

2.2 桐朋学園／（株）隈研吾建築都市設計事務所

事業名		桐朋学園大学仙川キャンパス第二期工事の設計・性能実証	
実施者（担当者）		学校法人 桐朋学園／株式会社隈研吾建築都市設計事務所	
建築物の概要	用途		大学
	建設地		東京都調布市
	構造・工法		木造軸組構法（一部CLT折屋根構造）
	階数		3
	高さ（m）		13.4
	軒高（m）		13.3
	敷地面積（㎡）		41946.57
	建築面積（㎡）		1394.7
	延べ面積（㎡）		2457.8
		階別面積	1階
2階			785.4
3階			396.2
CLTの仕様	CLT採用部位		壁、屋根
	CLT使用量（㎡）		加工前製品量約200㎡、建築物使用量約180㎡
	壁パネル	寸法	120mm厚
		ラミナ構成	3層4プライ
		強度区分	Mx90A相当
		樹種	ヒノキ・スギ
	床パネル	寸法	－
		ラミナ構成	－
		強度区分	－
		樹種	－
	屋根パネル	寸法	150mm厚
		ラミナ構成	5層5プライ
		強度区分	Mx90A相当
		樹種	ヒノキ・スギ
木材	主な使用部位（CLT以外の構造材）		柱・梁：レッドウッド集成材
	木材使用量（㎡）※構造材、羽柄材、下地材、仕上材等とし、CLT以外とする		約580㎡
仕上	主な外部仕上	屋根	ガルバリウム鋼板（t=0.4）立て付け葺き
		外壁	ガルバリウム鋼板（t=0.35）＋木ルーバー
		開口部	アルミサッシ＋ペアガラス（T＝3程度）
	主な内部仕上	界壁（講堂）	PB21×2＋木軸（GW32K 50×2）＋合板t24＋木軸＋CLT
		間仕切り壁（教室）	PB21×2両面＋合板t24両面＋木軸（GW32K 50×2）
		床（教室）	FL15＋合板12＋置床30＋根太＋シタ－CON80＋合板12＋防振ゴム40＋合板24
		天井（講堂）	CLT＋木軸＋合板24＋木軸（GW32K 50×2）＋PB21×2
構造	構造計算ルート		ルート2
	接合方法		ビス接合＋鋼板添え板ビス固定
	最大スパン		17.4m
	問題点・課題とその解決策		実証試験の実大試験を行った結果、折板屋根構造の地組が難しいことが判明。折板屋根の形状を拘束するようなリブを中空屋根内に設けることが必要ことが判明、施工時には反映予定。
防火	防火上の地域区分		準防火地域
	耐火建築物等の要件		耐火建築物
	本建築物の防耐火仕様		60分を超える準耐火構造の検討
	問題点・課題とその解決策		2019年6月の改正法施行を見据え入れ燃えしろ設計による準耐火構造の可能性を検討した。
温熱	建築物省エネ法の該当有無		該当なし
	温熱環境確保に関する課題と解決策		講堂側屋根にはCLT折板構造を採用し、中空部を設ける。
	主な断熱仕様（断熱材の種類・厚さ）	屋根（又は天井）	A種フェノールフォーム保温板2種3号 t60
		外壁	GW32K t50 ＋ GW32K t50×2
床		GW32K t50	
施工	遮音性確保に関する課題と解決策		大判パネルによる架設と接合方法の再考が必要
	建て方における課題と解決策		基礎上は防水シートを確実に施工し、防腐防蟻処理実施
	給排水・電気配線設置上の工夫		
	劣化対策		
工程	設計期間		2018/8月～1月（6カ月）
	施工期間	（予定）2019年10月～2020年12月	
		CLT躯体施工期間	（予定）2020年 3月～2020年 6月
	竣工（予定）年月日		（予定）2020年12月末
体制	発注者		学校法人 桐朋学園
	設計者（複数の場合はそれぞれ役割を記載）		基本設計：隈研吾建築都市設計事務所、実施設計：未定
	構造設計者		基本設計：ホルツストラ、実施設計：未定
	施工者		未定
	CLT供給者		未定
	ラミナ供給者		未定

実証事業名：桐朋学園大学仙川キャンパス第二期工事の設計・性能実証

建築主等／協議会運営者：学校法人 桐朋学園／株式会社隈研吾建築都市設計事務所

1. 実証した建築物の概要

用途		大学		
建設地		東京都調布市若葉町		
構造・工法		木造軸組工法＋CLT 折板構造		
階数		地下 1 階地上 3 階		
高さ（m）		13. 4	軒高（m）	13. 3
敷地面積（㎡）		41, 946. 57	建築面積（㎡）	1, 394. 7
階別面積 （㎡）	1 階	1, 099. 9	延べ面積（㎡）	2, 457. 8
	2 階	785. 4		
	3 階	396. 2		
CLT 採用部位		壁、天井		
CLT 使用量（㎡）		加工前製品量約 200㎡、加工後建築物使用量約 180㎡		
CLT を除く木材使用量（㎡）		約 580 ㎡		
CLT の仕様	（部位）	（寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種）		
	天井	150mm 厚/5 層 5 プライ/Mx90A/ヒノキスギハイブリッド		
	壁	120mm 厚/3 層 4 プライ/Mx90A/ヒノキスギハイブリッド		
設計期間		2018 年 8 月～2019 年 1 月（6 カ月）		
施工期間		（予定）2019 年 10 月～2020 年 12 月		
CLT 躯体施工期間		（予定）2020 年 3 月～2020 年 6 月		
竣工（予定）年月日		（予定）2020 年 12 月末		

2. 実証事業の目的と設定した課題

隣接する木造4階建ての校舎のコンセプト「木が奏でる音の学び舎」に追随する「楽器のように木でできた」音楽ホールを兼ねた講堂を併設する校舎の計画を行うものである。講堂は無柱の大スパン構造が必要となる。本講堂を木造で計画する場合、大スパンの架構には折板構造が適しているが、折板を CLT パネルとすることで音響反射面としても有効な天井・壁の仕上げとして現しで使えることが実証できれば、CLT パネルの新たな展開方法の可能性が生まれると期待できる。

今回実証事業で設定した課題は以下である。

- ① CLT 折板構造の音響性能を模型を使った波動音響解析による検証実験。
- ② ホール大空間を CLT パネル現しで仕上げを兼ねた場合と、他構造で全体に仕上げをした場合との併設建築物のコスト比較。
- ③ 準防火地域での 3000 m²弱の建築物で木造での設計ルートの検討

3. 協議会構成員

(設計) (株)限研吾建築都市設計事務所：寺川、原田、今井

(構造設計) (株)ホルツストラ：稲山

(音響設計) (株)唐澤誠建築音響設計事務所：唐澤

(防耐火設計) 桜設計集団一級建築士事務所：安井昇

(材料調達) 住友林業(株)：熊川、西出、入江

(材料) 銘建工業(株)：車田

4. 課題解決の方法と実施工程

CLT パネルの折板構造の構成の検討は構造検証に基づく 1/10-1/30 の模型を制作し、模型による波動音響解析を行い構造・音響共に成り立つ最適な折板形状を模索した。

CLT パネル折板構造の剛性・耐力については 17.4m スパンのホール屋根を支える構造性能を確認するために接合部の要素試験と実大試験を行い、その結果を 3 次元解析モデルに入力し、応力・変形解析にて検証した。

全体で 3000 m² 弱の建築物を 2019 年 6 月の改正法の施行により 1 時間を超える準耐火構造とすることで CLT 折板構造を現しで利用できる可能性について、確認機関と調整を進めながら検討を行った。

＜協議会の開催＞

2018 年 8 月 28 日：第 1 回開催、基本条件、法規等の条件整理

10 月 5 日：第 2 回開催、防耐火計画・構造計画・

音響シミュレーションによる室内形状検証

12 月 10 日：第 3 回開催、基本設計内容の確認、性能試験実施計画確認

2019 年 1 月 29 日：第 4 回開催、性能試験結果の確認

2 月 16 日：第 5 回開催、音響シミュレーション検証結果確認、実証事業とりまとめ

＜設計＞

2018 年 8 月～2019 年 1 月 基本設計

＜性能確認＞

2018 年 12 月～2019 年 1 月：ビス引き抜き試験（東京大学）、

CLT および集成材の接合部曲げ試験（住木センター）、

実大折板構造曲げ試験（パネ協中央試験所）

5. 得られた実証データ等の詳細

設定した課題において次の結果が得られた。

(1) 要素試験データを入力した CLT 折板構造の 3 次元フレームモデルによる弾性解析を行い、この解析結果と CLT 折板構造の実大曲げ試験の結果を検証し、ほぼ一致することが確認された。

(2) 音響検証：基礎実験として折板形状部分模型による反射拡散の特徴を確認した結果、

固有の反射拡散が見られた。この対応策として「折板拡散体にさらなる乱反射拡散体を加える意匠」に変更し、ホール 1/30 縮尺模型による音響実験の検証を行った。

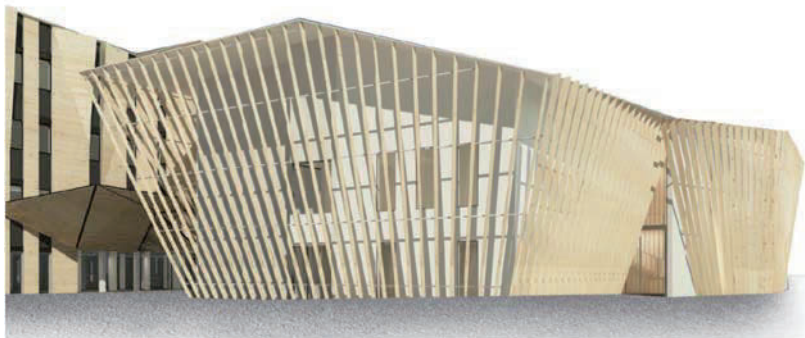
- (3) 防耐火検証：現行の基準では計画建築物は耐火建築物となるが、2019 年 6 月の改正法の施行により、CLT を燃えしろ設計することにより折板構造を現し使用できる可能性の検討を行い基本設計に盛り込んだ。

6. 本実証により得られた成果

通常木造では計画されないホールという大スパン空間を CLT 折板構造で実現可能であることが確認でき、更にその CLT パネル面が音響反射面を兼ねる可能性を音響シミュレーションにて確認できた。また、2019 年 6 月の改正法の施行を見据えた 1 時間を超える準耐火構造による CLT パネル現し使用について、CLT パネルの燃えしろ層を考慮することで実現の可能性について検討できた。今回の成果は、CLT パネルの更なる大きな規模へ展開の可能性を広げることになると考える。本計画が木造で「構造」と「音響」を一体的な形状で実現する唯一のホールになると期待する。

コスト比較は音楽ホール部分について同規模の RC+S 造の躯体+内装仕上を比較対象とした。結果、CLT 建築物（約 238 万/坪）、他工法（約 223 万/坪）との試算となったが、建物重量は半分程度の 38kN/m² となる試算となった。地盤の悪い建設地によっては CLT 建築物の場合地盤改良や杭工事なしで施工できれば工事費縮減できる可能性を確認した。今後、更なる折板構造の架構方法を模索していき、更なるコストダウンが検討されることを期待する。

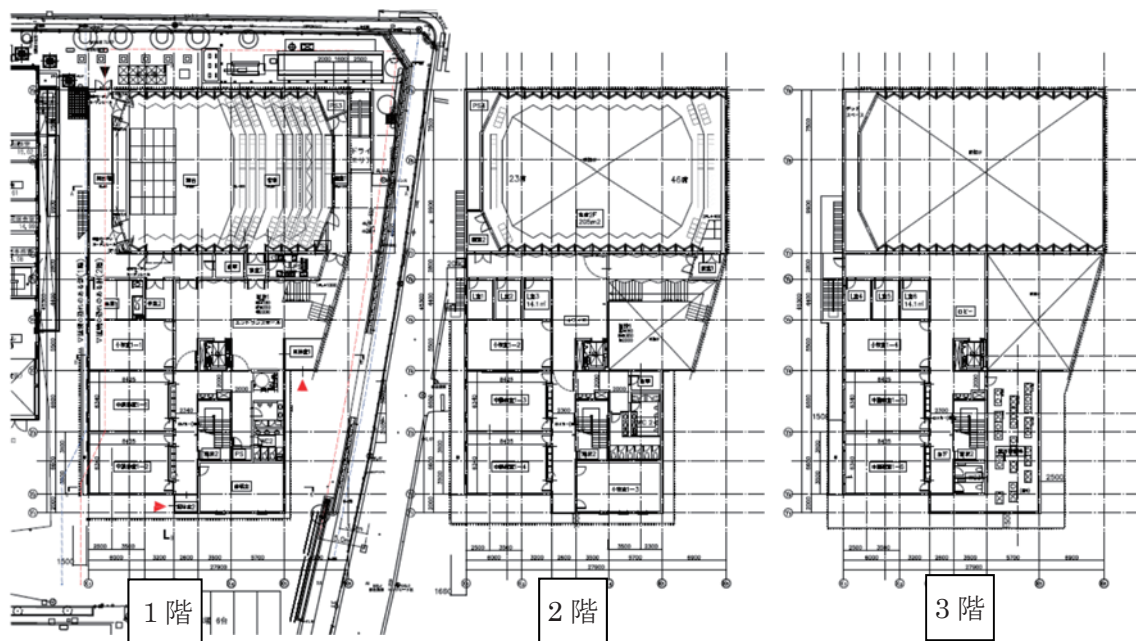
7. 建築物の平面図・立面図・写真等



外観パース



内観パース



平面図



実大試験状況



音響シミュレーション模型

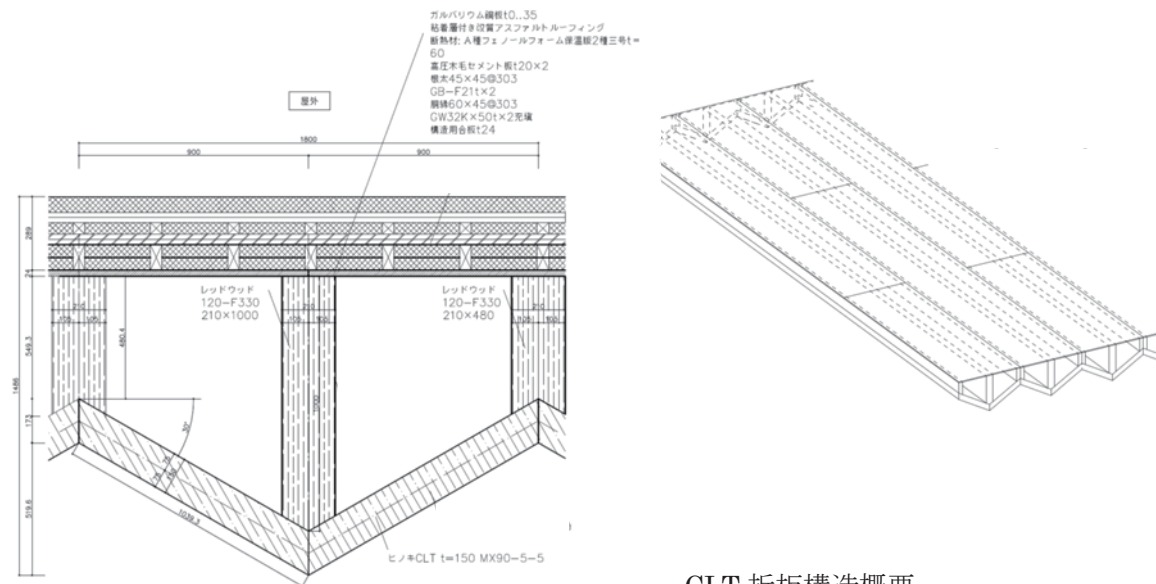
成果物

- CLT 折板構造 実証試験
- CLT 折板音響拡散体の検討
- 準防火地域での木造設計ルートの検討
- CLT 建築物と他工法のコスト比較
- 基本設計図書（外観パース、内観パース、平面図、ホール断面図）

●CLT 折板構造 実証試験●

【目的】

桐朋学園 2 期工事の講堂を兼ねた 17.4m スパンの音楽ホールに、構造と仕上と音響の性能を一体にした CLT 折板構造の要素試験と実大試験を行った。



CLT 折板構造概要

【試験概要】

以下の試験を行い、要素試験データを CLT 折板構造 3 次元フレームモデルに入力し弾性解析を行い、解析結果と CLT 折板構造の実大曲げ試験の結果を比較検証し解析モデルの妥当性を確認した。

- ① ビス接合部引き抜き試験（要素試験）
- ② 継ぎ手曲げ試験（要素試験）
- ③ 折板構造実大曲げ試験（解析結果との比較試験）

【各試験の概要及び結果】

- ① ビス接合部引き抜き試験（要素試験）

・実験目的

折板構造の山部および谷部に開き止めとして打たれるビスの引き抜き性能を検証す

るために要素実験を行った。

・試験体

試験体は CLT 同士を接合することを想定した試験体と CLT と集成材を接合することを想定した試験体について、シネジック社のパネリード X シリーズを用いた接合部の引き抜き試験を行った。試験体の構成は以下である。

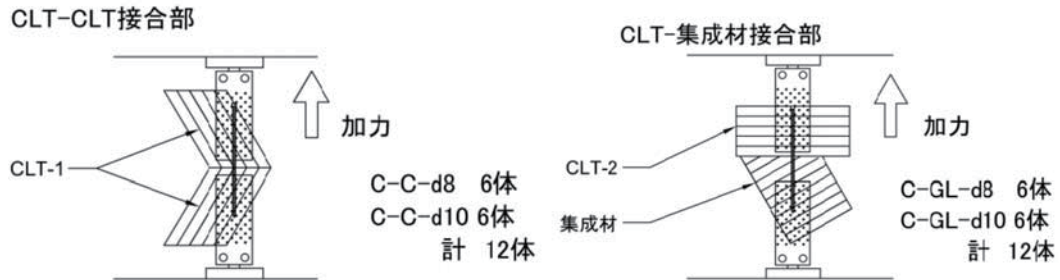


図 2.3-1 加力方法

・試験結果

実験の結果、ビス接合部の剛性と耐力は表 2.4-1～2.4-4 のようになった。各試験体の荷重変位曲線を図 2.4-1～2.4-4、破壊性状を写真 2.4-1～2.4-4 に示す。

表 2.4-1 C-C-d10 試験体引張剛性と耐力

試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	最大耐力(kN)
C-C-d8-1	14.07	15.84
C-C-d8-2	16.03	18.12
C-C-d8-3	17.24	15.87
C-C-d8-4	13.92	17.06
C-C-d8-5	13.04	17.42
C-C-d8-6	14.12	19.73
Ave.	14.74	17.34
SD	1.43	1.34

表 2.4-3 C-GL-d8 試験体引張剛性と耐力

試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	最大耐力(kN)
C-GL-d8-1	9.25	19.80
C-GL-d8-2	12.26	16.60
C-GL-d8-3	13.74	20.03
C-GL-d8-4	12.99	18.28
C-GL-d8-5	16.18	20.96
C-GL-d8-6	12.21	19.80
Ave.	12.77	19.24
SD	2.06	1.42

表 2.4-2 C-C-d10 試験体引張剛性と耐力

試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	最大耐力(kN)
C-C-d10-1	20.77	21.88
C-C-d10-2	19.43	20.26
C-C-d10-3	19.36	23.17
C-C-d10-4	20.36	24.65
C-C-d10-5	20.26	28.71
C-C-d10-6	20.80	21.48
Ave.	20.16	23.36
SD	0.58	2.76

表 2.4-4 C-GL-d10 試験体引張剛性と耐力

試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	最大耐力(kN)
C-GL-d10-1	16.55	24.16
C-GL-d10-2	15.84	23.69
C-GL-d10-3	21.92	21.95
C-GL-d10-4	12.27	19.93
C-GL-d10-5	15.81	22.01
C-GL-d10-6	18.09	23.27
Ave.	16.75	22.50
SD	2.90	1.41

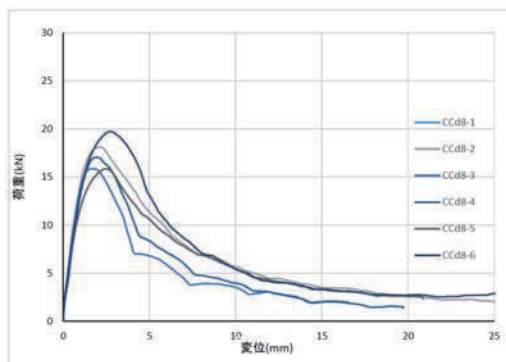


図 2.4-1 CCd8 試験体荷重変位計曲線

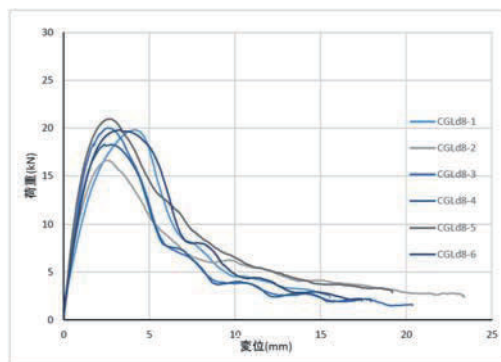


図 2.4-3 CGLd8 試験体荷重変位計曲線

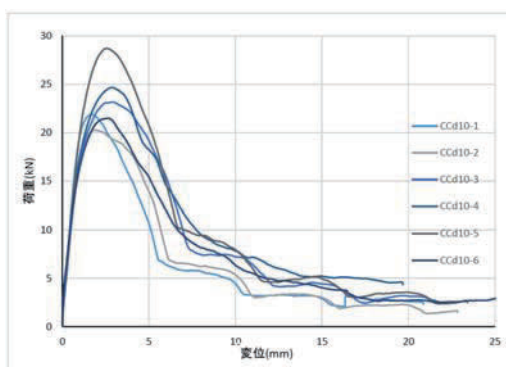


図 2.4-2 CCd10 試験体荷重変位計曲線

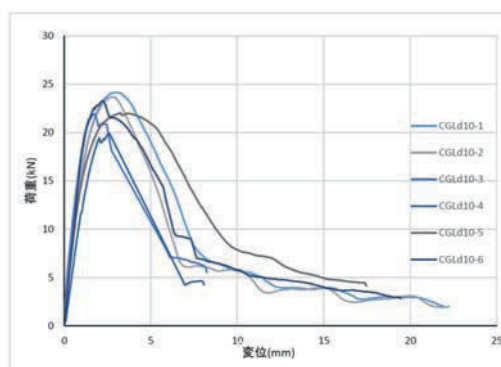


図 2.4-4 CGLd10 試験体荷重変位計曲線

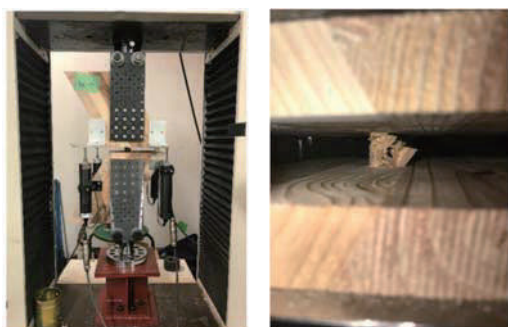


写真 2.4-1 CCd8 試験体破壊性状一例

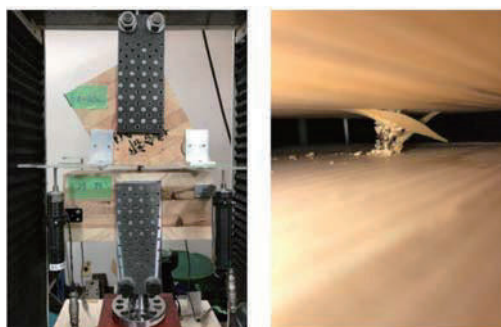


写真 2.4-3 CCd8 試験体破壊性状一例

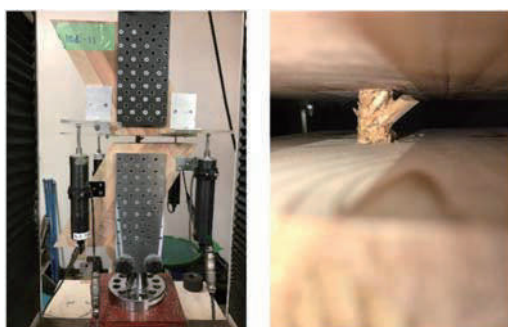


写真 2.4-2 CCd8 試験体破壊性状一例

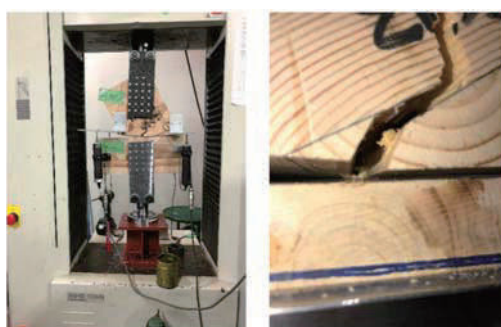


写真 2.4-4 CCd8 試験体破壊性状一例

いずれの試験体も変位が 2～4mm で最大変位をむかえたのち、粘ることなく荷重の低下がみられた。ほとんどの試験体でビスが母材をえぐり取るような破壊性状が確認されたが、ビス径が太いビスを用いた CGL-10 試験体では、集成材が割裂するような脆性的破壊がみられることもあった。

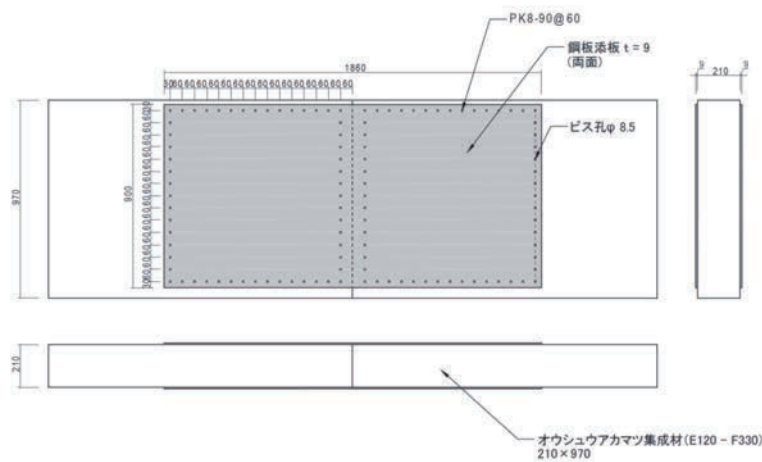
② 継ぎ手曲げ試験（要素試験）

・実験目的

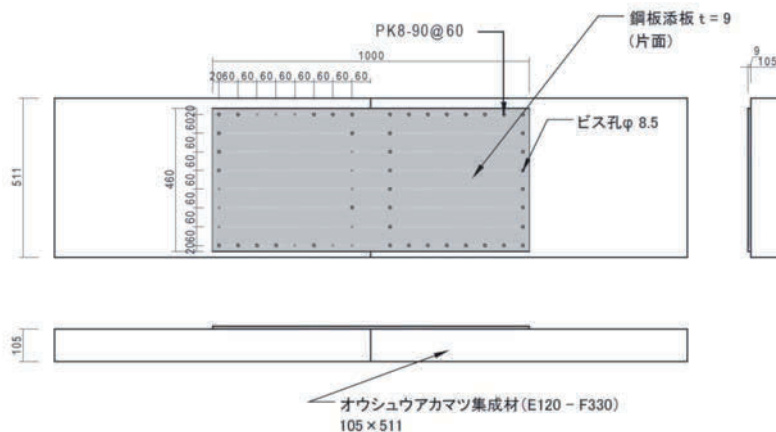
折板構造 V 字部の CLT 継ぎ手及び集成材継ぎ手に用いる鋼板添え板接合部について 4 点曲げ試験を行い、各継ぎ手部の曲げ性能を検証するために試験を行った。

・試験体

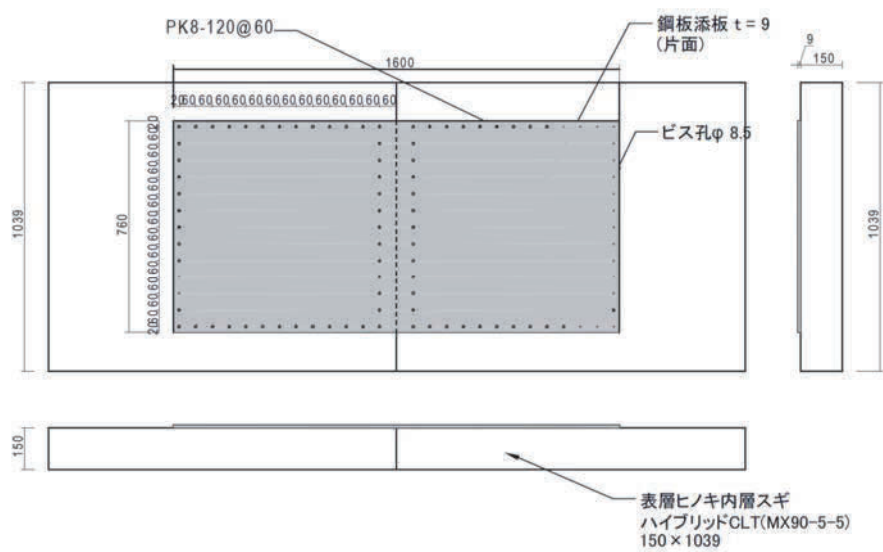
試験体は折板断面中央部集成材接合部、折板断面側部集成材接合部、CLT 接合部それぞれの試験体を作成し試験を行った。



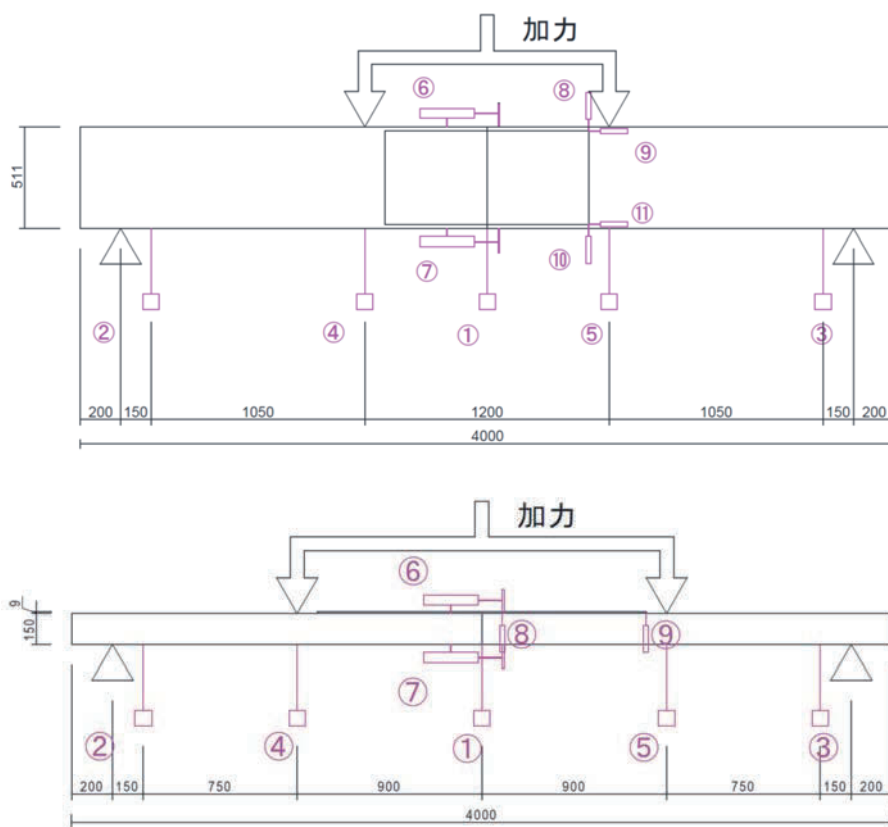
折板断面中央部集成材の接合部試験体（GL-L8）



折板断面側部集成材の接合部試験体（GL-L3）



CLT 接合部の試験体 (CLT-IP8、CLT-OP3)



加力モデル

・試験結果

表 3.4-1 に折板断面中央部集成材接合部の初期剛性・回転剛性を、表 3.4-2 に断面側部集成材接合部の初期剛性・回転剛性を、表 3.4-3、表 3.4-4 に CLT 接合部の初期剛性・回転剛性をそれぞれ示す。いずれも実験値は設計値を上回る結果となった。

表 3.4-1 GL-L8 の剛性と耐力

試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	降伏耐力(kN)	回転剛性(kNm/rad)
GL-L8-1	13.52		117913
GL-L8-2	13.22		107699
GL-L8-3	13.22		124344
Ave	13.32		116652
SD	0.14		6854
設計値			48200

表 3.4-2 CLT-IP8 の剛性と耐力

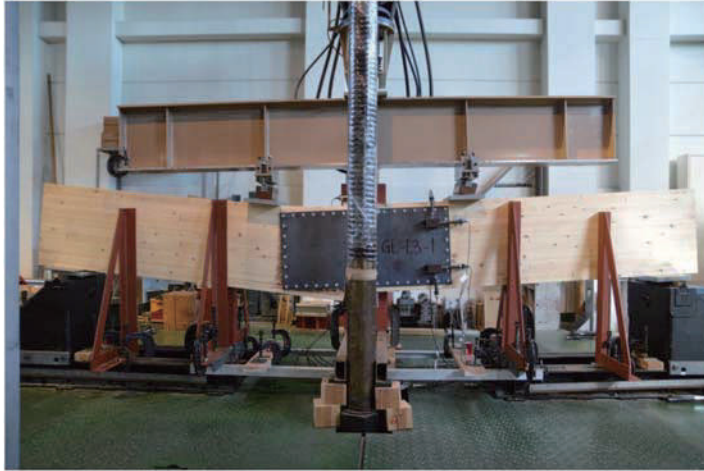
試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	降伏耐力(kN)	回転剛性(kNm/rad)
CLT-IP8-1	5.33		30423
CLT-IP8-2	5.00		25669
CLT-IP8-3	5.14		26453
Ave	5.16		27515
SD	0.14		2081
設計値			21661

表 3.4-3 GL-L3 の剛性と耐力

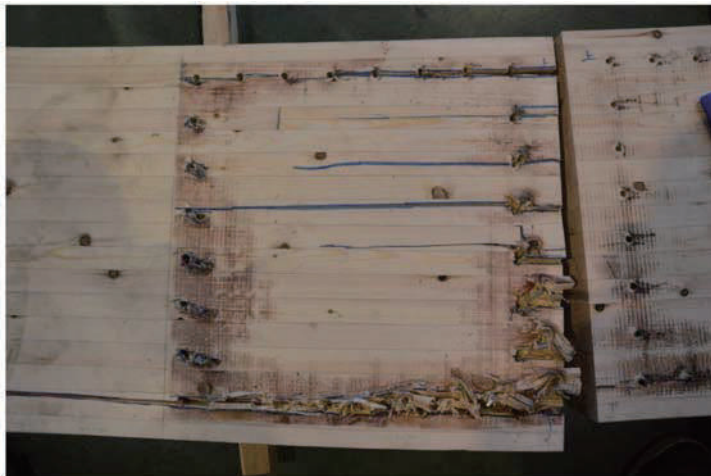
試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	降伏耐力(kN)	回転剛性(kNm/rad)
GL-L3-1	7.27	79.87	6934
GL-L3-2	7.26	82.57	7789
GL-L3-3	7.41	70.90	7710
Ave	7.31	77.78	7478
SD	0.07	4.99	386
設計値			3034

表 3.4-4 CLT-OP3 の剛性と耐力

試験体名	初期剛性 K(kN/mm)	降伏耐力(kN)	回転剛性(kNm/rad)
CLT-OP3-1	0.11	4.20	89
CLT-OP3-2	0.14	4.79	101
CLT-OP3-3	0.14	5.08	105
Ave	0.13	4.69	98
SD	0.01	0.37	7



断面側部集成材接合部 破壊状況



断面側部集成材接合部 ビス穴損傷状態



断面側部集成材接合部 ビス変形状況

③ 折板構造実大曲げ試験（解析結果との比較試験）

・実験目的

実際に用いられる折板構造架構の曲げ試験を行い、構造解析ソフト MIDAS を用いた解析結果と、本実験の結果を比較し解析の妥当性を検証した。

・試験体

表 4.2-1 に試験体概要、図 4.2-1 に試験体寸法、図 4.2-2 に試験体断面図、図 4.2-3～図 4.2-5 に継ぎ手の詳細図を示す。鋼板厚は 9mm とし、鋼板を留めるビスはシネジックのパネリード鋼シリーズを用いた。CLT はヒノキスギの CLT (Mx90-5-5)、集成材はオウシュウアカマツ (E120-F330) を用いた。集成材の接合部はスパン中央部に、CLT 接合部は中央部からずらし、各接合部が互いに並ばない位置にそれぞれ設けた。

表 4.2-1 試験体概要

試験体名	断面寸法	曲げスパン	試験体数
SE-8	1800×1197.2	8m	1

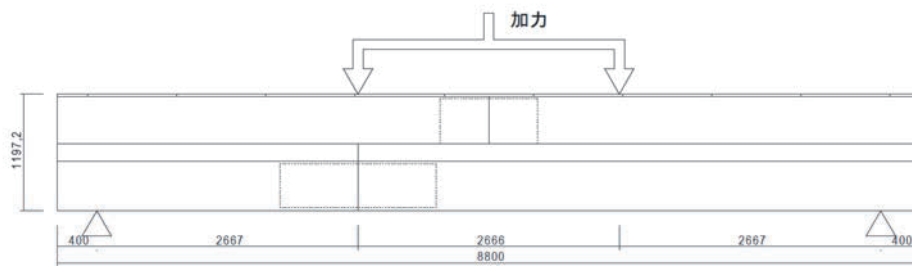


図 4.2-1 試験体寸法

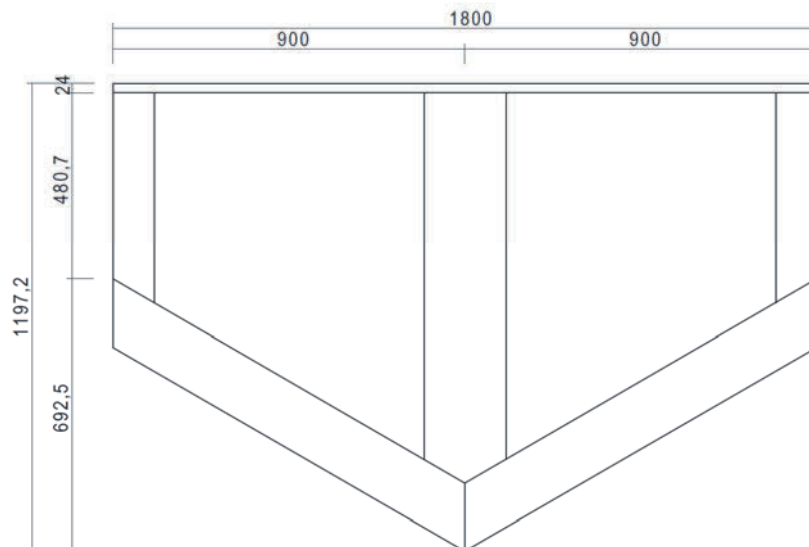
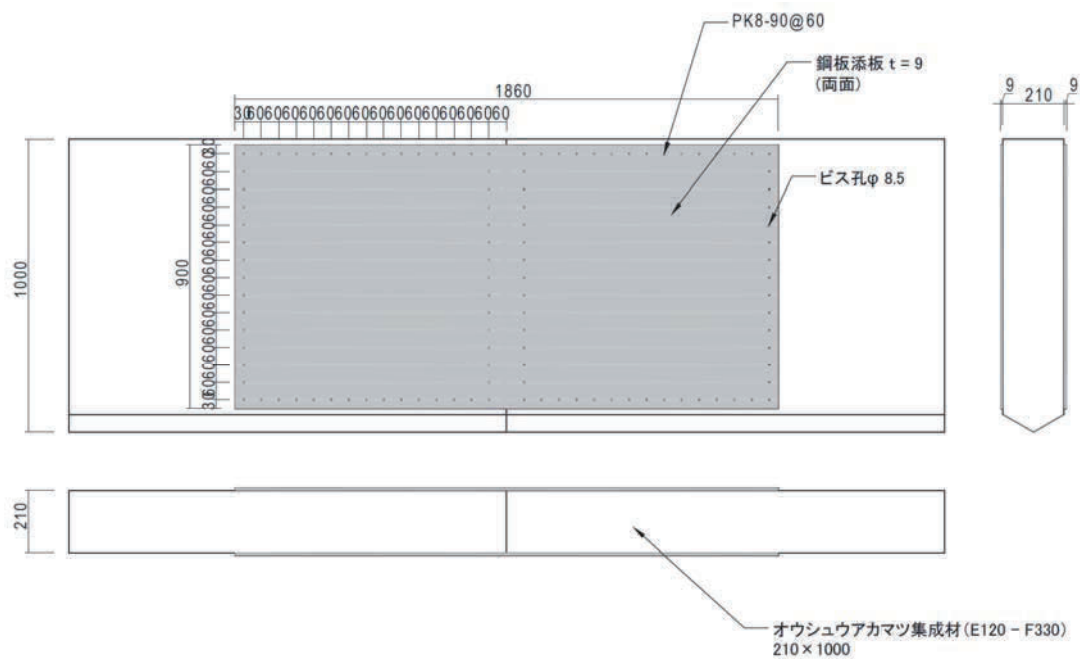
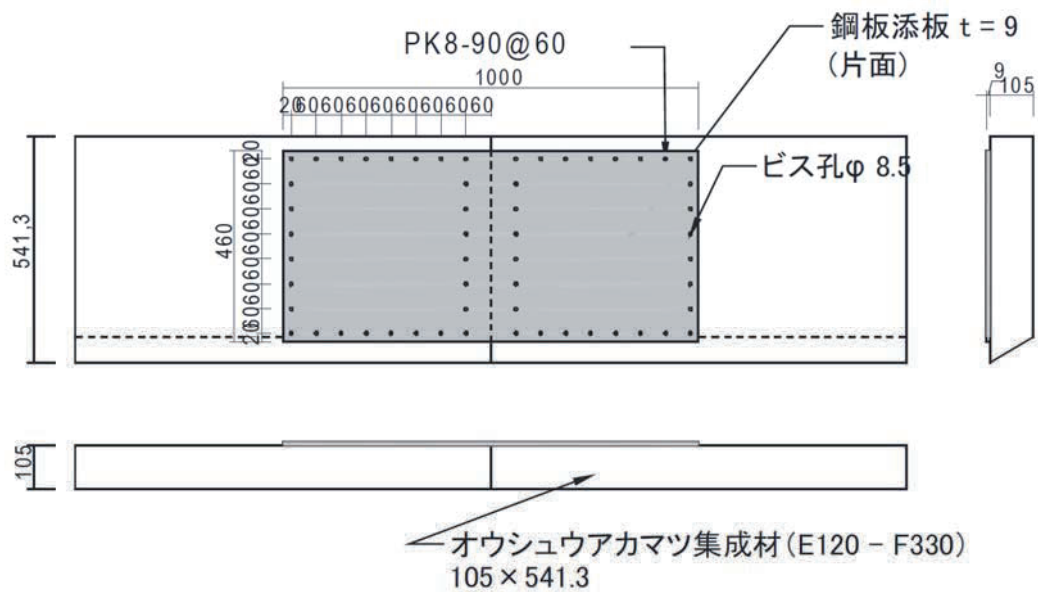


図 4.2-2 試験体断面寸法



・試験結果と解析との比較

今回解析を行ったモデル図は図 4.6-2 のように、それぞれの要素に相当する計 5 本の梁要素を並列に配置したものである。モデル端部の指示条件はピン支点・ローラー支点とし、5 本の梁要素の変形をそろえるために、支点上、加力点下、スパン中央の剛体連結を用いて 5 本の梁要素を拘束した。また、合板に相当する梁要素を集成材大、集成材小と 1kN/mm のせん断バネでつないだ。

各継ぎ手部に相当する要素は梁要素の端部結合要素の回転バネで入力した。梁要素の条件は表 4.6-1 に示す数値を入力した。

解析の結果、図 4.6-3、図 4.6-4 に示すように、174kN の荷重を与えた場合にスパン中央のたわみが 8.54mm となり、今回の実験結果と比較すると図 4.6-1 のようになり、実験結果と解析結果はおおよそ一致した。

表 4.6-1 梁要素の条件

梁要素	ヤング率(kN/mm ²)	断面(mm)	継ぎ手の回転剛性(kNm/rad)
集成材大	12.0	210×1000	116651
集成材小	12.0	105×523.7	7477
CLT	6.2	150×1039	27514
合板	5.0	910×24	

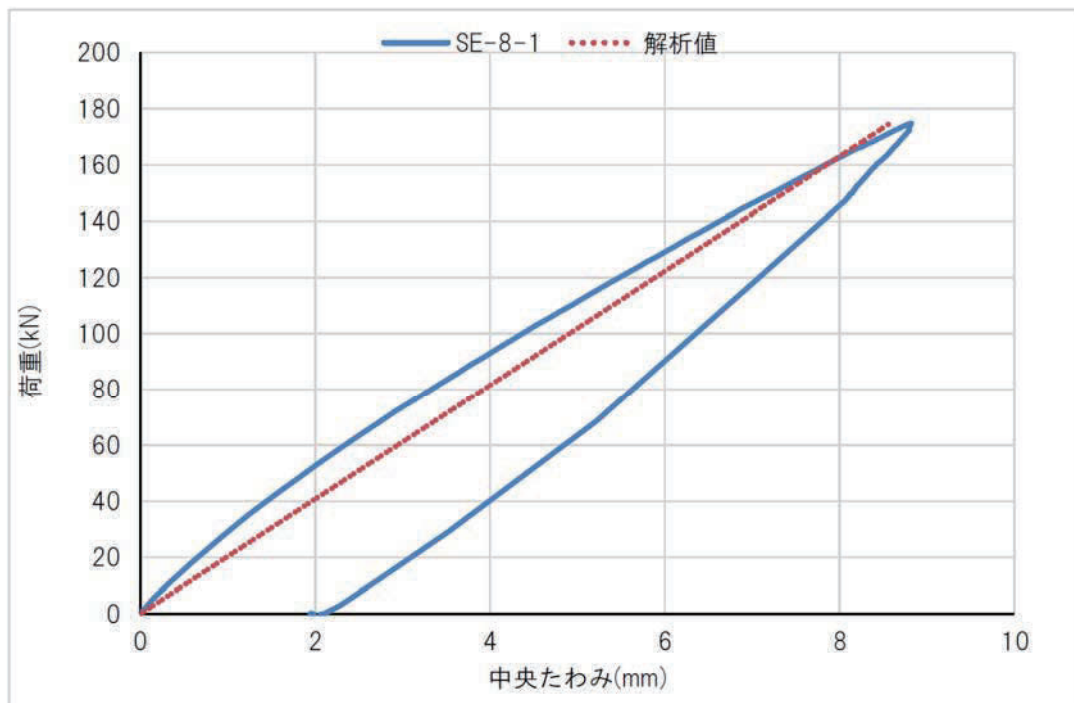


図 4.6-1 解析値と実験値の比較

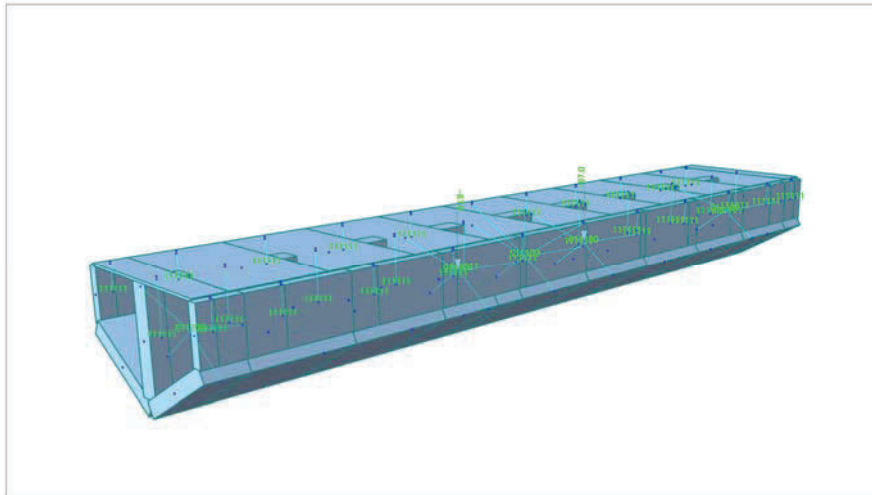


図 4.6-2 解析モデルと剛体連結位置

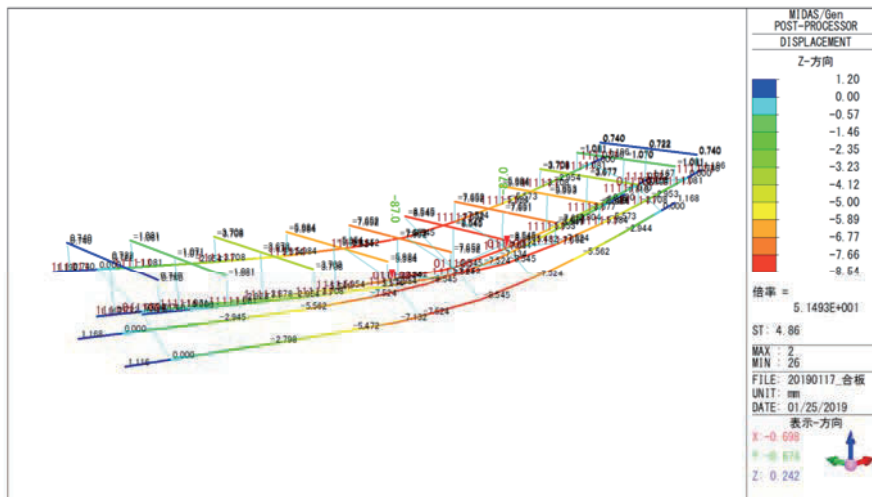


図 4.6-3 モデルの変形

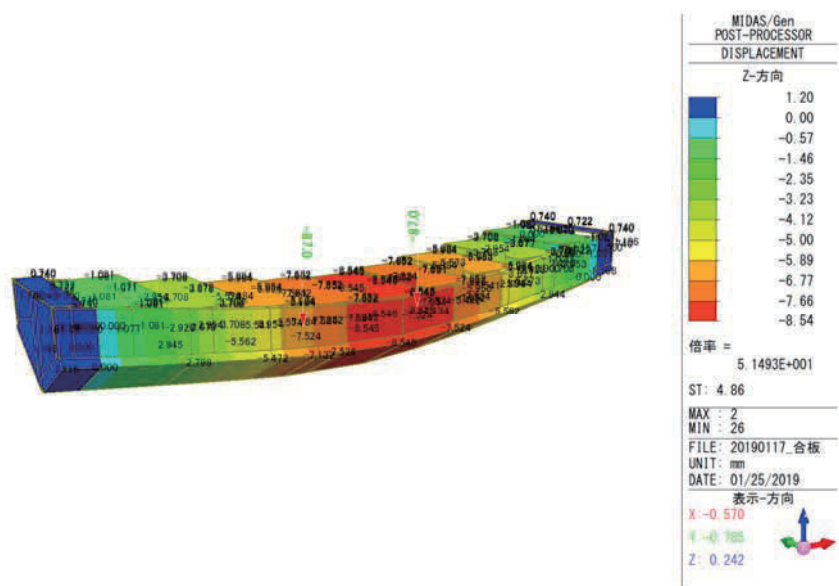


図 4.6-4 モデルの変形

●CLT 折板音響拡散体の検討●

【CLT 折板音響拡散体の検討概要】

桐朋学園大学仙川キャンパス第二期建設工事のホール音響設計にあたっては、優れたホールを創るために「CLT 折板音響拡散体の音響設計」が不可欠であり、舞台や客席への有効な第一次反射音を創出可能とする音響拡散体のデザインの検討を行う必要がある。そこで 1/30 スケールの部分模型を用いて各種音響拡散体の音響効果を検証し、優れた音響拡散形状を選定した上で、最終段階として全体模型を用いた音響実験による検証を行い、音響性能の優れた最良のホールを創出するための音響設計を施した。

【CLT 折板音響拡散体の音響模型実験の概要】

実験にあたっては、CLT 折板音響拡散体の他に平板、吸音材を含む 5 種類の境界面試料（音響拡散体等）を取り上げ、「舞台上からの直接音」と「音響拡散体等（境界面試料）からの散乱反射音（第一次反射音＋拡散音）」の主に 2 つの到来情報から構成された散乱反射性能を比較評価する。

境界面 試料の種類 (音響拡散体等の種類)	模型素材 (模型寸法)	内装材 (実音場換算)	音響拡散体の寸法 (実音場換算)
吸音板	フェルト ゴールデンボード 1t x 2枚 ＋スチレンボード 5t (150 x 715[mm])	GW32x50t＋平板 (4,500 x 21,450[mm])	
平板	ゴールデンボード 1t x 2枚 ＋スチレンボード 5t (150 x 715[mm])	平板 (4,500 x 21,450[mm])	
山型折板ノ小 (傾斜角度 22.5°)	ゴールデンボード 1t x 2枚 ＋スチレンボード 5t (150 x 715[mm])	直交集成板(CLT) (4,500 x 21,450[mm])	$a = 1,800, b \approx 373$
山型折板ノ大 (傾斜角度 30.0°)	ゴールデンボード 1t x 2枚 ＋スチレンボード 5t (150 x 715[mm])	直交集成板(CLT) (4,500 x 21,450[mm])	$a = 1,800, b \approx 520$
円柱	アクリルパイプ $\phi 13$ (外径) ＋ゴールデンボード 1t x 2枚 ＋スチレンボード 5t (150 x 715[mm])	円柱(約 $\phi 400$)＋平板 (4,500 x 21,450[mm])	$a = 1,800, b \approx 400$

表 境界面試料の種類（音響拡散体等の素材と形状）

測定位置は、ホール側壁または天井の音響拡散体への音波の入射角度（斜め入射）を考慮した上で、ホール舞台上に音源、受音点は舞台上奏者および客席聴取者に相当する「直線的な座席列」代表 10 点を設定する。

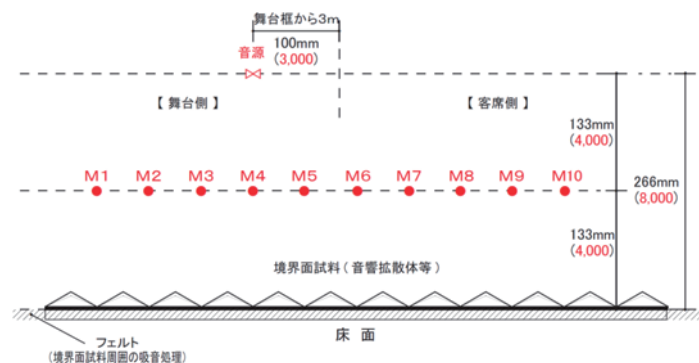
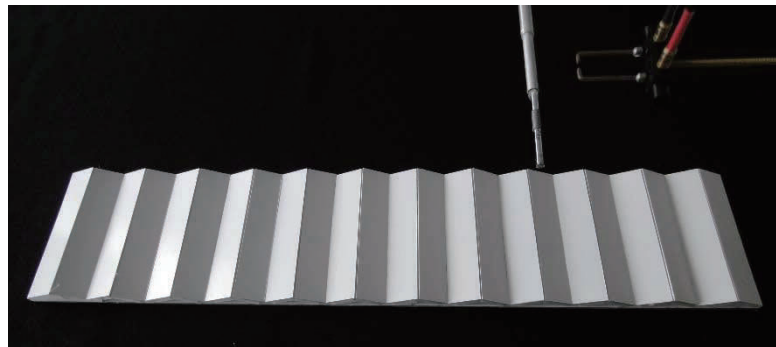


図 1/30 縮尺音響模型実験 測定位置（受音位置：M1～M10）断面図

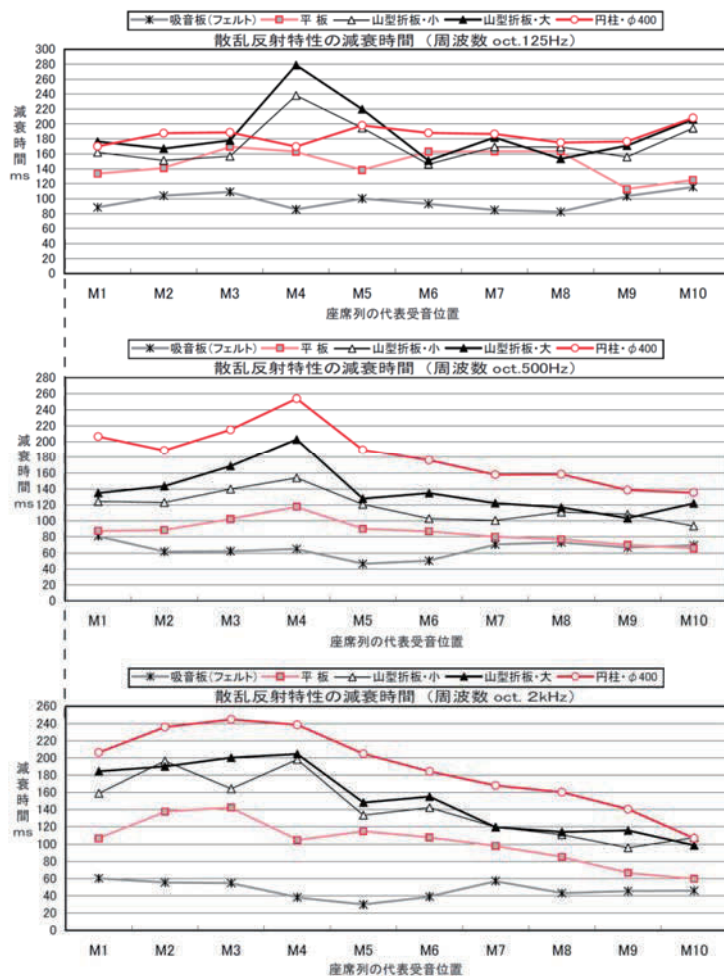


拡散角度30度 折板基礎実験例 M4位置

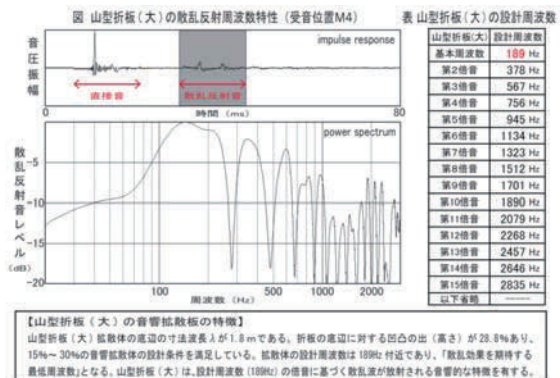
【CLT 折板音響拡散体の検証結果】

- ・ 斜め入射の音波に対する5種類の境界面試料(音響拡散体等)から生じる散乱反射音レベルの大きさの違いは、「到来音レベルの時間変化」の結果から確認できた。
- ・ 音響拡散体の「響きの量」「響きの質」に関する5種類の境界面試料(音響拡散体等)の違いは、「散乱反射特性の減衰時間」の結果から確認できた。
- ・ 以上の散乱反射特性から概ね次のような順序で各種音響拡散体等による音響散乱性能の総合評価が得られた。
- ・ 山型折板の受信位置M4においては、主に「低音域の散乱反射特性の減衰時間」が増大する傾向が見られる。これは、舞台上音源(演奏音)から「山型折板の折板凹部V字底」へ垂直に入射する音波が、「折板V字形状の狭い指向特性」を伴って主に低音域成分の散乱反射波として局所的エリアに「再帰反射(入射波の行路にほぼ沿う方向へ反射)」されて、演奏者方向へ聴取された結果であると推察される。

【吸音材(フェルト)】<【平板】<【山型折板・小】<【山型折板・大】<【円柱】



「山型折板(大)」の拡散体の設計周波数を右表に示す。受信位置M4の散乱反射周波数特性を見ると、設計周波数(189Hz 近傍)の倍音に基づく散乱反射波の放射が確認できる。特に低音域成分については直接音レベルと同等の音エネルギーを有している。舞台空間では、舞台上手・下手の側壁間では、折板凹部V字間での音エネルギーのやり取りが繰り返し増大する可能性も考えられるため、舞台空間全域での音響障害が懸念される。



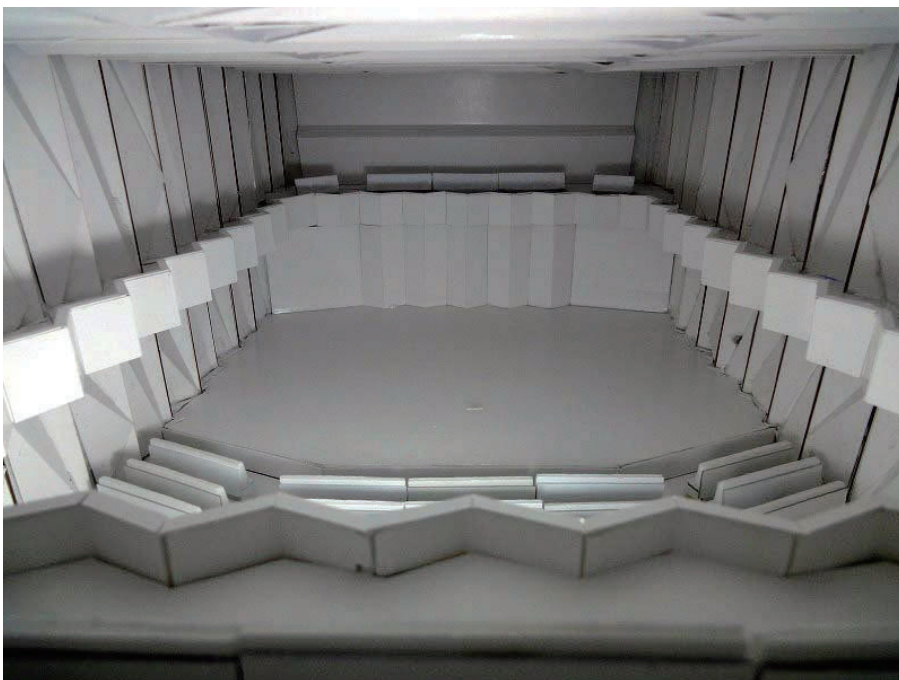
【ホールの音響設計】

ホールの音響設計では「円柱拡散体形状」の拡散性能に近づくように、山型折板（大）の基本形状に「拡散体アタッチメントパーツ」を内装付加することで、音響散乱性能をさらに高められる「音響拡散体のデザイン」を採用した。また、舞台音源（演奏音）に対する「山型折板凹部V字底」への垂直入射の再帰反射に関する音響課題についても、拡散パーツのデザインを工夫することで散乱反射性能を高めて音響的に対処を行なった。

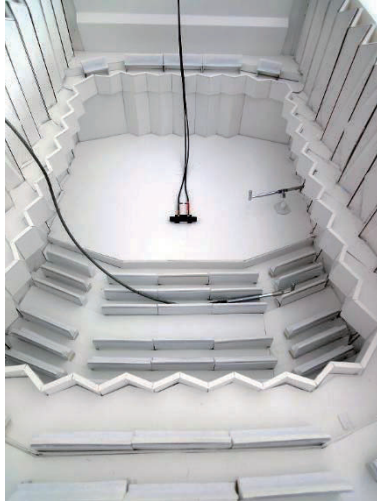
ホール全体の「響きの量」の制御に関しては、音響内装による音響設計を踏まえて、音響内装材吸音特性の調整・制御を実際に適合させた。この点については、音響空間の最適な音環境の評価に、個人差が生じる場合もあり、ピアノや弦楽器といった演奏楽器の種類によっても最適とする「響きの量・響きの質」（残響時間周波数特性）が異なるものと考えられる。

最終段階においては、部分模型による本実験結果に基づき、最終選定した音響拡散体を適用した音場ホールの全体模型を製作して、全体模型を用いた精度の高い音響実験による可聴化シミュレーションを実施し、設計の段階で「完成後のホールの響きの特徴」を予測・試聴確認を行なった。また、可聴化による聴取（主観的評価）を行うだけでなく、ホール音響空間の性能評価を行なう上で、主に次頁の表に示す音響物理指標を算出し、多角的な音響空間情報を取得することで、音の響きに関する様々な「客観評価尺度」を得ることが可能となった。

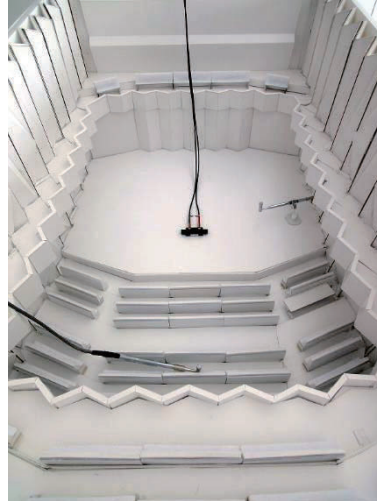
その結果、室内形状と密接な関係にある「明瞭度や拡がり感（空間印象）」に寄与・貢献する初期反射音、特に「第一次反射音の舞台・客席エリアへの分散供給・補強」について、重要な音響課題が解決された。さらに「室内音場の拡散性」や「舞台・客席エリアへの座席間での音場の均一性」が十分に確保された。



ホール模型内全景



客席上手前実験例



真上方向実験例

表 各種室内音響物理指標の概要

R T (Reverberation Time) ・「残響時間 : T30 [回帰区間 -5 ~ -35dB]」 ・「楽音の立下りや余韻などの残響感」	$\int_{RT}^{\infty} p^2(t) dt = \frac{1}{60} \int_0^{\infty} p^2(t) dt$
E D T (Early Decay Time) ・「初期減衰時間」 ・「楽音の継続中の残響感」	$\int_{EDT}^{\infty} p^2(t) dt = \frac{1}{10} \int_0^{\infty} p^2(t) dt$
D 値 (Deutlichkeit, Definition) ・「初期音 50ms と全到来音のエネルギー比」 ・「スピーチに対する響きの明瞭性」	$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$
C 値 (Clarity) ・「初期音 80ms と拡散音のエネルギー比」 ・「音楽に対する響きの明瞭性」の評価	$C = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} [dB]$
T s (Schwerpunktzeit, center-time) ・「時間重心 : 音の減衰性状モーメント」 ・「響きの到来バランスと残響感」	$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} [ms]$
L f (Lateral Energy Fraction) ・「初期側方エネルギー率」 ・「初期側方反射音の空間印象に対する寄与」	$L_f = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$ 
S T I (Speech Transmission Index) R A S T I (Rapid STI) ・「音声伝達指数 / 話声伝送指数」 ・「スピーチに対する明瞭度」	
S P L (Sound Pressure Level) ・「ホールの舞台・客席に対する音圧レベル分布特性」 ・「ホールの舞台・客席に対する音量の均一性の評価」	
$p(t)$: 無指向性マイクロホンの音圧の瞬間値	

●準防火地域での木造設計ルートの検討●

全体で 3000 m²弱の建築物を 2019 年 6 月の改正法の施行により 1 時間を超える準耐火構造とすることで CLT 折板構造を現しで利用できる可能性について、確認機関と調整を進めながら検討を行った。

●CLT 建築物と他工法のコスト比較●

CLT 建築物と他工法のコスト比較を行うにあたり、今回計画の音楽ホール部分と同規模の RC+S 造のモデルを想定して比較検討を行った。CLT 建築物は CLT を現しとする計画のため、RC+S 造は内装仕上までの比較とした。なお、CLT 建築物の内装は折板構造としているため、他工法の仕上げも折板形状を想定した。

【コスト試算結果】

以下にコスト比較試算結果を示す。

① 工事費の比較		項目	数量	金額 (千円)	備考	項目	数量	金額 (千円)	備考
	基礎工事	基礎工事		199,800	杭未考慮	基礎工事		230,000	杭未考慮
	上部躯体工事	材料費	184m ³	22,000	スギ・ヒノキ CLT	鉄骨	33t	15,600	材工
		材料費	192m ³	37,800	集成材	RC	410m ³	37,200	材工
		その他材料費		11,500	羽柄・合板等	内装仕上	1,790m ²	45,000	材工
		加工費		21,900	CLT、集成材				
		建方費		33,000					
		接合金物費		23,400					
		合計		349,400	2,377千円/坪	合計		327,800	2,230千円/坪

CLT と集成材の折板構造となるが、使用材積（CLT+集成材）が 376m³（0.77m³/m²）という結果となり、一般的な集成材建築物の集成材使用材積と比べてかなり多くなったが、他工法も仕上を折板構造とした結果躯体コストは約 7%増の結果となった。

【重量試算結果】

以下に重量比較試算結果を示す。

② 建物重量の比較	項目	重量 (kN)	備考	項目	重量 (kN)	備考
	CLT 躯体 内外装仕上	4,000		壁・柱 内外装仕上	7,400	
				屋根 内外装仕上	3,000	
	床仕上・積載等	1,300		床仕上・積載等	1,300	
	基礎	12,700		基礎	17,800	
	合計	18,000	38 kN/m ²	合計	29,500	61 kN/m ²

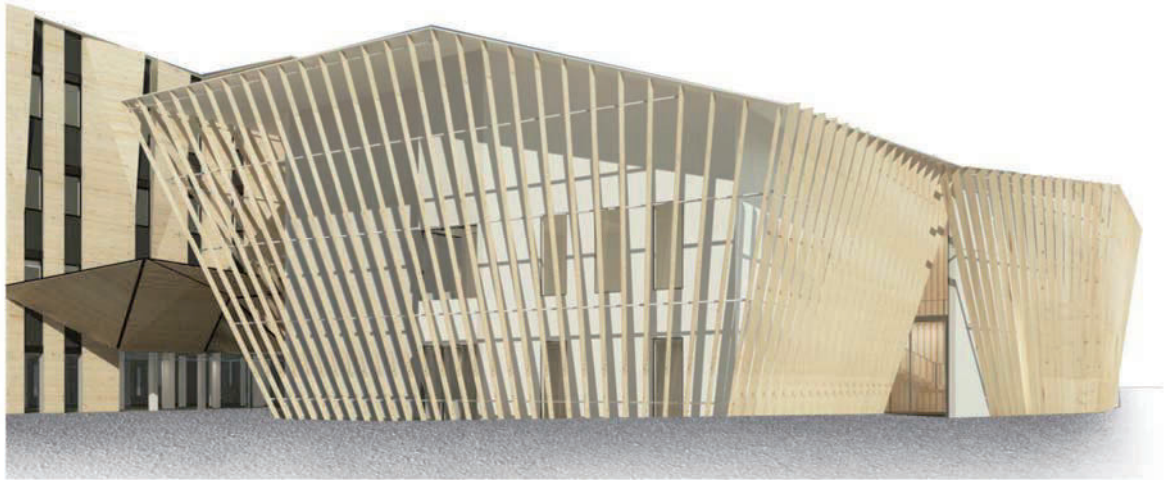
重量は CLT 建築物の方が他工法比較して約半分の重量の試算となった。

【比較まとめ】

躯体費のみの試算では CLT 建築物の方がコスト高の結果となったが、RC+S 造の場合は地盤によっては地盤改良や杭工事が必要になっても CLT 建築物では直接基礎のみの可能性があり、地盤によってはコストは同等もしくは逆転の可能性もある結果となった。

●基本設計図書●

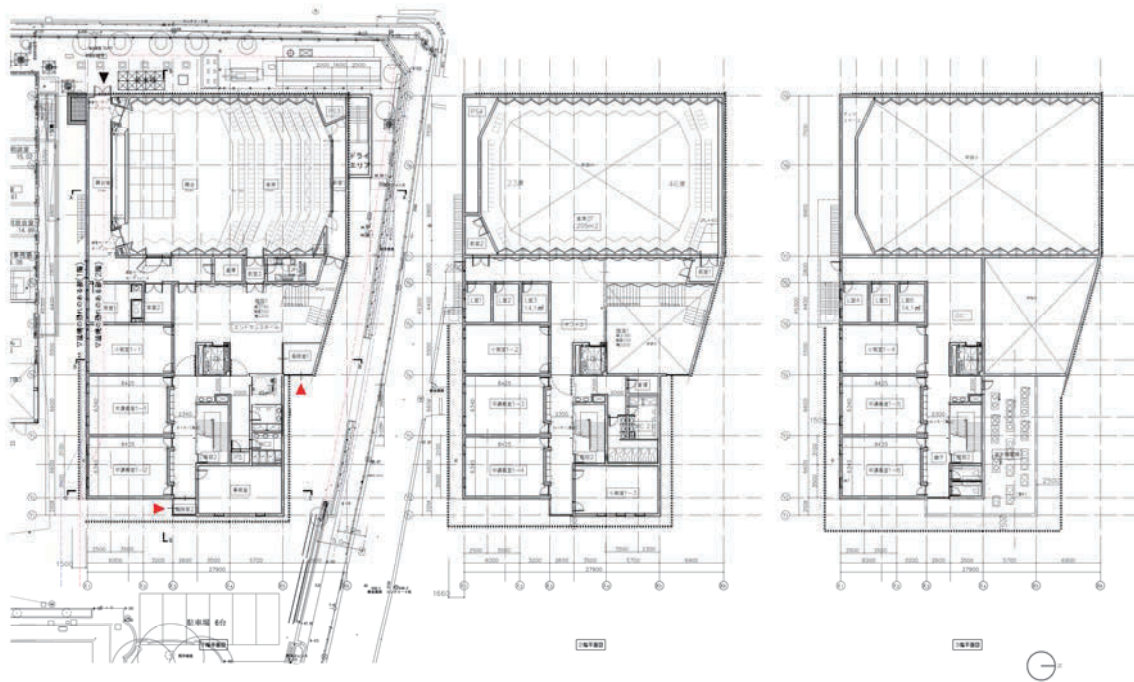
・外観パース



・内観パース



・平面図



・ホール断面図

