

添付 A 建物試験体の構造特性

A.1 建物試験体の構造設計方針

本実験に使用した建物試験体は、繰り返しの振動実験に耐えられること考慮し、許容応力度設計は標準せん断力係数 $C_0=0.2$ に対して実施するが、保有水平耐力の余裕度を 1.5 以上として設計されている。図 A.1 ~ A.5 に試験体の伏図及び軸組図を示す。グレーのハッチング範囲は震動台、斜線範囲は震動台

外の固定床を示している。柱・梁については、既存体育館の構造計画・振動性状を模擬するために、既存体育館で用いられることの多い細幅 H 形鋼を使用した。これにより、靱性は低下するものの、変形は大きくなる。

基礎梁の本数や梁成が大きいのは、建物試験体が震動台から大きくはみ出しており、屋根面重量を片持ち梁で支持する必要があるため、上下動抑止や

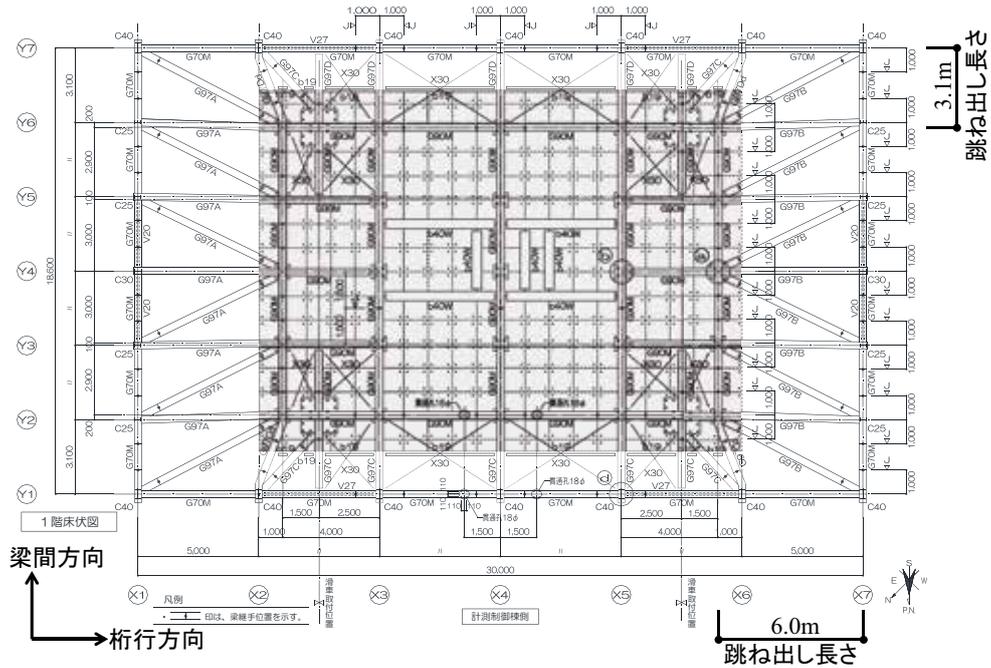


図 A.1 基礎伏図
Fig. A.1 Plan View of Base Frame.

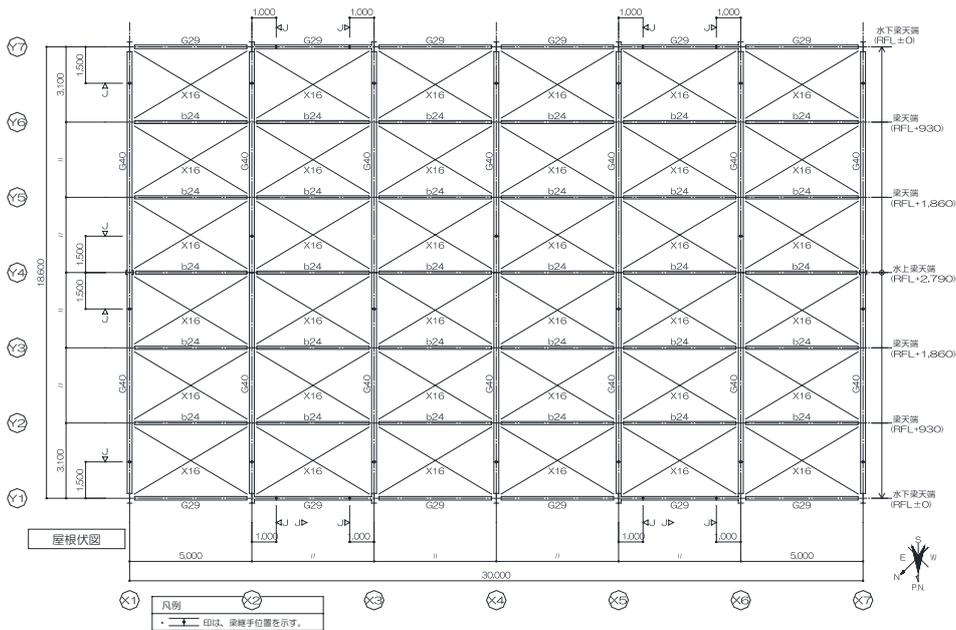


図 A.2 屋根伏図
Fig. A.2 Plan View of Roof.

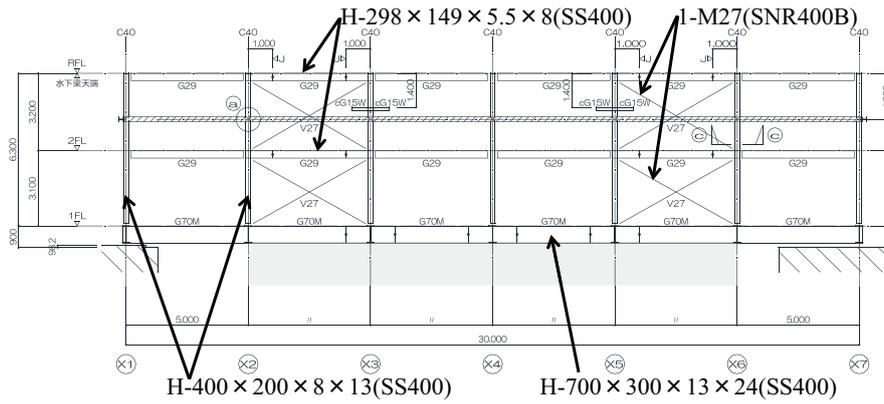


図 A.3 桁行方向ブレース架構の軸組図(Y1, Y7 通り)
 Fig. A.3 Elevation of Frame and Braces in Ridge Direction (Y1 and Y7).

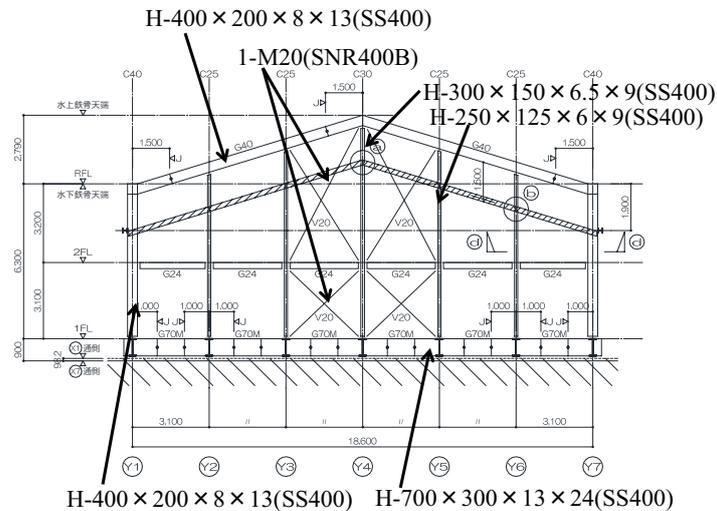


図 A.4 梁間方向ブレース架構の軸組図(X1, X7 通り)
 Fig. A.4 Elevation of Frame and Braces in Span Direction (X1 and X7).

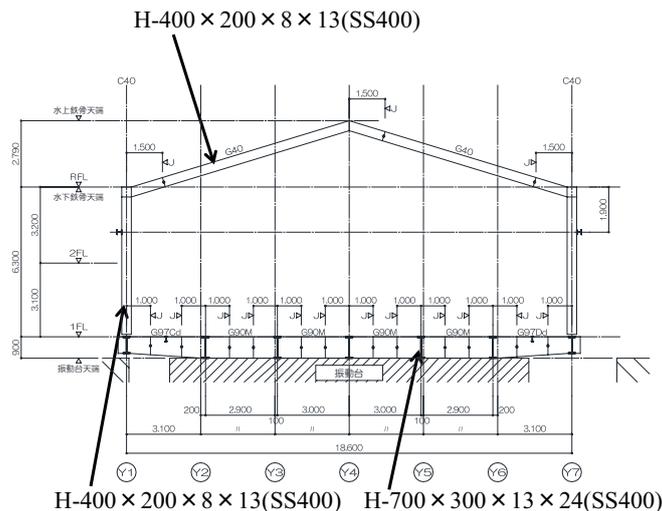


図 A.5 梁間方向ラーメン架構の軸組図(X2 ~ X6 通り)
 Fig. A.5 Elevation of Moment Frames in Span Direction (X2-X6).

柱脚の固定度にも配慮した結果である。震動台上のみならず、施工時・運搬時・吊上時など様々な境界条件においても安全性を確認している。

建物試験体の柱脚の固定度は、通常の体育館のようにコンクリート基礎への露出柱脚とはなっていない。たとえばN値20の砂地盤上に設置された2m

× 2 m のコンクリート直接独立基礎上の鉄骨柱脚を想定すると、直接基礎の回転係数 κ を日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010 年」に準拠して算出すると、 $\kappa = 4.77 \times 10^{11}$ (N・mm/rad) となる。一方、柱脚回転剛性 K_{BS} を、国土交通省住宅局建築指導課「2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書」に準拠して算出すると、 $K_{BS} = 3.81 \times 10^{10}$ (N・mm/rad) となる。直接基礎の回転係数と柱脚回転剛性の直列回転剛性 K を評価すると $K = 1 / (1/\kappa + 1/K_{BS}) = 3.53 \times 10^{10}$ (N・mm/rad) となる。 K の値は鉄骨柱脚のみの回転剛性 K_{BS} に対して $K/K_{BS} = 0.93$ と約 90 % 程度にしか低減せず、さらに柱脚回転剛性に対して基礎梁は十分剛であるため、鉄骨柱脚の回転剛性を評価できれば問題ないと判断した。

次に建物試験体の片持ち梁等の影響を把握するため、図 A.6 に振動台上の建物試験体と、2 m × 2 m の直接独立基礎で支持された同規模の体育館の梁間方向 1 階の荷重増分解析結果を比較して示す。建物試験体の初期剛性がわずかに小さくなる程度であり、実大鉄骨造体育館を模擬した構造特性を持つ試験体になっていると判断できる。

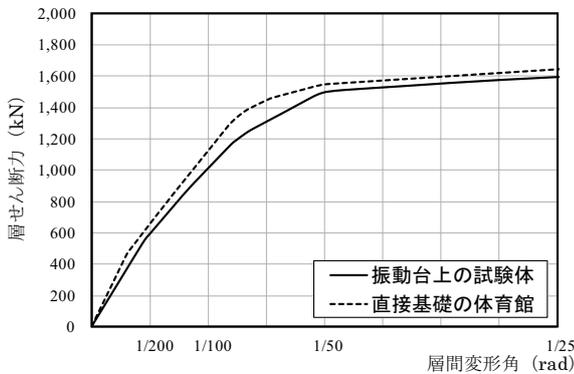


図 A.6 柱脚固定度の違いによる層せん断力～層間変形角関係の変化
Fig. A.6 Effect of Boundary Conditions at Column Base on Base Shear vs. Interstory Drift.

A.2 建物試験体の構造設計結果

建物試験体の一次設計については、表 A.1 に層間変形角、表 A.2 にせん断力分担率を示す。なお、中間レベルに耐風梁があるため、2 層に分けてモデル化している。桁行方向はブレースがほぼすべてのせん断力を分担し、梁間方向は建物試験体中央部分の山形ラーメン架構の分担が大きくなっている。

保有水平耐力計算について、図 A.7 に建物試験体

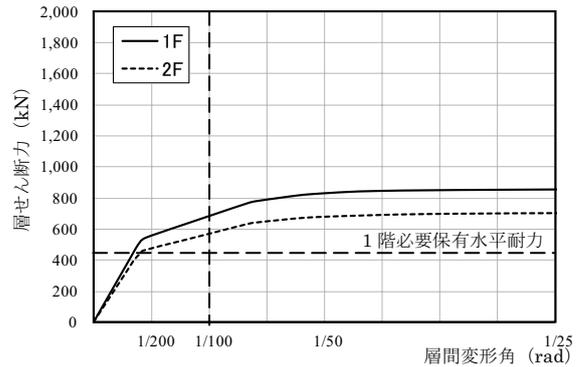
の増分解析結果を示す。最大層間変形角 1/100 で定義し、桁行・梁間両方向とも必要保有水平耐力に対して 1.5 倍以上の保有水平耐力を確保した。このときの 1 階層せん断力係数は桁行方向 0.68、梁間方向 1.15 となっている。

表 A.1 層間変形角
Table A.1 Interstory Drift.

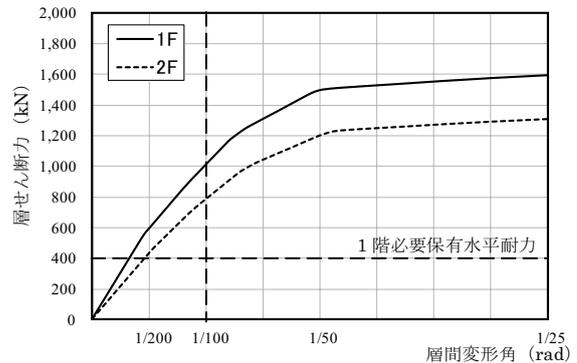
階	桁行方向	梁間方向
2	1/467	1/465
1	1/436	1/487

表 A.2 せん断力分担率(%)
Table A.2 Ratio of Shear Force.

階	桁行方向		梁間方向	
	フレーム	ブレース	フレーム	ブレース
2	9	91	85	15
1	19	81	63	37



(a) 桁行方向
(a) Ridge Direction.



(b) 梁間方向
(b) Span Direction.

図 A.7 増分解析結果
Fig. A.7 Result of Pushover Analysis.

今回の加振実験では、吊り天井の応答特性と脱落被害メカニズムの解明を目的としているため、建物試験体には繰返しの加振実験に対して十分な余裕度を確保するために、鉛直ブレース端部や柱脚などの各接合部は保有耐力接合としている。保有耐力接合はできているものの、部材ランクがFDである部材があるので、日本建築防災協会「耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説(1996)」の部材・接合部の靱性指標に準拠し、靱性指標F値を簡単のため一律2.5として1階の保有水平耐力時の構造耐震指標Is値を求めると、桁行方向1.71、梁間方向2.86となり、十分な余裕度が確保されていることがわかる。

固有周期については、2質点系の等価せん断棒モデルの固有値解析結果により、桁行方向0.34秒、梁間方向0.42秒となった。建物高さ9.09mとして

求めた固有周期 $T=9.09 \times 0.03=0.27$ 秒より長くなるのは、片持ち梁や柱脚回転剛性の影響によるものと考えられる。また、この質点系モデル(減衰2%)にJMA神戸NS波100%を1方向入力したところ、屋根面の最大水平加速度は1.7G相当であった。質点系の解析においては、3方向入力や山形の形状の影響を考慮できていないため、立体骨組解析や実験値とは異なる可能性がある。

A.3 まとめ

本資料では、建物試験体の構造特性について記述した。繰返しの振動実験に対して余裕を持った設計としており、また柱脚部の固定度など含め、概ね実際に施工される体育館の動的挙動を再現できると考えられる。

添付 B 学校施設における大空間建築物の実験研究分科会 委員名簿

委員長	壁谷澤寿海	東京大学 地震研究所 教授
委員	清家 剛	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 准教授
”	山田 哲	東京工業大学 建築物理研究センター 教授
”	福山 洋	独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ長
オブザーバー	脇山善夫	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部評価システム研究室 主任研究官
”	廣田 貢	文部科学省 大臣官房文教施設企画部 施設企画課 防災推進室 室長補佐 (平成 26 年 3 月末日まで)
”	西村文彦	文部科学省 大臣官房文教施設企画部 施設企画課 防災推進室 室長補佐 (平成 26 年 4 月 1 日より)
”	前田 亮	国土交通省 住宅局 建築指導課 企画専門官 (平成 26 年 3 月末日まで)
”	高木直人	国土交通省 住宅局 建築指導課 企画専門官 (平成 26 年 4 月 1 日より)
”	岡野大志	国土交通省 住宅局 建築指導課 構造係長 (平成 25 年 3 月末日まで)
”	岩崎和明	国土交通省 住宅局 建築指導課 構造係長 (平成 25 年 9 月末日まで)
”	森岡信人	国土交通省 住宅局 建築指導課 構造係長 (平成 25 年 5 月 14 日より平成 26 年 6 月末日まで)
”	窪田悦郎	国土交通省 住宅局 建築指導課 構造係長 (平成 25 年 10 月 1 日より)
”	小野真沙美	文部科学省 研究開発局 地震・防災研究課 防災科学技術推進室 専門官 (平成 26 年 7 月 6 日まで)
”	佐藤栄児	文部科学省 研究開発局 地震・防災研究課 防災科学技術推進室 学術調査員(平成 26 年 4 月 1 日より)

(平成 26 年 12 月 10 日時点)

添付C 学校施設における大空間建築物の実験研究分科会 実験検討WG 名簿

主査	佐々木智大	独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 研究員
メンバー	壁谷澤寿海	東京大学 地震研究所 教授
"	清家 剛	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 准教授
"	山田 哲	東京工業大学 建築物理研究センター 教授
"	福山 洋	独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ長
"	太田 勤	株式会社 堀江建築工学研究所 取締役社長
"	江口 亨	横浜国立大学 都市イノベーション研究院 准教授
"	伊山 潤	東京大学 工学系研究院 建築学専攻 准教授
"	石原 直	独立行政法人 建築研究所 建築生産研究グループ 主任研究員
"	吉澤睦博	株式会社 竹中工務店 技術研究所 地震工学部 地震リスクグループ長 (平成26年9月末日まで)
"	青井 淳	株式会社 竹中工務店 技術研究所 地震工学部 地震リスクグループ 研究員(平成26年10月1日より)
"	荒井智一	株式会社 桐井製作所 開発部 開発チームリーダー 兼 技術研究所
"	金井貴浩	三洋工業株式会社 技術研究所 主任
"	高岡昌史	株式会社 オクジュー 開発営業グループ 開発営業室長
"	岩下裕樹	八潮建材工業株式会社 本社 製品開発部 課長
"	青井 淳	独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 特別研究員(平成26年9月末日まで)
"	佐藤大樹	独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 特別研究員(平成25年12月末日まで)
"	田川浩之	独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 特別研究員(平成26年3月末日まで) 客員研究員(平成26年4月1日より)
"	吉澤睦博	独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 客員研究員(平成26年10月1日より)
オブザーバー	脇山善夫	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部評価システム研究室 主任研究官
"	増田寛之	株式会社 竹中工務店 設計部 設計第4部門 主任
"	鈴木直幹	株式会社 竹中工務店 設計部 設計第5部門 構造グループ長 (平成26年12月10日時点)

添付D カラー図版



(a) 水平な天井の被害
(a) Damage of Flat Ceiling.



(b) 山形架構の屋根面に平行な天井
(b) Damage of Slope Ceiling parallel to Gable Roof.



(c) 床面に落下した天井(クリップの外れ)
(c) Damaged Ceiling Board with Light-weight Metal Frame.



(d) ハンガーの開き
(d) Opening of Hangers.

写真 1.2.1 東北地方太平洋沖地震における天井脱落被害 [1.14]
Photo 1.2.1 Damage of Ceiling due to Tohoku Earthquake [1.14].



(a) 壁ブレースの座屈・破断
(a) Buckling and Rupture of Vertical Braces.



(b) 屋根ブレースの座屈
(b) Buckling of Horizontal Braces.



(c) 損傷した柱頭支承部
(c) Damage at Column-Roof Connection.

写真 1.2.2 東北地方太平洋沖地震における主体構造の被害 [1.21]
Photo 1.2.2 Damage of Structural Members due to Tohoku Earthquake [1.21].



写真 2.2.1 実大体育館試験体
Photo 2.2.1 Full-scale Gymnasium Specimen.



(a) 建物試験体内部に設置した天井
(a) Ceiling Constructed in Gymnasium Specimen.



(b) 天井試験体の模型
(b) Model of Specimen.

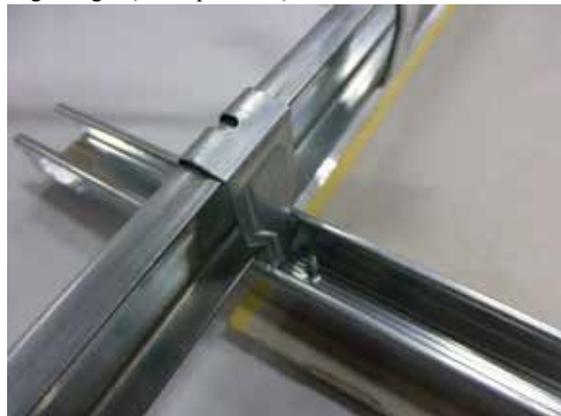
写真 2.3.1 未対策天井
Photo 2.3.1 Non-seismic Ceiling.



(a) 野縁受けとフリーハンガー (JIS 規格相当品)
(a) Ceiling Joist Receiver and Ceiling Hanger (JIS Equivalent).

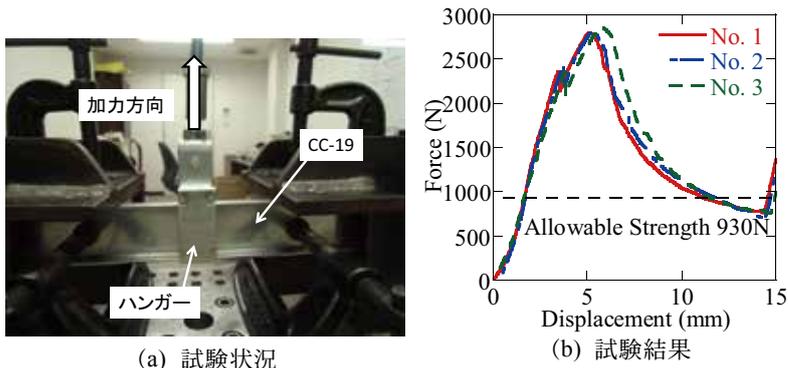


(b) ダブル野縁とダブルクリップ (JIS 規格品)
(b) Wide Ceiling Joist and Wide Ceiling Joist Clip (JIS Conformed).

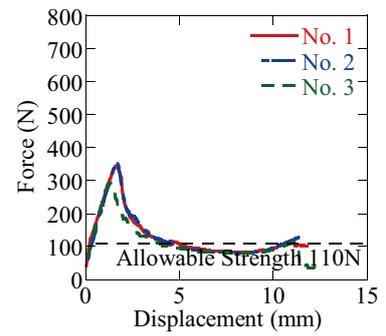
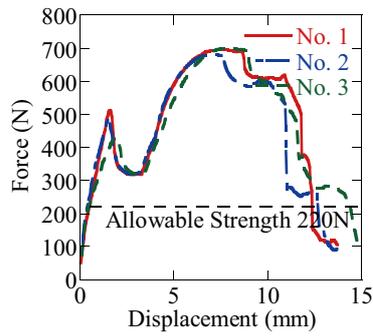


(c) シングル野縁とシングルクリップ (JIS 規格)
(c) Narrow Ceiling Joist and Narrow Ceiling Joist Clip (JIS Conformed).

写真 2.3.2 未対策天井に使用した部材
Photo 2.3.2 Members of Non-seismic Ceiling.

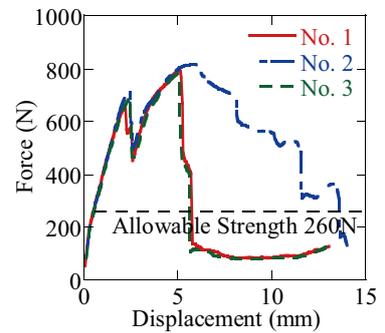
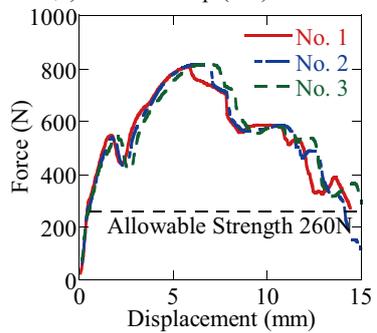
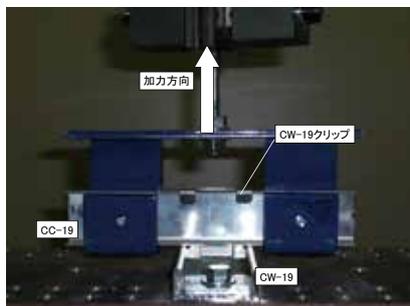


(1) フリーハンガー (JIS)
(1) Free Hanger (JIS).



(a) 試験状況

(2) シングルクリップ (JIS)
(2) Narrow Clip (JIS).



(a) 試験状況

(3) ダブルクリップ (JIS)
(3) Wide Clip (JIS).

図 2.3.3 接合部の引張試験結果
Fig. 2.3.3 Tensile Test of Metal Parts for Connection of Ceiling.



(a) 試験体内部に設置した天井
(a) Ceiling Constructed in Gymnasium Specimen.



(b) 試験体の模型
(b) Model of Specimen.

写真 2.4.1 1.1G 耐震天井

Photo 2.4.1 Seismically Ceiling with Seismic Coefficient of 1.1.



(a) 斜め部材上部



(b) 斜め部材下部



(c) 耐震クリップ



(d) 耐風圧クリップおよび耐震フリーハンガー

写真 2.4.2 1.1G 耐震天井の接合部

Photo 2.4.2 Connection in Seismically Designed Ceiling with Seismic Coefficient of 1.1.

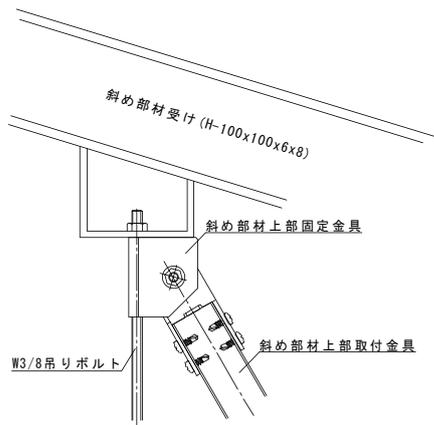


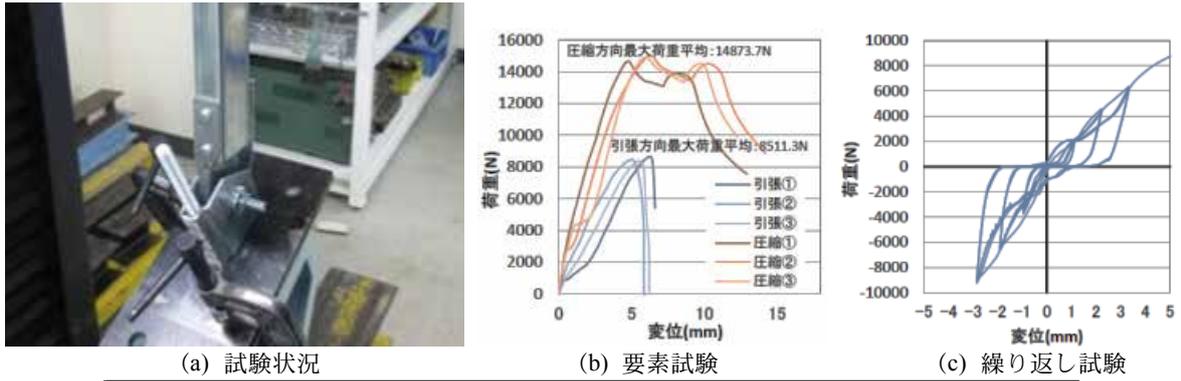
図 2.4.4 斜め部材上端部と斜め部材受け

Fig. 2.4.4 Connection at Brace Top and Support Beam of Ceiling Brace.



写真 2.4.3 キャットウォークに設けた孔

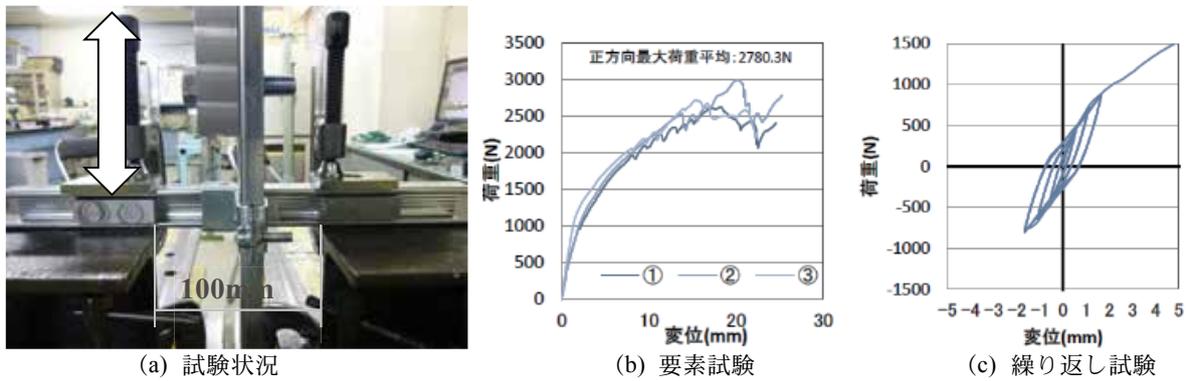
Photo 2.4.3 Hole in Catwalk around Hanging Bolts.



一方向加力試験における損傷荷重および変位							
引張方向				圧縮方向			
変位 (mm)		荷重 (N)		変位 (mm)		荷重 (N)	
1	4.90	1	7254.92	1	2.02	1	8331.10
2	2.35	2	5179.92	2	2.68	2	8521.11
3	3.82	3	6400.47	3	3.72	3	10158.37
\bar{d}^+	3.69	\bar{P}_d^+	6278.44	\bar{d}^-	2.81	\bar{P}_d^-	9003.53

(d) 一方向加力試験 試験結果

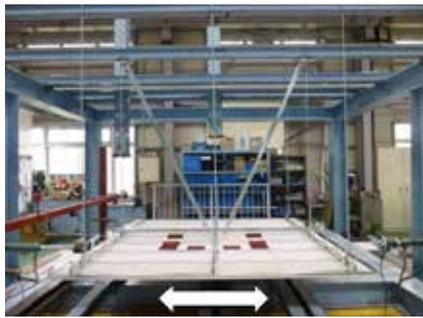
図 2.4.7 斜め部材上部固定金具 試験結果
Fig. 2.4.7 Test Result of Metal Part of Connection at Brace Top.



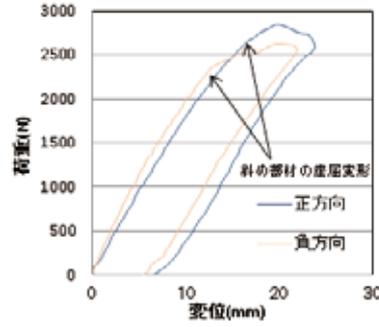
一方向加力試験における損傷荷重および変位							
正方向				負方向			
変位 (mm)		荷重 (N)		変位 (mm)		荷重 (N)	
1	1.57	1	836.95	1	正方向 と同じ	1	正方向 と同じ
2	2.07	2	1036.20	2			
3	1.31	3	1015.52	3			
\bar{d}^+	1.65	\bar{P}_d^+	962.89	\bar{d}^-	1.65	\bar{P}_d^-	962.89

(d) 一方向加力試験 試験結果

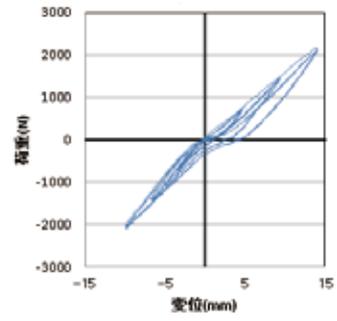
図 2.4.8 耐震クリップ(野縁受け方向) 試験結果
Fig. 2.4.8 Test Result of Aseismic Clip in Direction of Ceiling Joist Receiver.



(a) 試験状況



(b) 一方向加力試験



(c) 繰り返し試験

損傷時の荷重での変位							
正方向				負方向			
変位 (mm)		荷重 (N)		変位 (mm)		荷重 (N)	
1	13.89	1	2354.28	1	9.73	1	1931.81
\bar{d}^+	13.89	\bar{P}_d^+	2354.28	\bar{d}^-	9.73	\bar{P}_d^-	1931.81

(d) 一方向加力試験 試験結果



(e) 試験体の損傷状況

図 2.4.9 ユニット試験 試験結果
 Fig. 2.4.9 Test Result of Ceiling Unit.

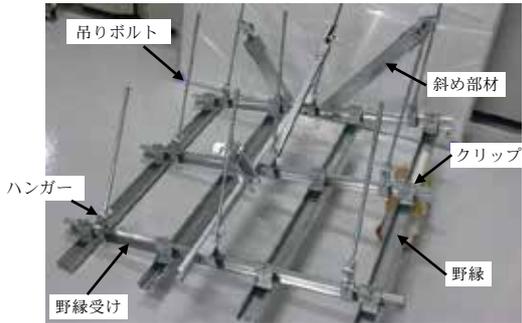


写真 2.5.1 天井試験体模型
Photo 2.5.1 Model of Specimen.

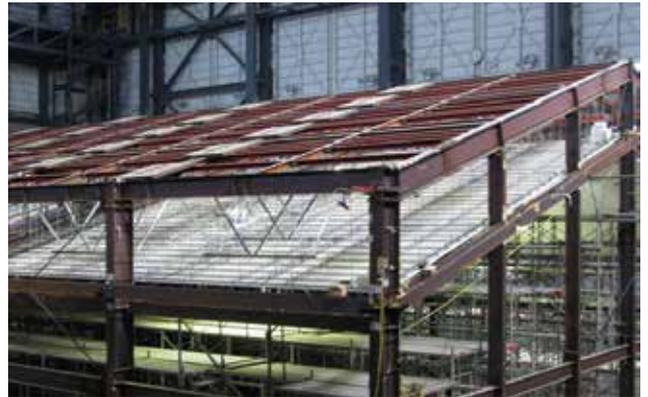


写真 2.5.2 2.2G 耐震天井
Photo 2.5.2 Seismically Designed Ceiling with Seismic Coefficient of 2.2.



写真 2.5.3 吊り元および斜め部材受け
Photo 2.5.3 Roof-Ceiling Connection and Support Beam of Ceiling Brace.



(a) クリップ



(b) ハンガー



(c) 斜め部材上端



(d) 斜め部材下

写真 2.5.4 各金具の取り付け状況
Photo 2.5.4 Connections in Ceiling.



(a) 天井下地側

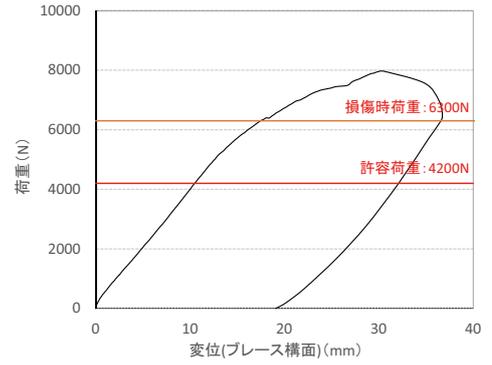


(b) 天井仕上げ材側

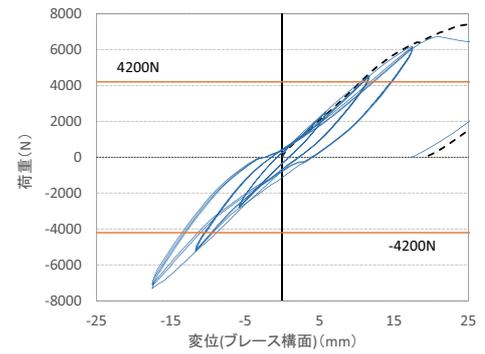
写真 2.5.5 照明機器の納まり
Photo 2.5.5 Connections of High Ceiling Lighting.



(a) 試験状況



(b) 一方向加力

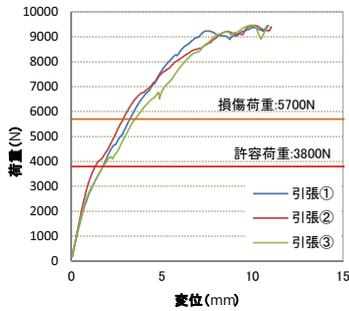


(c) 繰り返し試験

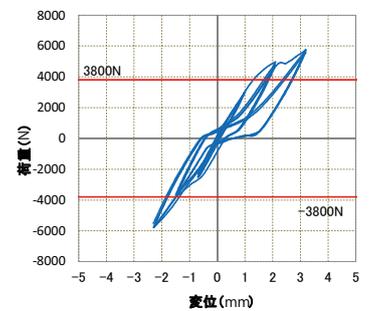
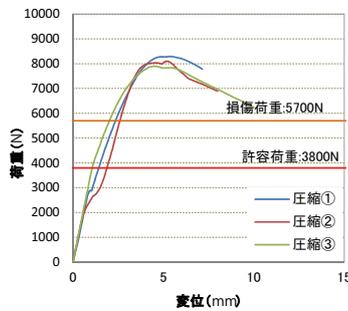
図 2.5.8 ユニット試験結果(野縁方向)
Fig. 2.5.8 Test Result of Ceiling Unit.



(a) 試験状況



(b) 一方向加力

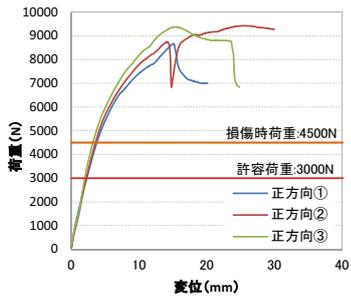


(c) 繰り返し試験

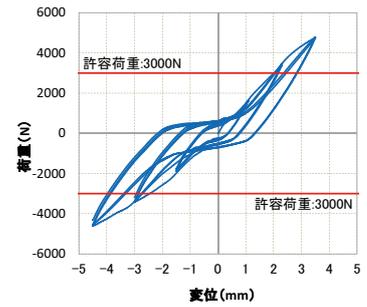
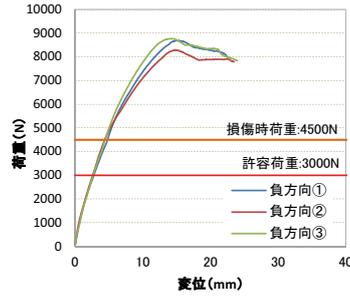
図 2.5.9 斜め部材上部取付金具 試験結果
Fig. 2.5.9 Test Result of Metal Part of Connection at Brace Top.



(a) 試験状況



(b) 一方向加力



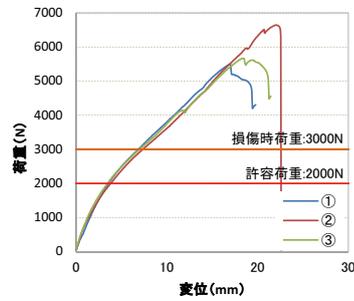
(c) 繰り返し試験

図 2.5.10 クリップ試験結果①

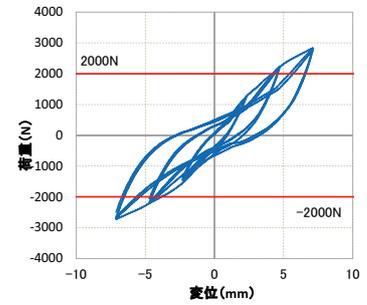
Fig. 2.5.10 Test Result of Metal Part of Ceiling Joist Clip Part 1.



(a) 試験状況



(b) 一方向加力



(c) 繰り返し試験

図 2.5.11 クリップ試験結果②

Fig. 2.5.11 Test Result of Metal Part of Ceiling Joist Clip Part 2.

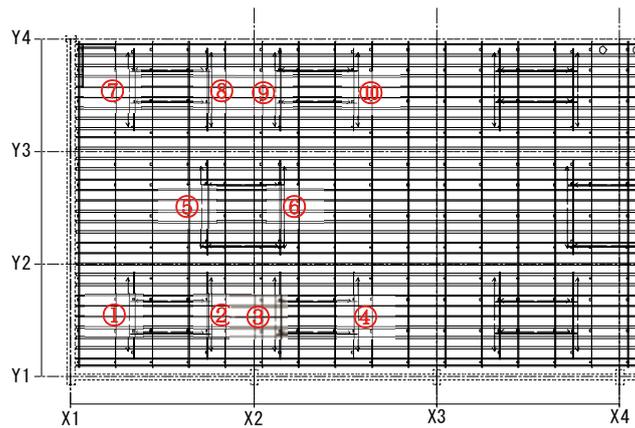
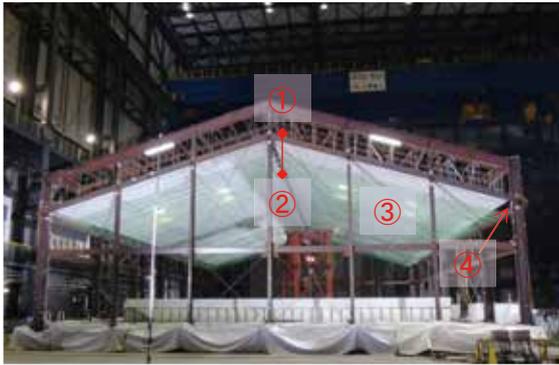


図 2.5.12 斜め部材配置

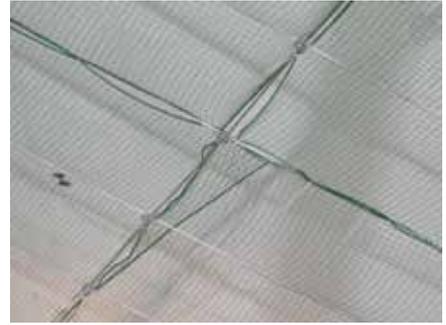
Fig. 2.5.12 Location of Braces.



全景(耐震天井)



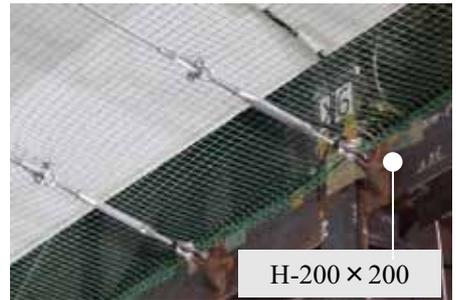
①吊り材(耐震天井)



③展開ロープと繊維ネット



②展開ロープと吊り材とブラケット(左:未対策天井、右:耐震天井)



④展開ロープとターンバックル

写真 2.6.1 試験体内部に設置したフェイルセーフ機能

Photo 2.6.1 Failsafe System in Gymnasium Specimen.



写真 2.8.1 ターゲットマーク

Photo 2.8.1 Target Marks for Videos.

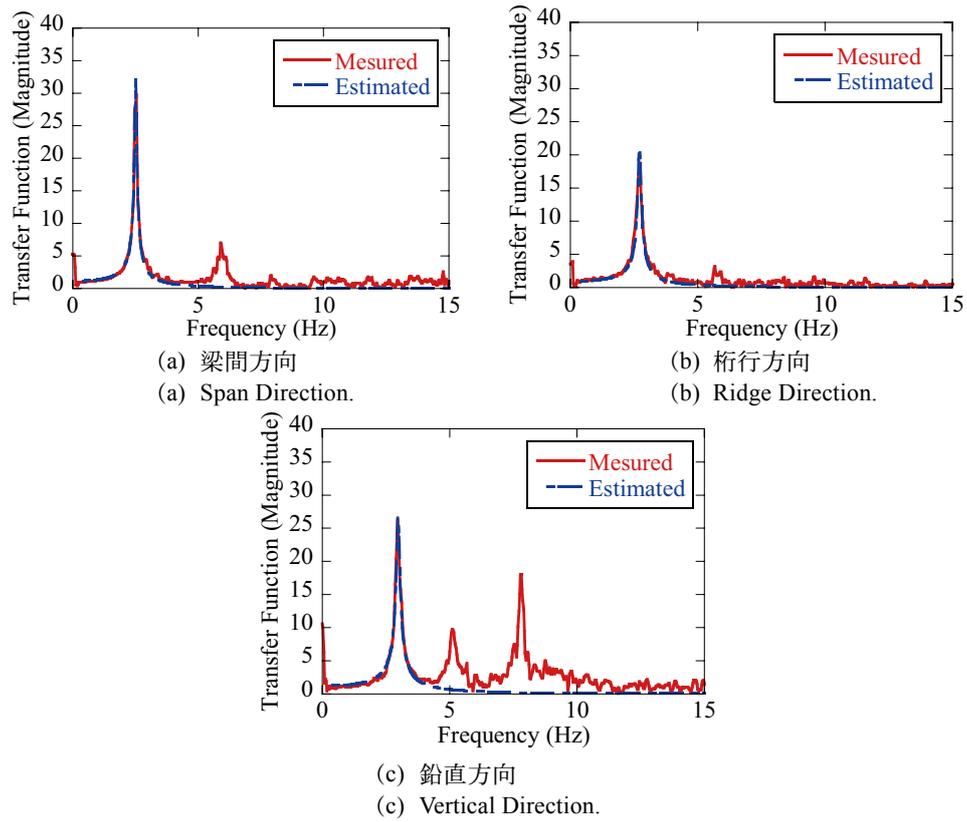


図 3.1 ランダム波加振による屋根頂部加速度応答の震動台入力に対する伝達関数
Fig. 3.1 Transfer Function of Response Acceleration to Table Acceleration during Whitenoise Excitation.

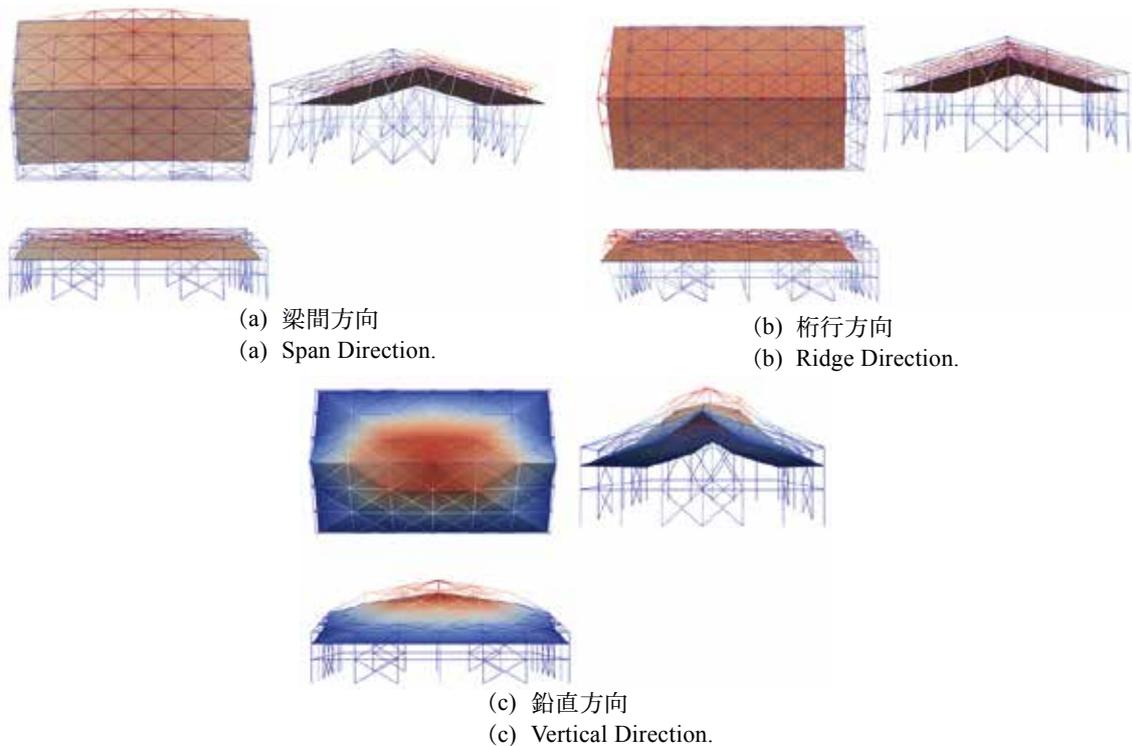
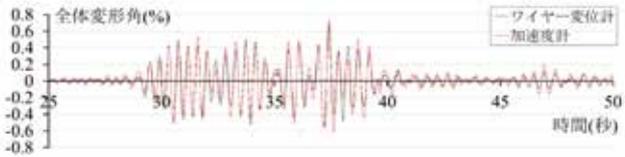
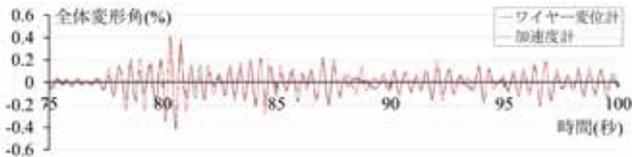


図 3.2 各方向 1 次固有モードのモード変形図
Fig. 3.2 Mode Shape in 1st Mode.



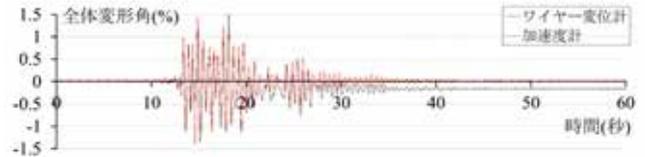
(a) 梁間方向
(a) Span Direction.



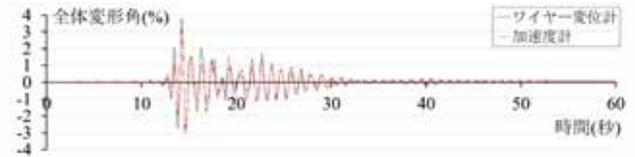
(b) 桁行方向
(b) Ridge Direction.

図 3.4 ワイヤ変位計と加速度計による全体変形角の時刻歴の比較(未対策天井, K-NET 仙台波 50% 加振の1回目)

Fig. 3.4 Comparison of Time-history Response of Global Drift Angle obtained by Wire-transducer and Accelerometer (Non-seismic Ceiling, K-NET Sendai 50% 1st-Excitation).



(a) 梁間方向
(a) Span Direction.



(b) 桁行方向
(b) Ridge Direction.

図 3.5 ワイヤ変位計と加速度計による全体変形角の時刻歴の比較(耐震天井, JMA 神戸波 100% 加振)

Fig. 3.5 Comparison of Time-history Response of Global Drift Angle obtained by Wire-transducer and Accelerometer (Non-seismic Ceiling, JMA Kobe 100% Excitation).



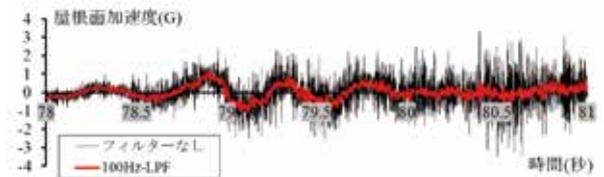
写真 3.1 K-NET 仙台波 80% 加振後の壁ブレースの座屈変形

Photo 3.1 Buckling of Vertical Brace after K-NET Sendai 80% Excitation.



写真 3.2 全加振後の屋根ブレースの座屈変形

Photo 3.2 Buckling of Horizontal Brace after All Excitations.



(a) 梁間方向
(a) Span Direction



(b) 桁行方向
(b) Ridge Direction



(c) 上下方向
(c) Vertical Direction

図 3.30 フィルター有無による屋根面加速度の比較(未対策天井, K-NET 仙台波 50% 加振の1回目)

Fig. 3.30 Comparison of Roof Acceleration Data not-filtered and filtered by 100Hz-LPF (Non-seismic Ceiling, K-NET Sendai 50% 1st-Excitation).

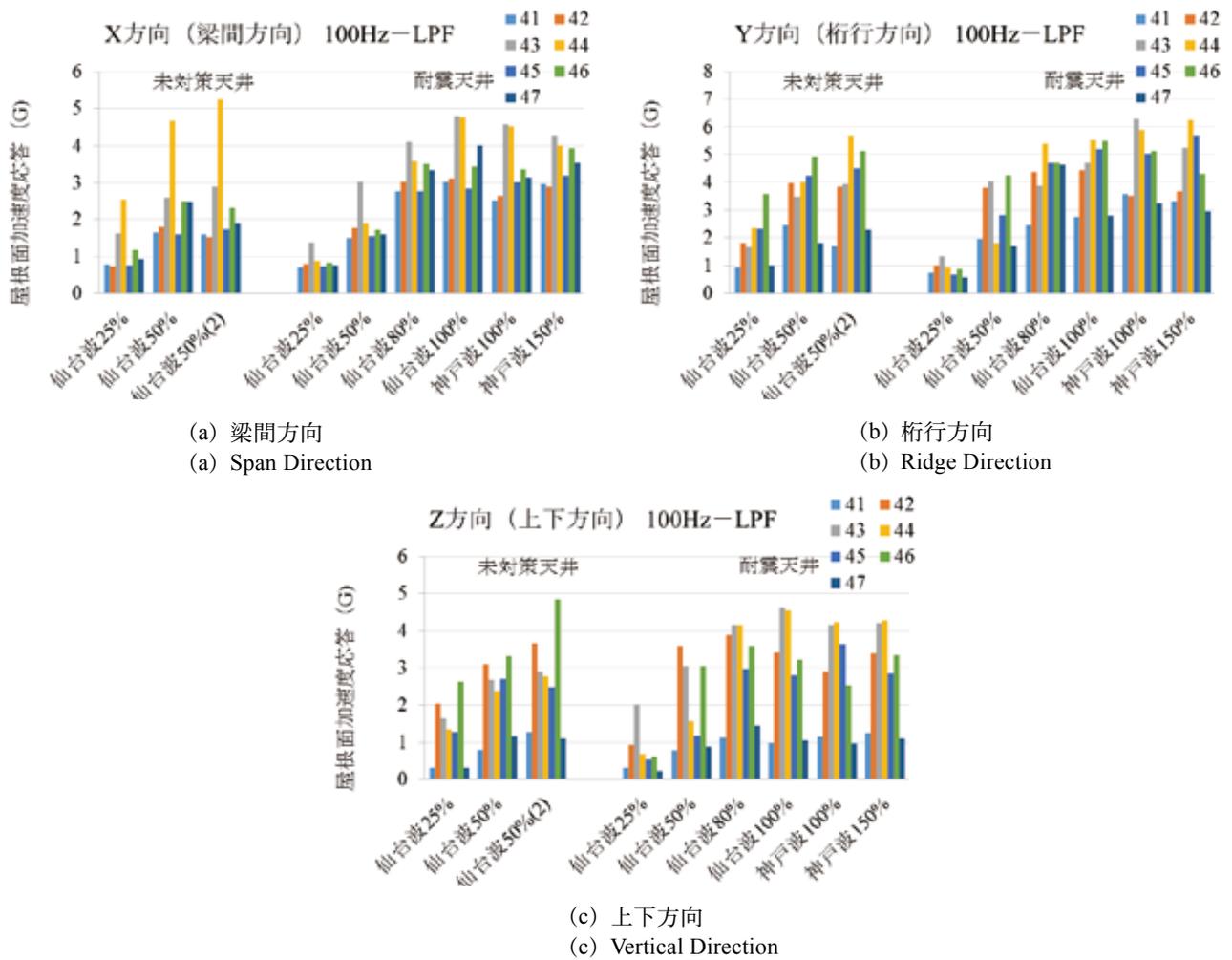


図 3.35 X4 通りにおける屋根面最大加速度の分布 (100Hz-LPF)

Fig. 3.35 Distribution of Maximum Roof Acceleration filter by 100Hz-LPF in X4.



(a) K-NET 仙台波 25% 加振後
(a) After K-NET Sendai 25% Excitation.



(b) K-NET 仙台波 50% (1 回目) 加振後
(b) After K-NET Sendai 50% 1st Excitation.



(c) K-NET 仙台波 50% (2 回目) 加振後
(c) After K-NET Sendai 50% 2nd Excitation.

写真 4.1 各加振後の天井頂部の状況
Photo 4.1 Damage after Experiment.



写真 4.2 クリップのすべりによる野縁受けの蛇行(K-NET 仙台波 25% 加振後)
Photo 4.2 Meandering of Furring Bracket due to Slip of Clips.

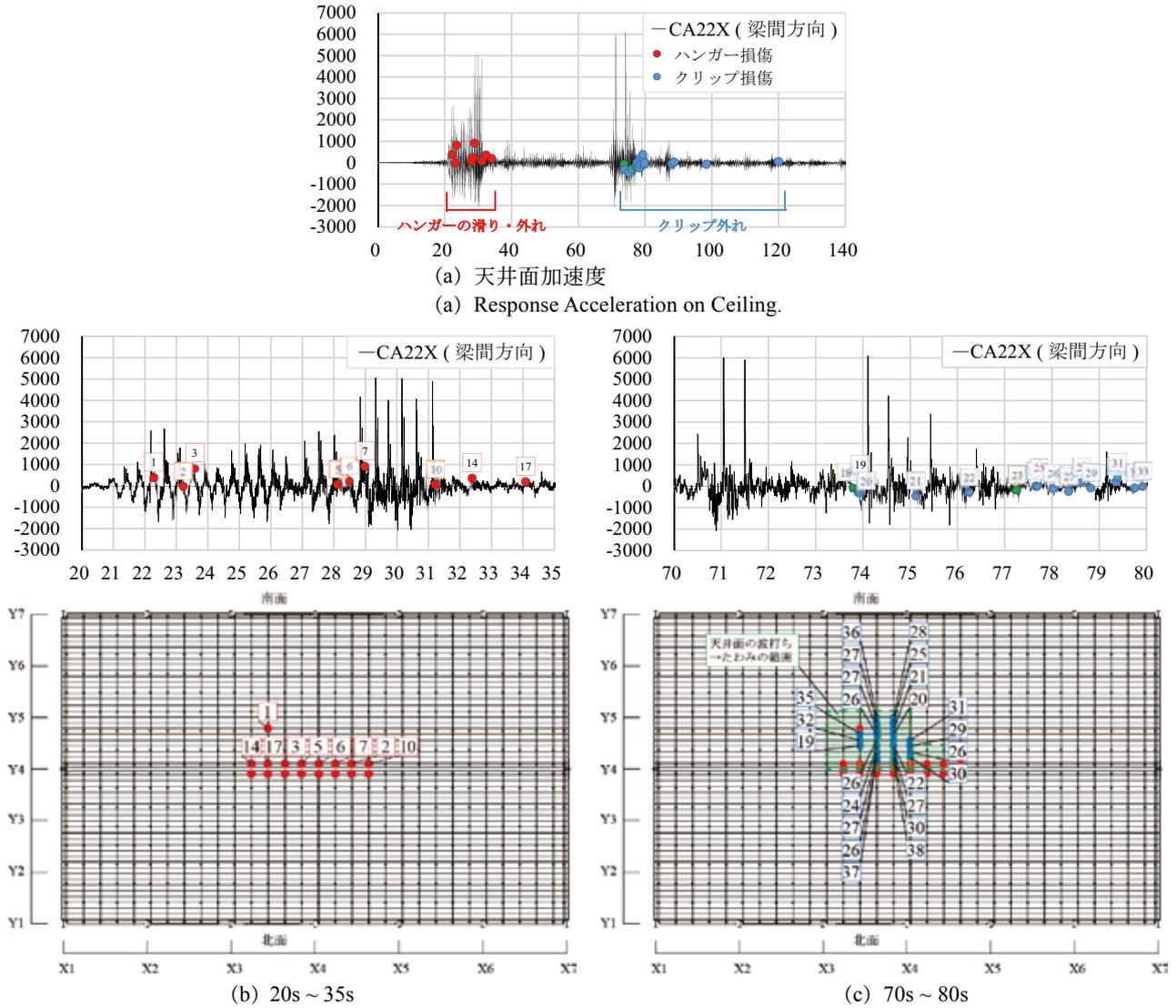
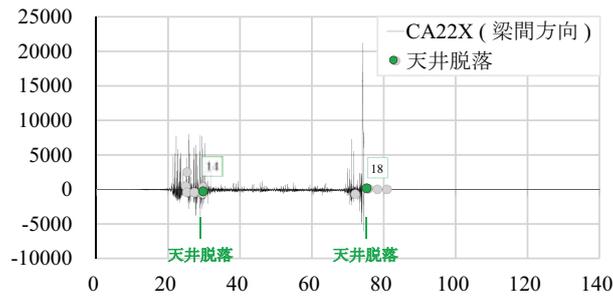


図 4.2 K-NET 仙台波 50% 1 回目加振における天井面加速度と損傷観察結果(CA22 付近：南面の天井の損傷との比較)
 Fig. 4.2 Response Acceleration of Ceiling and Damage Progress during K-NET Sendai 50% 1st Excitation.

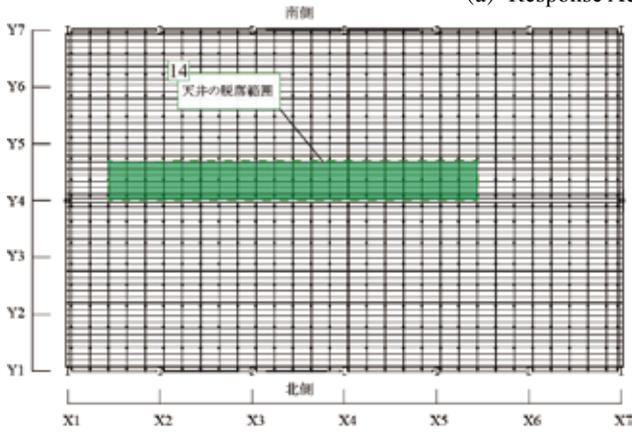


写真 4.3 天井が脱落した試験体の全景
 K-NET 仙台波 50% 2 回目加振後
 Photo 4.3 Damage of Ceiling after K-NET Sendai 50% 2nd Excitation.



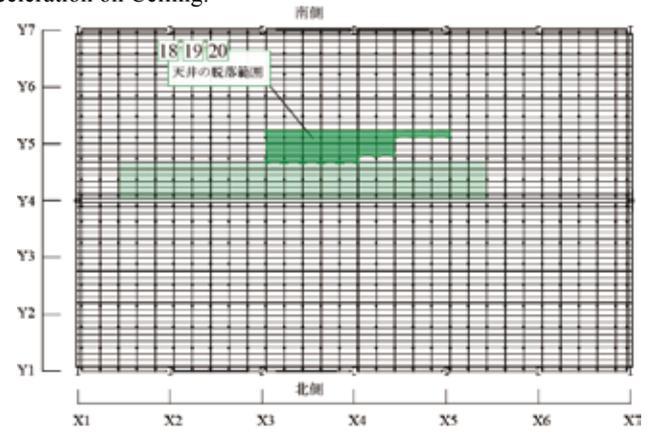
(a) 天井面加速度

(a) Response Acceleration on Ceiling.



(b) 30s 前後の天井の脱落範囲

(b) Area of Damaged Ceiling around 30s.



(c) 70s 以降の天井の脱落範囲

(c) Area of Damaged Ceiling after 70s.

図 4.4 K-NET 仙台波 50% 2 回目加振における天井面加速度と損傷観察結果 (CA22 付近: 南面の天井の損傷との比較)

Fig. 4.4 Response Acceleration of Ceiling and Damage Progress during K-NET Sendai 50% 2nd Excitation.

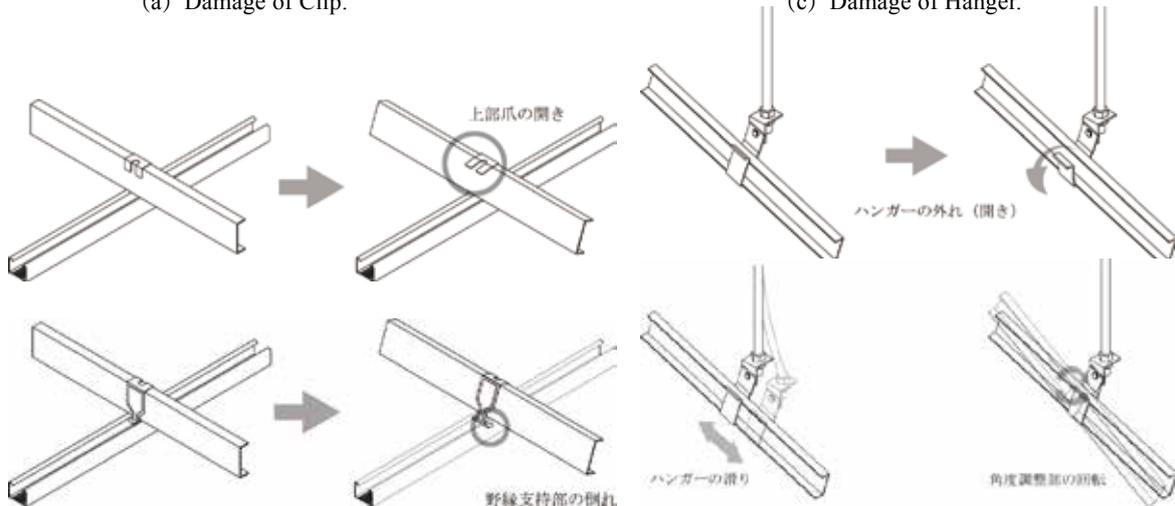


(a) クリップの損傷状況

(a) Damage of Clip.

(c) ハンガースの損傷状況

(c) Damage of Hanger.



(b) クリップの損傷イメージ

(b) Damage Pattern of Clip.

(d) ハンガースの損傷イメージ

(d) Damage Pattern of Hanger.

図 4.5 天井材接合部の損傷状況

Fig. 4.5 Damage of Ceiling Connection.



天井裏から見た頂部の損傷



床まで脱落した天井材



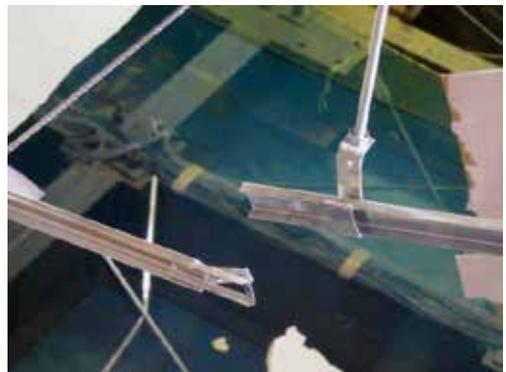
せっこうボードの目地を境に脱落した



ロックウール吸音板の脱落



クリップの外れ



野縁受けジョイントの外れ



壁際野縁の端部が座屈している



柱周りの仕上げ材の損傷

写真 4.4 実験後の未対策天井の損傷状況
Photo 4.4 Damage of Non-seismic Ceiling after Experiment.



写真 5.1.3 JMA 神戸波 100%加振後の斜め部材
損傷状況

Photo 5.1.3 Buckling of Brace during JMA Kobe
100% Excitation.



写真 5.1.4 JMA 神戸波 150%加振後の斜め部材
損傷状況

Photo 5.1.4 Buckling of Brace during JMA Kobe
150% Excitation.



写真 5.1.5 キャットウォークとの衝突
Photo 5.1.5 Pounding of Bolts to Catwalk.



写真 5.1.6 1.1G 耐震天井の損傷状況
Photo 5.1.6 Damage of Seismically Designed
Ceiling with Seismic Coefficient of 1.1.

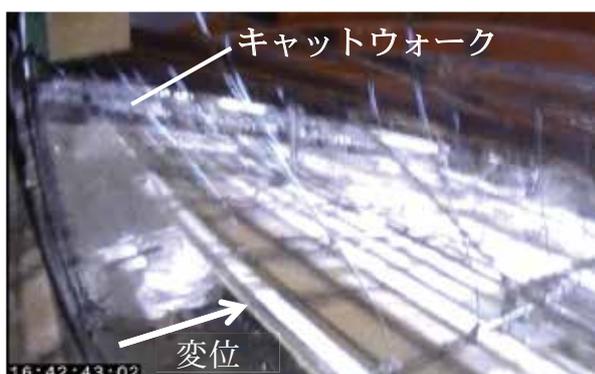


写真 5.1.7 天井下地材とキャットウォークの衝突
(JMA 神戸波 150% 加振)

Photo 5.1.7 Pounding of Ceiling to Catwalk (JMA
Kobe 150% Excitation).



写真 5.1.8 キャットウォーク直下の天井脱落
(JMA 神戸波 150% 加振)

Photo 5.1.8 Damage of Ceiling Panels underneath
Catwalk (JMA Kobe 150% Excitation).



写真 5.1.9 キャットウォーク直下の仕上げ材脱落
Photo 5.1.9 Falling Down of Ceiling Panels underneath Catwalk.



写真 5.1.10 仕上げ材を突き破った斜め部材
Photo 5.1.10 Breaking Through of Ceiling Braces.



写真 5.1.11 柱への衝突による損傷と脱落
Photo 5.1.11 Damage due to Pounding of Ceiling to Column.



写真 5.1.12 斜め部材下部の脱落による仕上げ材の脱落
Photo 5.1.12 Falling Down of Ceiling Panels due to Breaking of Braces.



(a) ブレース上部
(a) Top of Brace

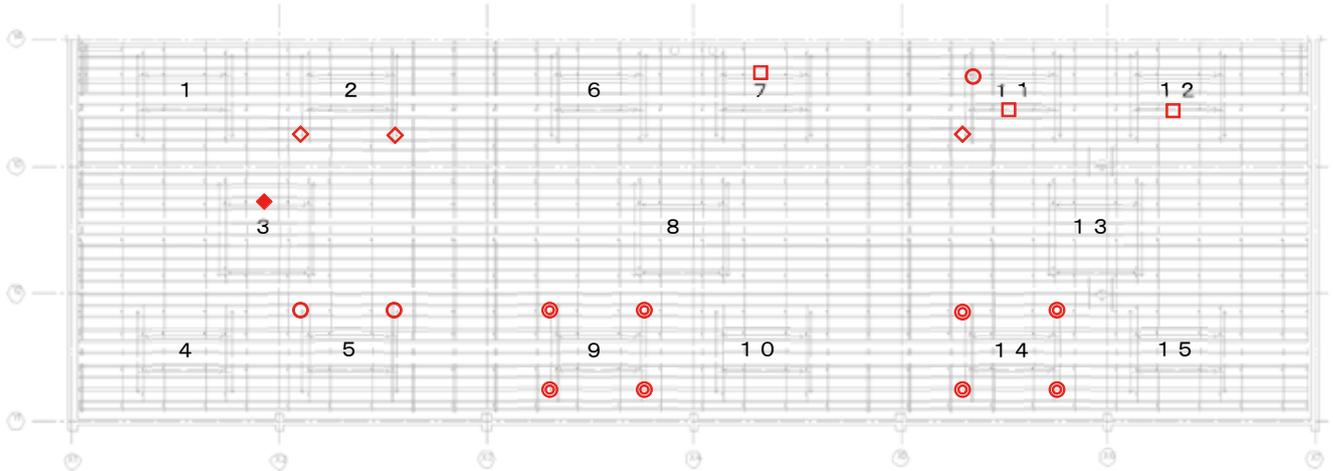


(b) ブレース下部
(b) Bottom of Brace

写真 5.2.1 K-NET 仙台波 80% 加振における損傷状況
Photo 5.2.1 Damage during K-NET Sendai 80% Excitation.



写真 5.2.2 K-NET 仙台波 100% 加振後の斜め部材損傷状況
Photo 5.2.2 Damage of Brace during K-NET Sendai 100% Excitation.



(凡例) ◇: 吊りボルトの湾曲 ○: 上部金具の下がり ●: 上部金具の変形
 ◆: 追加野縁受けの湾曲 □: 追加野縁受けと下部金具 (ブレース下部金具 RP) との間に隙間あり

図 5.2.2 K-NET 仙台波 80% 加振後の損傷箇所(損傷調査による確認結果)
 Fig. 5.2.2 Progress of Damage after K-NET Sendai 80% Excitation (Direct Inspection).



写真 5.2.3 JMA 神戸 100% 加振後の斜め部材
 損傷状況
 Photo 5.2.3 Damage of Brace during JMA Kobe 100%
 Excitation.



(a) 頂部の天井同士の衝突
 (a) Pounding of Ceilings at Top.



写真 5.2.5 JMA 神戸 150% 加振後の斜め部材
 損傷状況
 Photo 5.2.5 Damage of Brace during JMA Kobe 150%
 Excitation.



(b) 天井端部における壁への衝突
 (b) Pounding of Ceiling to Wall.

写真 5.2.4 JMA 神戸 100% 加振時の状況
 Photo 5.2.4 Ceiling of collision JMA Kobe 100%Excitation.



(a) 斜め部材 3-2(2)
(a) Brace 3-2 (2)



(b) 斜め部材 3-2
(b) Brace 3-2



(i) 斜め部材 10-1
(i) Brace 10-1



(j) 斜め部材 13-1
(j) Brace 13-1



(c) 斜め部材 3-4(2)
(c) Brace 3-4 (2)



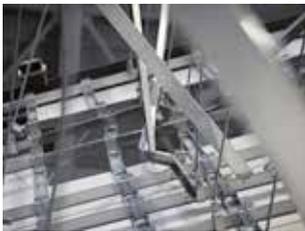
(d) 斜め部材 3-4
(d) Brace 3-4



(k) 斜め部材 13-3
(k) Brace 13-3



(l) X1Y1 柱廻り
(l) Around X1Y1 Column



(e) 斜め部材 4-5
(e) Brace 4-5



(f) 斜め部材 5-6(2)
(f) Brace 5-6 (2)



(m) X2Y1 柱廻り
(m) Around X2Y1 Column



(n) X4Y1 柱廻り
(n) Around X4Y1 Column



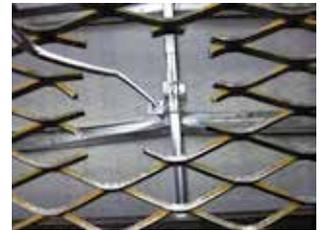
(g) 斜め部材 5-6
(g) Brace 5-6



(h) 斜め部材 8-1
(h) Brace 8-1



(o) キャットウォーク下 1
(o) Underneath Catwalk (1)



(p) キャットウォーク下 2
(p) Underneath Catwalk (2)

写真 5.2.6(1) JMA 神戸波 150% 加振後の損傷状況
Photo 5.2.6(1) Damage after JMA Kobe 150% Excitation.



(q) 野縁受けジョイント
(q) Joint of Ceiling Joist Receiver



(r) 頂部
(r) Top of Ceiling

写真 5.2.6(2) JMA 神戸波 150% 加振後の損傷状況
Photo 5.2.6(2) Damage after JMA Kobe 150% Excitation.

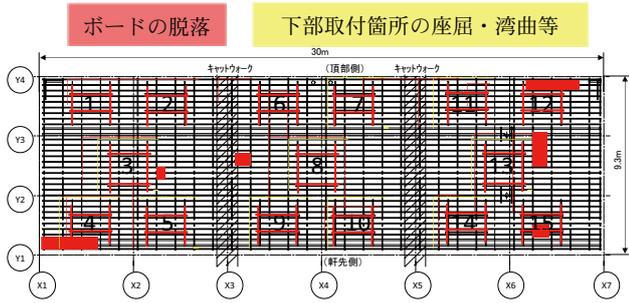


図 5.2.5 JMA 神戸波 150% 加振後の損傷状況
 Fig. 5.2.5 Damage after JMA Kobe 150% Excitation.



写真 5.2.7 ブレース近傍の破損状況
 Photo 5.2.7 Damage after JMA Kobe 150% Excitation.



(a) 天井下から
 (a) Look up from floor.



(b) 脱落した天井の捕捉状況
 (b) Catching the Damaged Ceiling.



(c) 捕捉したクリップ
 (c) Damaged Clip.

写真 5.3.1 未対策天井に対する K-NET 仙台波 50% 加振後のフェイルセーフ機能の状況
 Photo 5.3.1 Failsafe System after K-NET Sendai 50% Excitation for Non-seismic Ceiling.



(a) 2.2G 耐震天井
 (a) Seismically Designed Ceiling with Seismic Coefficient of 2.2.



(b) 1.1G 耐震天井
 (b) Seismically Designed Ceiling with Seismic Coefficient of 1.1.



(c) 折れ曲がった吊り材
 (c) Bent Suspending Rods.

写真 5.3.2 1.1G 耐震天井, 2.2G 耐震天井に対する JMA 神戸波 150% 後のフェイルセーフ機能の状況
 Photo 5.3.2 Failsafe System after JMA Kobe 150% Excitation for Seismically Designed Ceiling.



(a) 10.0 秒
(a) 10.0 sec



(b) 11.9 秒
(b) 11.9 sec

写真 5.3.3 JMA 神戸 100% 加振における吊り材への天井の衝突
Photo 5.3.3 Pounding of Ceiling to Suspending Rods.



(a) 展開ワイヤ
(a) Wire



(b) 吊り材
(b) Suspending Rod

写真 5.3.4 引張試験による残存強度の評価

Photo 5.3.4 Evaluation of Remain Strength by Tensile Tests.



写真 5.3.5 展開ワイヤの破断状況
Photo 5.3.5 Rapture of Wires.



写真 5.3.6 吊り材の破断状況
Photo 5.3.6 Rapture of Hanging Rods.



写真 5.3.7 衝突の瞬間

Photo 5.3.7 Pounding of Ceiling Board.

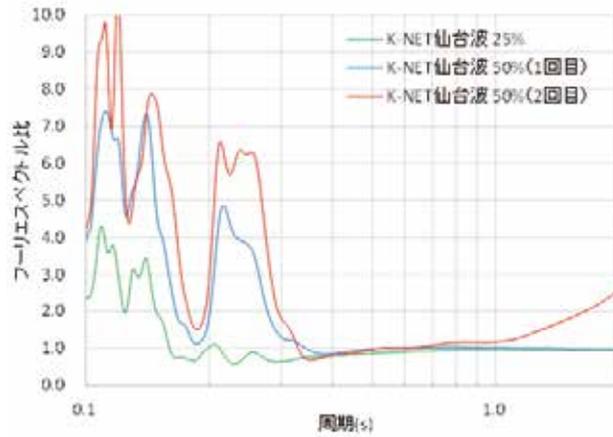


図 6.2 伝達関数(未対策天井)
 Fig. 6.2 Transfer Function (Non-seismic Ceiling).

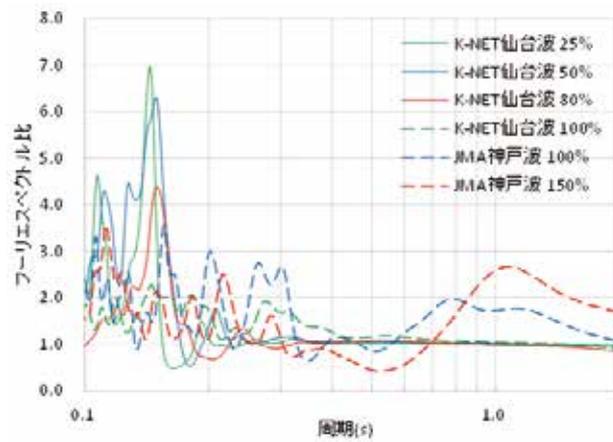


図 6.3 伝達関数(1.1G 耐震天井)
 Fig. 6.3 Transfer Function (Seismically Designed Ceiling with Seismic Coefficient of 1.1).

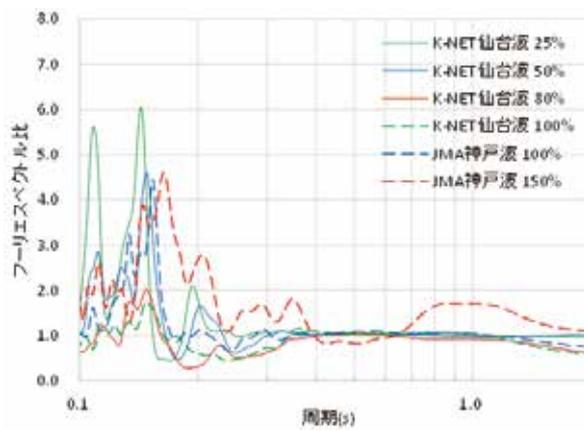


図 6.4 伝達関数(2.2G 耐震天井)
 Fig. 6.4 Transfer Function (Seismically Designed Ceiling with Seismic Coefficient of 2.2).

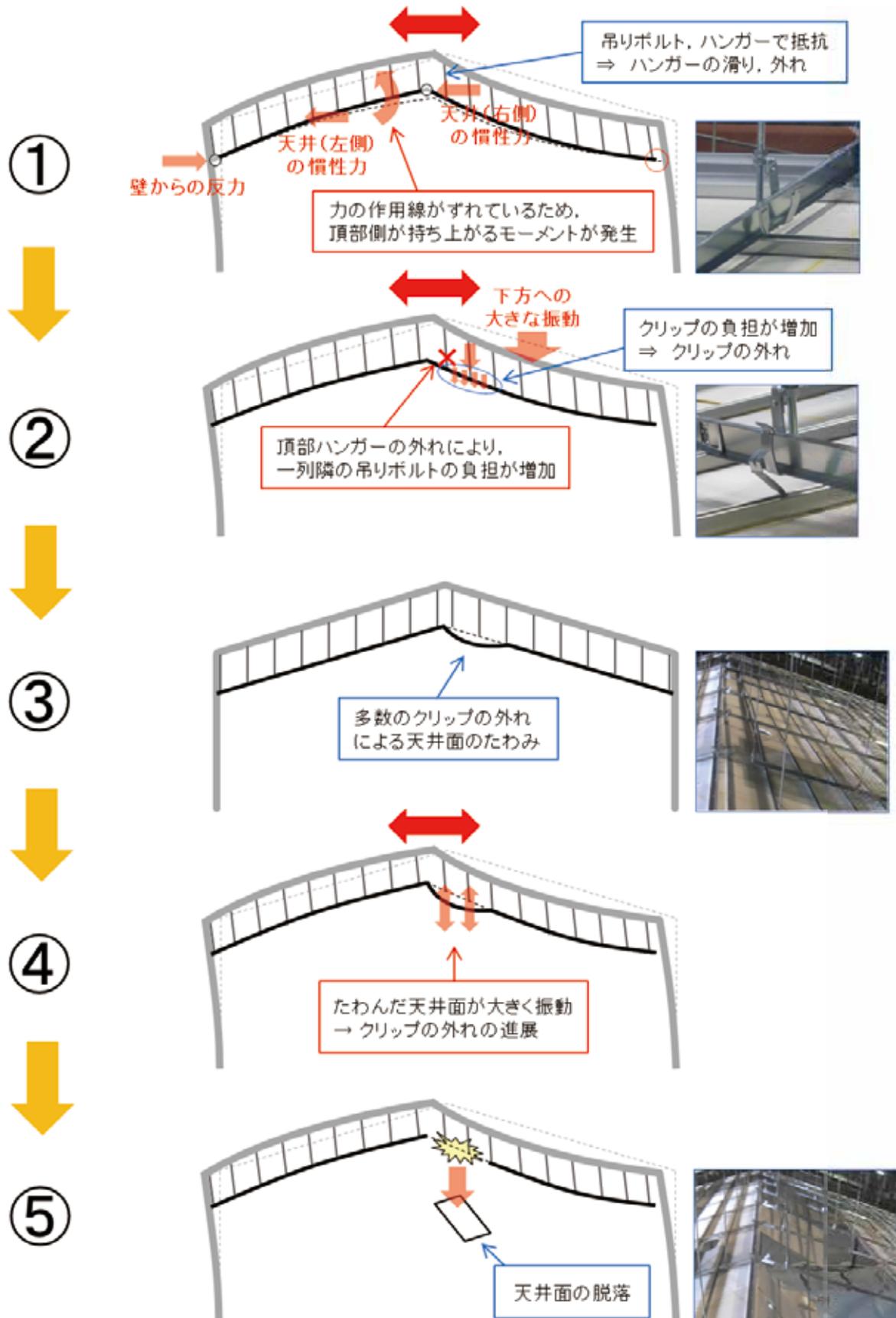


図 6.5 未対策天井の脱落被害メカニズム
 Fig. 6.5 Collapse Mechanism of Non-seismic Ceiling.

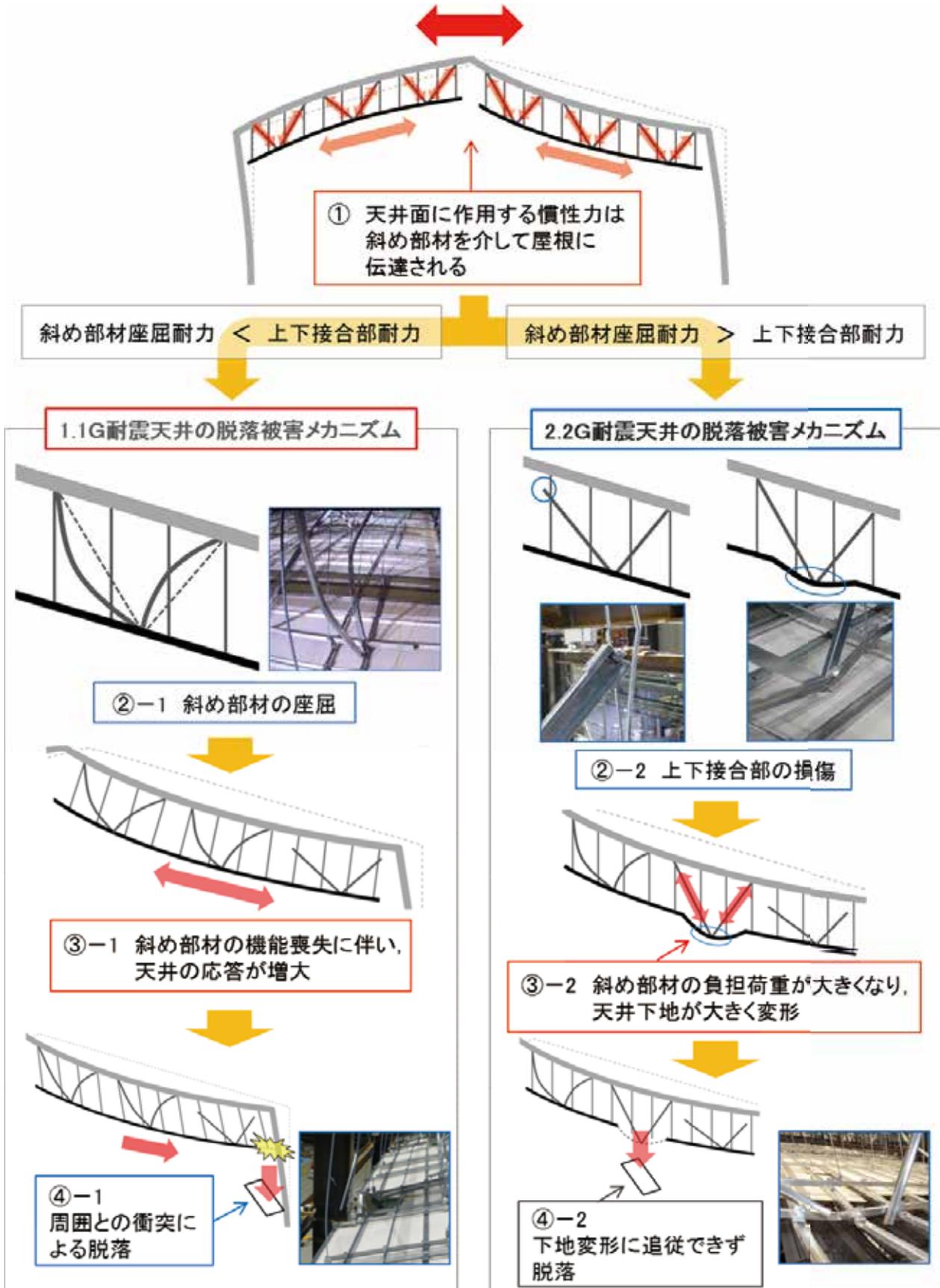


図 6.6 H26 技術基準による脱落防止対策が施された天井の脱落被害メカニズム
 Fig. 6.6 Collapse Mechanism of Seismically Designed Ceiling.



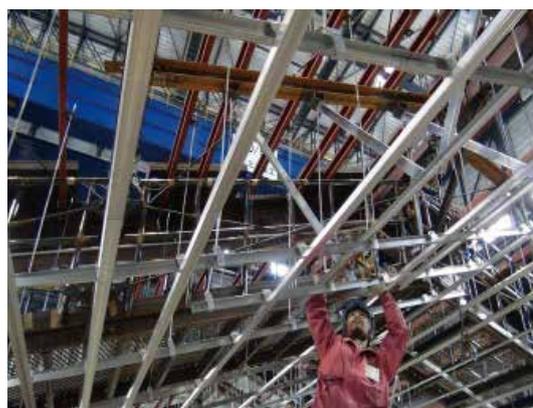
写真 7.3.1 ハンガーへのビス打ち状況
Photo 7.3.1 Screw Fastening to Hangers.



写真 7.3.2 野縁受けジョイント部ビス止め
Photo 7.3.2 Screw Fastening to Joint of Ceiling Joist Receiver.



(a) 上部取り付け
(a) Top of Brace.



(b) 下部ビス固定
(b) Screw Fasten at Bottom of Brace.

写真 7.3.3 斜め部材取付状況
Photo 7.3.3 Assemble Brace.



写真 7.3.4 せっこうボード張り
Photo 7.3.4 Paste Plaster Boards.



写真 7.3.6 塩ビ製見切縁
Photo 7.3.6 Vinyl Chloride Ceiling Edge.



写真 7.3.5 ロックウール吸音板貼り
Photo 7.3.5 Paste Rock Wool Acoustic Tiles.



写真 7.3.7 勾配天井におけるクリアランス確認
Photo 7.3.7 Check of Clearance in Slope Ceiling.

表 7.3.5(1) 各天井を構成する部材の相違点
 Table 7.3.5(1) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

		仕様		
		未対策天井 (600 m ²)	1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
吊ボルト	仕様	W3/8 吊ボルト 1.2m×1.0m 間隔 630 本	同左 0.9m×1.0m 間隔 377 本	同左 0.9m×1.0m 間隔 377 本
	状況			
	課題			
		仕様		
		未対策天井 (600 m ²)	1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
ハンガー	仕様	フリーハンガーで設定. (630 個)	耐震フリーハンガーで設定 (377 個)	耐震フリーハンガーで設定 (377 個)
	状況	勾配での角度固定なし 	勾配での角度固定の為, φ4 ビス打ち必要 	吊ボルトワッシャ必要 勾配での角度固定の為, φ4 ビス打ち必要 
	課題		・ビス固定が母材 3.2mm の 為, 作業上手間がかかる.	・ビス固定が母材 3.2mm の為 作業上, 手間がかかる. ・ビスが吊ボルトと干渉し, 下穴位置にうてない.
	対策		対策無し	対策無し

表 7.3.5(2) 各天井を構成する部材の相違点
 Table 7.3.5(2) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

野縁受け	仕様		
	未対策天井 (600 m ²)	1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
	CC-19 (t = 1.2mm)	CC-19 (t = 1.2mm)	[-40×20×1.6
	課題		材料が 1 サイズ大きく、板厚も厚い為、重い。
対策		対策無し	

野縁	仕様		
	未対策天井 (600 m ²)	1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
	CS-19 (t = 0.5mm) CW-19 (t = 0.5mm)	CS-19 (t = 0.5mm) CW-19 (t = 0.5mm)	全数ダブル野縁 (t = 0.8mm) 野縁-50×25×0.8
	※シングル野縁：@364mm ダブル野縁：@1820mm ジョイント：286 箇所	※シングル野縁：@303mm ダブル野縁：@910mm ジョイント：224 箇所	ダブル野縁：@303mm ジョイント：176 箇所
	状況		
	課題	@910 でダブル野縁が入る為、せっこうボードのジョイント位置が不明瞭。 野縁ピッチが狭くなる為、取付本数は増加する。	全てダブル野縁となり、ボードジョイント位置が不明瞭。 板厚が厚い為、重い。 野縁ピッチが狭くなる為、取付本数は増加する。
対策	基準の印が付いた野縁を取付けると判りやすくなる。		

表 7.3.5(3) 各天井を構成する部材の相違点
 Table 7.3.5(3) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

		仕様		
		未対策天井 (600 m ²) ワンタッチクリップ	1.1G 耐震天井 (274 m ²) ビスクリップ使用	2.2G 耐震天井 (274 m ²) ビスクリップ使用
クリップ	状況	S : 1394 個 W : 449 個	2 種類使い分け 斜め部材廻り：耐震クリップ ビス固定：野縁・・2 本 野縁受・・1 本 S : 336 個 W : 168 個 通常部：耐風圧クリップ S : 294 個 W : 186 個	耐風圧クリップが標準 W : 947 個 斜め部材廻りは補強金物で野縁に固定 野縁方向 : 5 箇所 野縁受方向 : 4 箇所 ビス固定：野縁・・4 本 野縁受・・1 本 W : 270 個
				
				
	課題		<ul style="list-style-type: none"> 斜め部材廻りのクリップと一般部のクリップを使い分ける必要があり、施工時に判断がつかない。 斜め部材廻りのクリップ補強ビスが2種類あり、使い分ける必要がある。 しっかり止め付けないとクリップが滑りやすく、軽く締めた状態での野縁の仮止めが難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> 斜め部材廻りのクリップ補強ビスをとめる際、クリップに下穴がない為、クリップと野縁受けを2枚抜きする必要がある、施工手間がかかる。
	対策		<ul style="list-style-type: none"> 似た部材を統一する。 	<ul style="list-style-type: none"> クリップに下穴を設ける。

表 7.3.5(4) 各天井を構成する部材の相違点
 Table 7.3.5(4) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

		仕様		
		未対策天井 (600 m ²)	1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
クリアランス	状況	なし	あり	
			勾配下端で 60mm, 頂点部で 60mm ずつ, 120mm のクリアランスを設ける	
				
				
課題		斜め部材以外の部分を固定できない為, クリアランスを設けるタイミングが難しい. 仕上げ材を張り付けるとその重量で下がってくる.		
対策		勾配天井の壁際クリアランスは, 指定寸法きっちりとは施工が困難であるため, 重量でずれる分なども考慮し, 必要寸法 + α で指示する必要がある.		

表 7.3.5(5) 各天井を構成する部材の相違点
 Table 7.3.5(5) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

		仕様	
		1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
斜め部材	状況	[-40×20×1.6 X・Y方向に 27 対ずつ	[-50×25×10×1.6 X・Y方向に 30 対ずつ
			
	課題	吊り元まで手が届かなくても作業できるような金具を使用した。周辺の状況によっては取付が不可能であった。天井裏へ体を入れる必要があり、天井下地の施工足場では作業ができなかった	
	対策	足場の盛り替えもしくは作業用の追加足場が必要になる。 吊り元にアクセスできず、多少の障害物があっても作業可能な金具の開発が必要。	

表 7.3.5(6) 各天井を構成する部材の相違点
 Table 7.3.5(6) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

		仕様	
		1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
斜め部材上部取付金物		ホロータイプ 斜め部材用吊ボルト：114 本	ホロータイプ (スライド式) 斜め部材用吊ボルト：120 本
		2 人 1 組で天井内作業 斜め部材にはビス 4 本で固定	斜め部材にはビス 6 本で固定
	状況		
	課題	吊ボルトに嵌合する部分を、一度分解してから取付ける為、手間がかかる。下部から取り付けることが出来るよう工夫はされていたが、周辺状況によっては作業できなかった。	下部から取付けることが可能な工夫がみられたが、斜め部材が長くなると斜め部材を振り回しにくくなり困難になる。
	対策	さらなる技術開発が望まれる。	

表 7.3.5(7) 各天井を構成する部材の相違点
Table 7.3.5(7) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

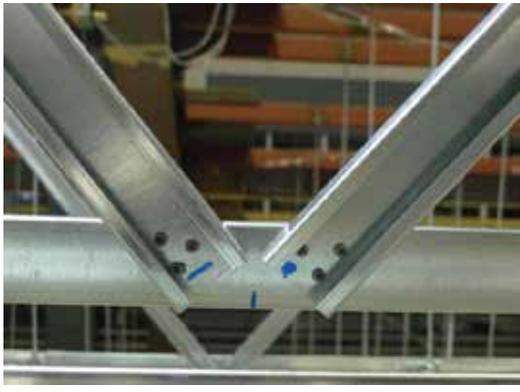
		仕様	
		1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
斜め部材下部固定		ビス 2 本固定 (追加野縁受け材 : [-40×20×1.6])	ビス 3 本固定 (追加野縁受け材 : [-40×20×1.6])
		斜め部材受けは野縁受け 4 本に渡し、ビス 2 本/箇所 で 4 箇所を固定。 但し、取付金物はハンガーが兼ねる。	斜め部材受けは野縁受け 4 本に渡し、ビス 2 本/箇所 で 4 箇所を固定。 但し、斜め部材受けと野縁受けを固定する取 付金物をビス 2 本/箇所 で 4 箇所を野縁受に固 定。
	状況		
	課題	ハンガーが斜め部材受け取付金物を兼ねるので、左右の向きが限定される。 施工時に把握していないと、やり直す必要が出る。 野縁受け材の向きを、片側 1 方向に決めて施工する必要がある。	斜め部材受け取付金物をハンガーに被せて取付けるため、左右の向きが限定される。 施工時に把握していないと、やり直す必要が出る。 高強度のためか、固定するビスの本数が多い。 野縁受け材の向きを、片側 1 方向に決めて施工する必要がある。
対策	斜め部材設置位置を事前に十分検討しておく。 向きに寄らず斜め部材が固定できるような工法の開発が望ましい。		

表 7.3.5(8) 各天井を構成する部材の相違点
 Table 7.3.5(8) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

		仕様	
		1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
野縁受ジョイント		未対策天井用ジョイント 62 箇所	野縁受が[-40×20×1.6 の為, 特製ジョイントを使用 46 箇所
		未対策天井用ジョイントに ビス 2 本ずつ, 4 本で固定. 下穴なし (t1.2mm 2 枚抜き)	St-1.6mm2 枚挟み込みの 特製ジョイントを使用 ビス 2 本ずつ, 4 本で固定. 下穴なし (t1.6mm 3 枚抜き)
	状況		
	課題	下穴がない為, ジョイント: 1.0mm と野縁受: 1.2mm を打ち抜く必要があるため, 施工に手間がかかる.	下穴がない為, ジョイント: 1.6mm×2 枚と野縁受: 1.6mm の 3 枚を打ち抜く必要があるため, 施工に手間がかかる.
	対策	あらかじめした穴を設けるなど, 緊結しやすい構造とする.	

表 7.3.5 (9) 各天井を構成する部材の相違点
Table 7.3.5 (9) Difference of Characteristics of Members in Ceiling.

	仕様		
	未対策天井 (600 m ²)	1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
	せっこうボード 9.5mm + ロックウール吸音板 12mm		
せっこうボード張り	※シングル野縁：@360mm ダブル野縁：@1820mm	※シングル野縁：@300mm ダブル野縁：@910mm	野縁-50×25×0.8：@300mm
			
	課題	@910 で W バーが入る為、ボードジョイント位置が不明瞭.	全て W バーとなり、ボードジョイント位置が不明瞭。板厚が厚い為、重くボードビスを打つ場合、硬く力がある。
対策		ボードジョイント位置をあらかじめマーキングしておく	ボードジョイント位置をあらかじめマーキングしておく 板厚に対する対策はない

	仕様		
	未対策天井 (600 m ²)	1.1G 耐震天井 (274 m ²)	2.2G 耐震天井 (274 m ²)
	せっこうボード 9.5mm + ロックウール吸音板 12mm		
ロックウール吸音板貼り	※シングル野縁：@360mm ダブル野縁：@1820mm	※シングル野縁：@300mm ダブル野縁：@910mm	野縁-50×25×0.8：@300mm
			
	課題	壁際に沿って全面施工するので、部屋形状に合わせてボードおよび見切り縁を切り欠き加工する必要がある。	壁際にクリアランスを設けるので、クリアランスの調整が必要。複雑な形状の場合は、確認すべき箇所が増え、より困難になる。
対策		クリアランス調整がしやすいよう、できる限り平易な形状とする。	

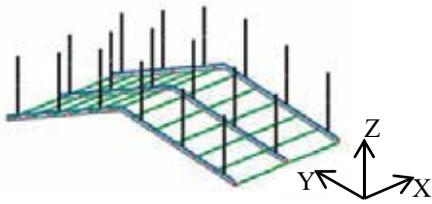


図 8.1 部分天井モデル
Fig. 8.1 Ceiling model.

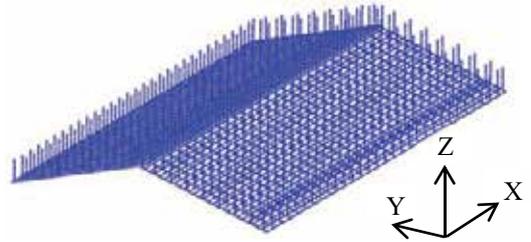


図 8.2 体育館仕様の天井モデル
Fig. 8.2 Ceiling model for gymnasium.

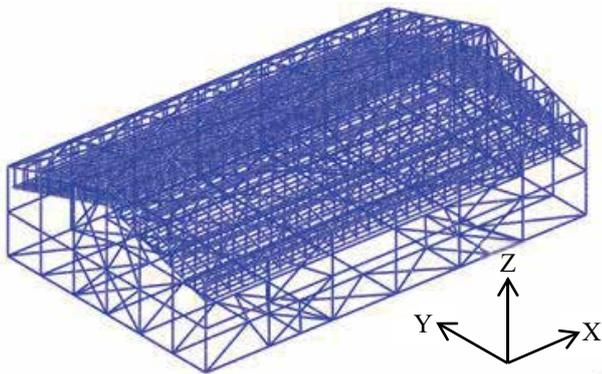


図 8.3 天井付き体育館構造躯体モデルの鳥瞰図
Fig. 8.3 Bird-eye view of gymnasium model with ceiling.

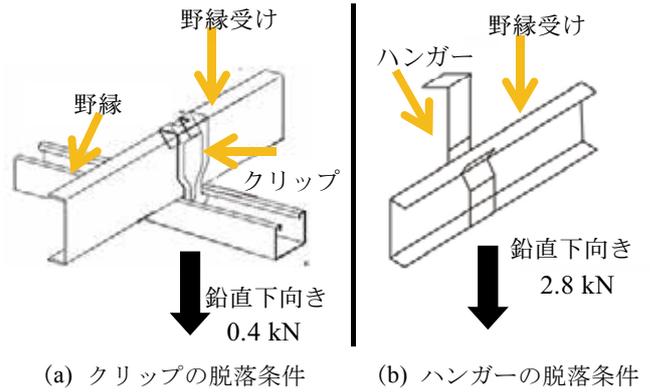


図 8.4 クリップとハンガーの脱落条件
Fig. 8.4 Failure conditions of clip and hanger.

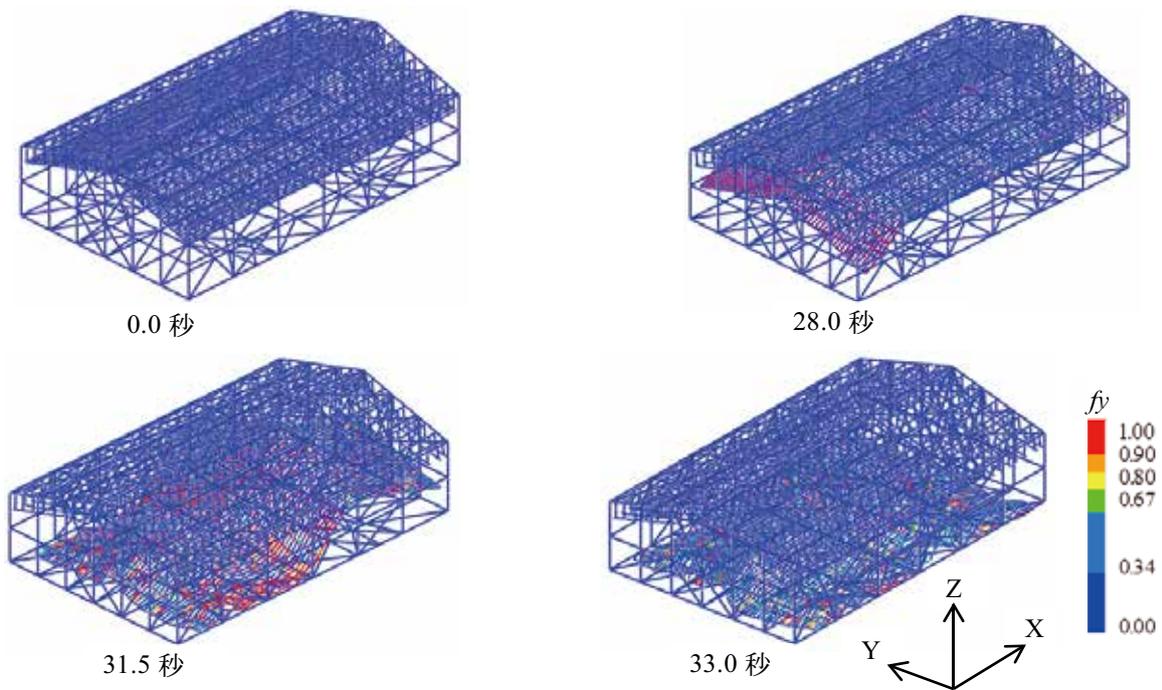


図 8.5 天井の落下挙動
Fig. 8.5 Collapse behavior of ceiling.

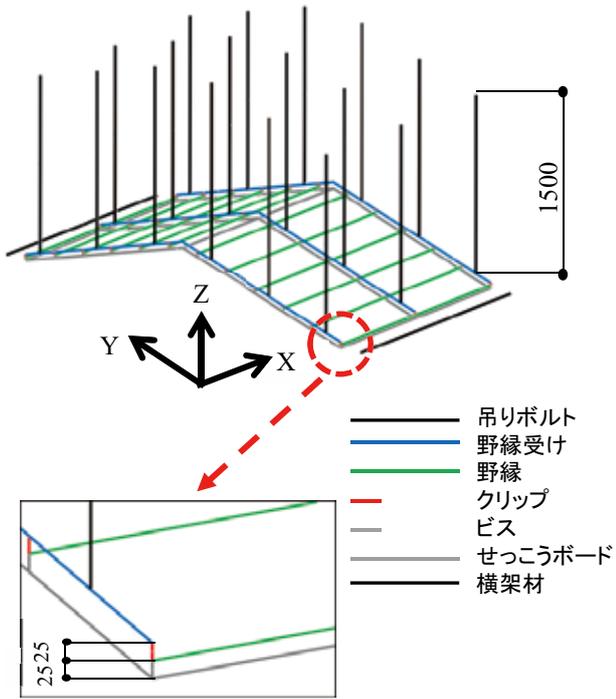
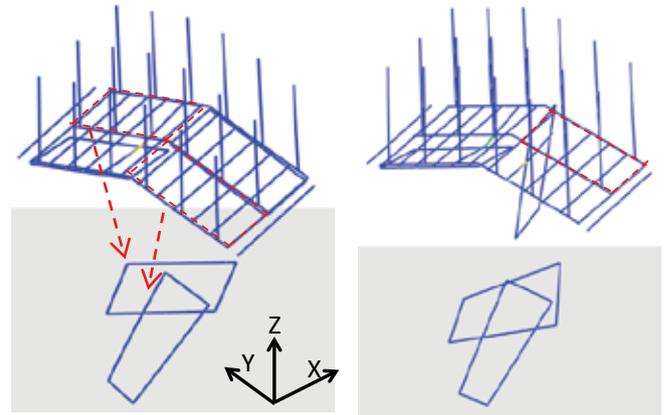
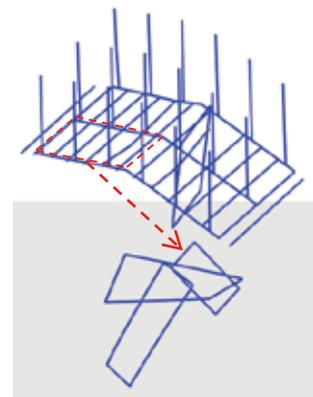


図 8.7 せっこうボードとビスを付加した天井モデル
 Fig. 8.7 Ceiling model with plaster board and screw.



(a) 約 34 秒

(b) 約 36 秒



(c) 約 76 秒

図 8.8 天井の局所落下現象
 Fig. 8.8 Partial collapse behavior of ceiling.