, 最後に横架材を取り付け, 施工完了である.

## 2. 8 改良型プロトタイプヴォールト構造の施工実験

### 2. 8. 1 仮設基礎の設計

当初の予定ではベタ基礎を採用した腰壁の上に施工を行う計画であったが, 予算と実験終了後の取り壊しの関係で仮設の基礎を設計しその上に施工を行うものとする. 図17にはヴォールトの完成予想図を示す. また基礎の部分は仮設の基礎としている. ベタ基礎の代わりに施工する仮設の基礎はスラスト荷重を抑えるために両側の土台を長ネジボルトでつなぐ形とした. 図18に長ネジボルトの配置計画を示す. また, 足場設置のために仮設基礎の上に構造用合板で床を作成する. そのため構造用合板を張るための大引を仮設基礎として設置した. 大引の配置計画と構造用合板の配置計画を図19, 20に示す.

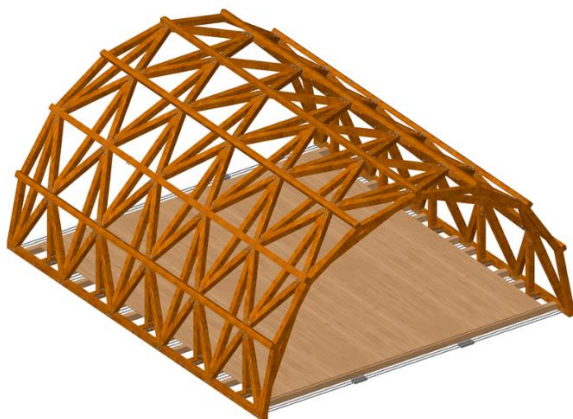


図17 改良型ヴォールト構造の完成予想図

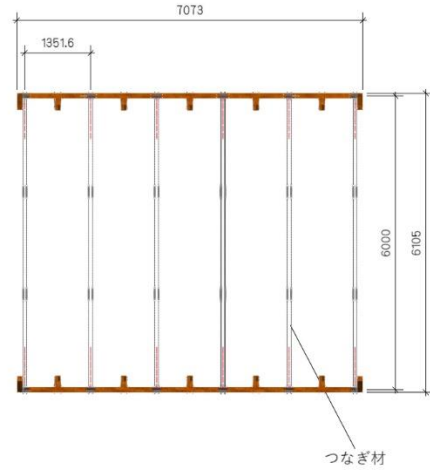


図18 長ネジボルトの配置計画

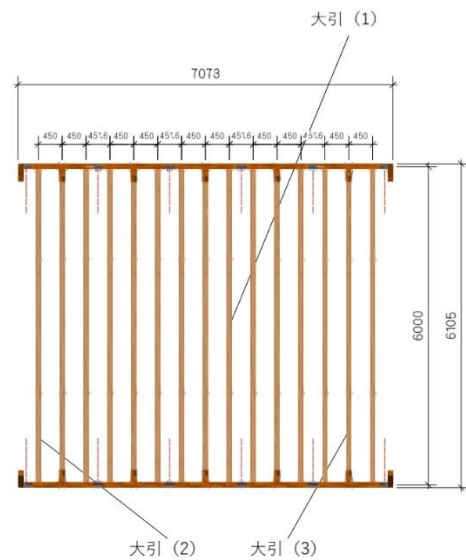


図19 大引の配置計画

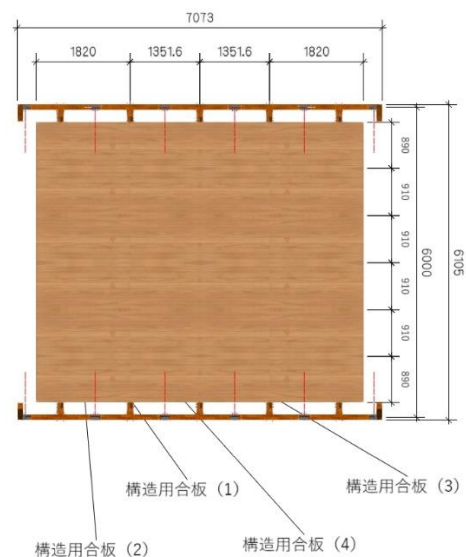


図20 構造用合板の配置計画

## 2. 8. 2 施工実験

改良型プロトタイプヴォールトの施工性を確認し、少人数かつ短時間で重機を使わず施工できるか確認する。初めに、写真6に示すような自重のスラストを処理するための仮設基礎を作成し、その上に足場を建設した。写真7には施工の様子を示している。足場は2段で計画通り中央部から外側に向かって施工を進めた。施工は大工4人と米子高専学生7人、教員2人の計13人で行った。使用した道具はインパクトドライバー、ハンマー等の工具のみで熟練した技術がなくても施工できることを確認した。施工時苦勞した点として接合金物のボルト孔と部材のボルト孔が一致せず、ハンマーで叩いて合わせるがあった。原因としては部材のボルト孔の”あそび”が小さかったことが考えられる。写真8に示しているのが完成したヴォールトである。また、躯体の組立は約半日で終わったため、短時間で施工できることも確認できた。写真9はヴォールトを内部から見たものである。木造の美しい軸組により迫力のあるヴォールトが完成した。また、接合金物を変更したことによって、改良型プロトタイプではボルトの頭以外ほとんど金物が見えないようになり、意匠性の向上も確認できた。

## 2. 9 改良型プロトタイプの施工性・経済性

表3に改良型ヴォールトの部材リストを示すし、表4には施工実験により得られた3mプロトタイプ、6m改良型の両モデルの施工性・経済性に関わる情報をまとめる。ヴォールトの躯体は主に斜材及び下弦材で構築されている。下弦材の最大長さは2323.6mmであり、約2mの部材を使って6mのスパンのヴォールトが構築できており、LVLや間伐材を活用した大空間の構築が期待できる。また、部材の最大重量は10.5kgで6mスパンであれば2人いれば容易に施工が可能であることが分かる。表4に示しているように木材種別が7種から12種に増えているが、これは横架材を分割したことと木材加工の関係で横架材を半分に分けているためであり、実質的にはプロトタイプも改良型プロトタイプも斜材、下弦材、横架材、けらば材の4種で構成される。スパンを倍にしたことで部材重量及び金物重量は約約8倍になることが予測されるが、今回接合金物の改良を行ったことで、3mスパンプロトタイプの接合金物は2個で2.0kg、6mスパン改良型では1個5.4kgで、サイズダウンに成功したことが確認できる。表4から明らかなようにヴォールト架構の組み立てにかかる人員、時間を計測して(人員数)×(時間数)によって施工性を評価すると、6mは3mに比べると人員はほぼ2倍となっているが時間は3mの施工時と同じ時間となっている。時間短縮の背景には、人数の他にインパクトドライバーの使用だと考えられる。しかし、そのことを考慮しても6mは3mに比べて、部材容積は8倍となっており、多くの作業量が増えたことを考えると、人数と工具の使用に加えて、接合金物の改良や施工方法の検討により施工に要する時間が短縮できたと考えられる。また、写真10を見て分かるように接合金物の見え掛かりが少なくなったことで施工性、経済性だけでなく、意匠性の改善が確認できた。

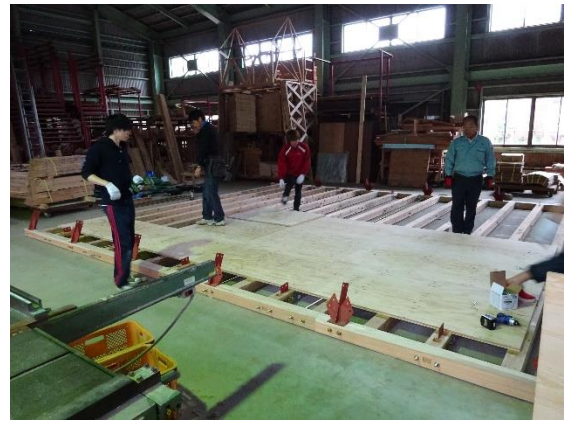


写真6 仮設基礎の作成



写真7 施工の様子



写真8 改良型ヴォールト構造の外観



写真9 改良型ヴォールト構造の内部空間



表3 改良型の部材リスト

	種別(種)	幅*せい*長さ (mm)	数量(本)	重量(kg)
斜材	1	105*105*1363.5	80本	6.1kg
下弦材	3	105*105*1053.7	10	49本 4.8kg 9.5kg 10.5kg
		105*105*2094.9	31	
		105*105*2323.6	8	
横架材	7	105*87*2703.2	6	34本 10.1kg 3.8kg 4.4kg 8.2kg 7.6kg 5.7kg 5.0kg
		52.5*87*2016.9	6	
		52.5*87*2352.9	6	
		52.5*87*4380.3	4	
		53.5*87*4044.3	4	
		52.5*87*3028.7	4	
		52.5*87*2692.7	4	
けらば材	1	105*105*1191.4	16本	5.4kg
土台	4	52.5*105*2015	4	22本 4.6kg 3.8kg 7.6kg 1.6kg
		52.5*105*1679	4	
		52.5*105*3379	4	
		105*105*345	10	
		サイズ*長さ (mm)	数量(個)	重量(kg)
ボルト	1	M16*130mm	626個	0.237kg
接合金物	5	-	60個	5.7kg

表4 施工性・経済性に関する項目

		3m	6m
施工	工具	レンチ	レンチ, インパクトドライバー
	施行者	学生	学生, 大工
	時間×人員	12時間×5人	1日目: 7時間×12人 2日目: 5時間×6人
部材	木材種別(種)	7	12
	接合金物(種)	3	5
	部材数(個)	154	179
	接合金物数(個)	88	60
	金物重量(kg)	1.0	5.4
	部材容積(m³)	396.1	3171.0
内部空間	有効高さ(m)	1.5	3



写真10 内部から見たヴォールトの比較

### 3. まとめ

以下、本研究で明らかになった事項を例記する

- 1) 接合金物のディテールを改良することで、コスト削減および構造体の軽量化に成功した。
- 2) 短小材による大空間構造物の構築といった観点から横架材を分割し、最大部材長さを短縮した。
- 3) 施工実験を行うことで改良型プロトタイプでの施工性を確認できた。
- 4) 開発した新しいヴォールト構造システムは様々な規模の架構に展開が可能である。

#### 参考文献

- [1] 林野庁 木材需給: <http://www.rinya.maff.go.jp>
- [2] 全国LVL協会: <http://www.lvl.ne.jp/index.html>
- [3] 北海道: 地域材の有効利用のための新建築構造システムの開発, 建築学会中国支部研究報告, Vol.35,079,2012.3
- [4] 中町: 地場産木材の建築構造材への有効利用に関する研究 2015年中国地区高専専攻科交流会予稿集, 2015.4
- [5] 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説2009.3.25

謝辞 本研究を実施するにあたり、以下の方々より有益なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

(株) ウッドファクトリー, (株) 大上建築, (有) 門脇構造研究所, (株) 清水設計, (株) ジューケン, (有) 前畑鉄工所, 大山プレカット協業組合