

耐震診断法の高度化に 関する検討

平成23年4月15日

東京大学生産技術研究所

東京工業大学建築物理研究センター

(株)堀江建築工学研究所

検討の目的

◆ 目的

現行の耐震改修促進法で認められている耐震診断基準では診断に適していないか、もしくは、より高度な診断をするべき建築物の耐震性能を適切に評価できる診断法の開発

◆ 検討内容

1. 鉄筋コンクリート造建築物の非線形時刻歴応答解析等の非線形詳細解析による診断法の検討
2. 鉄骨造体育館に対する三次元非線形時刻歴応答解析による診断法の検討
3. 木造建築物に対する一般診断法と精密診断法の評価法の検証

検討体制

本委員会と3つの部会を設置して検討を行った。(本検討の内、鉄筋コンクリート造に関する検討は(独)建築研究所、東京大学生産技術研究所、(財)日本建築防災協会、(株)堀江建築工学研究所の共同研究として、鉄骨造と木造に関する検討は(独)建築研究所の技術指導のもとで実施。((財)日本建築防災協会は鉄骨造と木造に関しても共同研究者として参加した。))

(1)本委員会

・委員長：壁谷沢寿海(東京大学) 他 9名

(2)部会

- ①鉄筋コンクリート部会 : 部会長:中埜良昭(東京大学) 他 10名
- ②鉄骨造部会 : 部会長:山田哲(東京工業大学) 他 8名
- ③木造部会 : 部会長:腰原幹雄(東京大学) 他 12名

2010年度 研究のアプローチ

◆ 検討対象:

既存(1981年以前の設計)の中低層RC造(PCa造を含む)建物

◆ 高度化の効果の対象:

(Ⅰ) 現行の耐震診断手法(第1次~3次)そのものの高度化

(Ⅱ) 将来の耐震診断手法(第4次:静的非線形立体解析, 第5次:動的非線形立体解析)の開発(評価手法の高度化)

※(Ⅱ)に主眼を置きつつも, その評価手法や判断基準が明確でないために曖昧になりがちな現行診断手法に潜在する問題点(後述の◎項目)を解決することにより, (Ⅰ)に直接的に寄与することも並行して検討

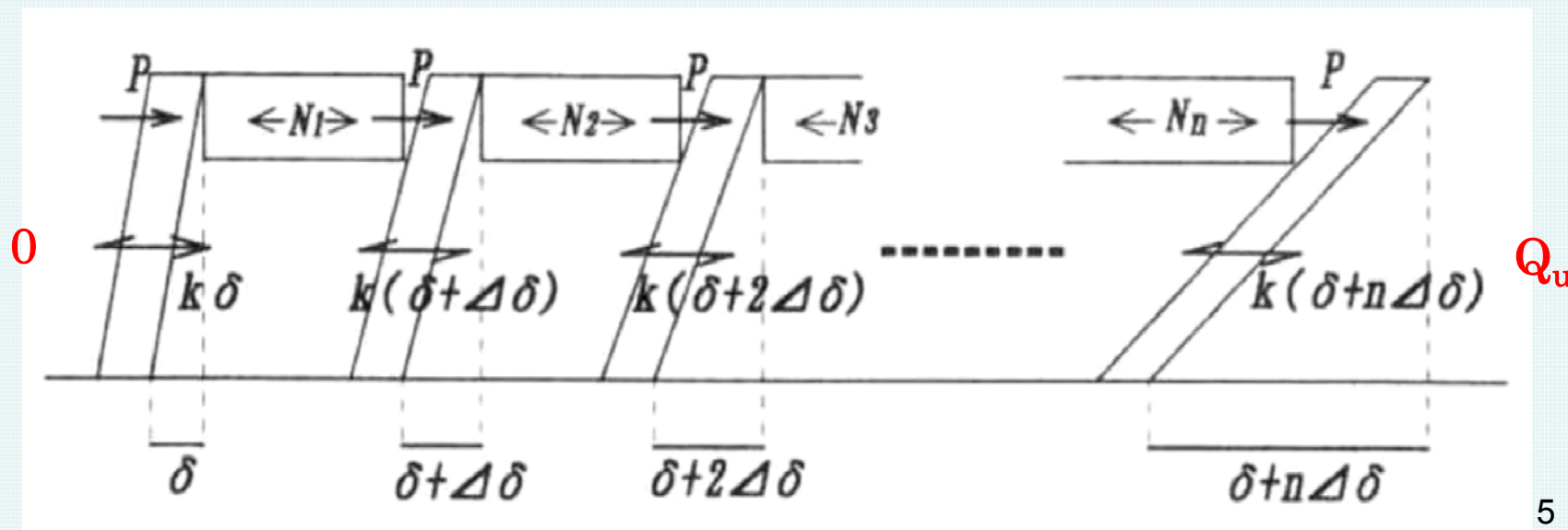
テーマ: ①破壊モード推定の高精度化 / ②せん断柱部材を含む部分架構の水平・鉛直抵抗機構の解明 / ③耐力劣化部材を含む架構の非線形解析手法の高度化 / ④構造特性に基づく修復性能評価 / ⑤平面的不整形建物の剛床仮定成立限界 / ⑥WPC壁部材の耐震性能評価

①破壊モード推定の高精度化(推定vs. 実現象)⇒(Ⅰ)(Ⅱ)

- ✓ 部材, (部分・全体)架構の破壊モードの不整合の解消
- ✓ 梁の拘束による軸力作用, 腰壁やスラブの梁に対する影響程度などを考慮したパラメトリックスタディ

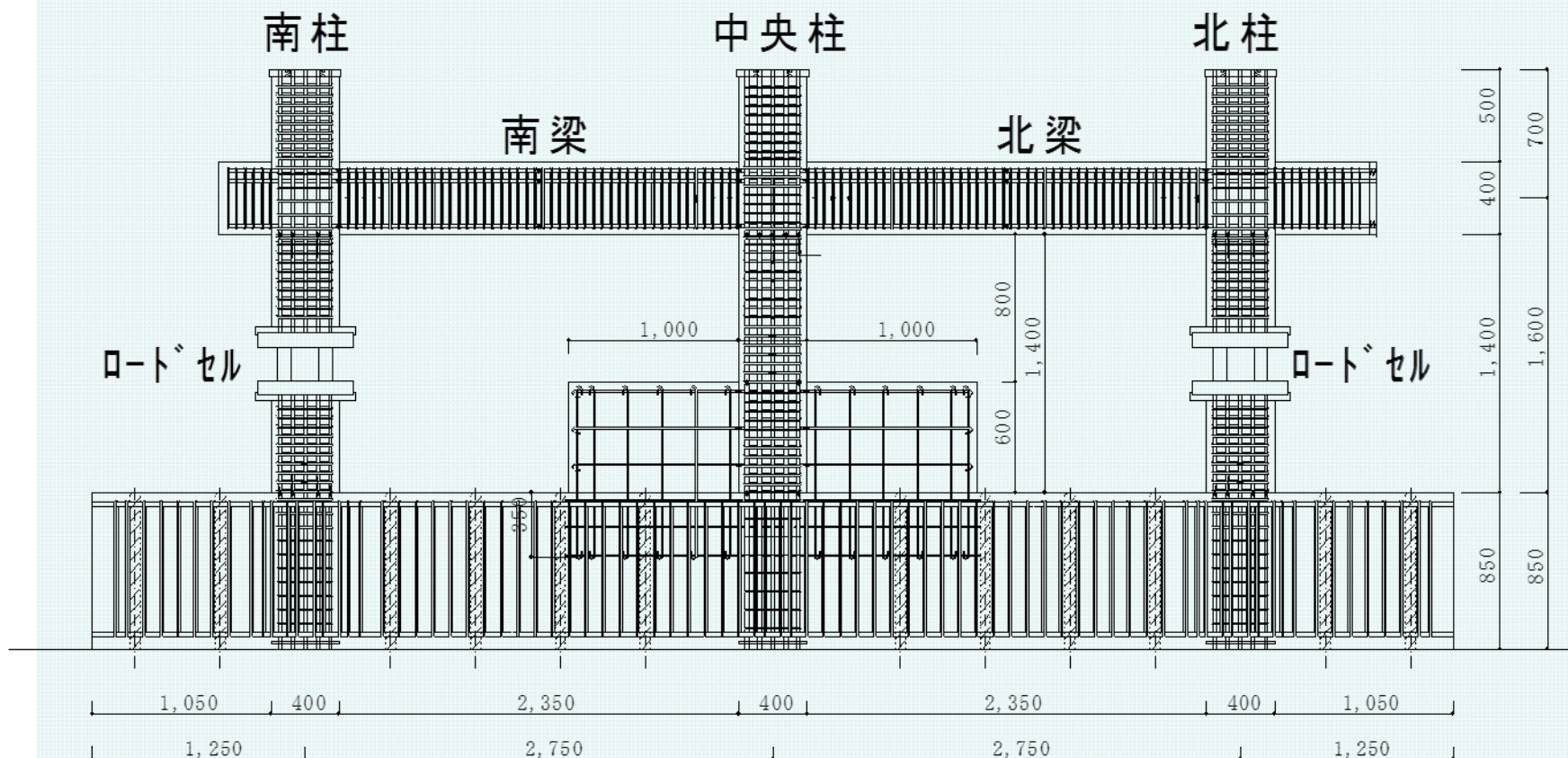
⇒3次元立体静的解析において, スラブ全幅有効として梁耐力を算定したモデルにより実被害が再現可能であることを確認.

⇒梁曲げ耐力の上昇に寄与する梁軸力の推定手法を提案した.

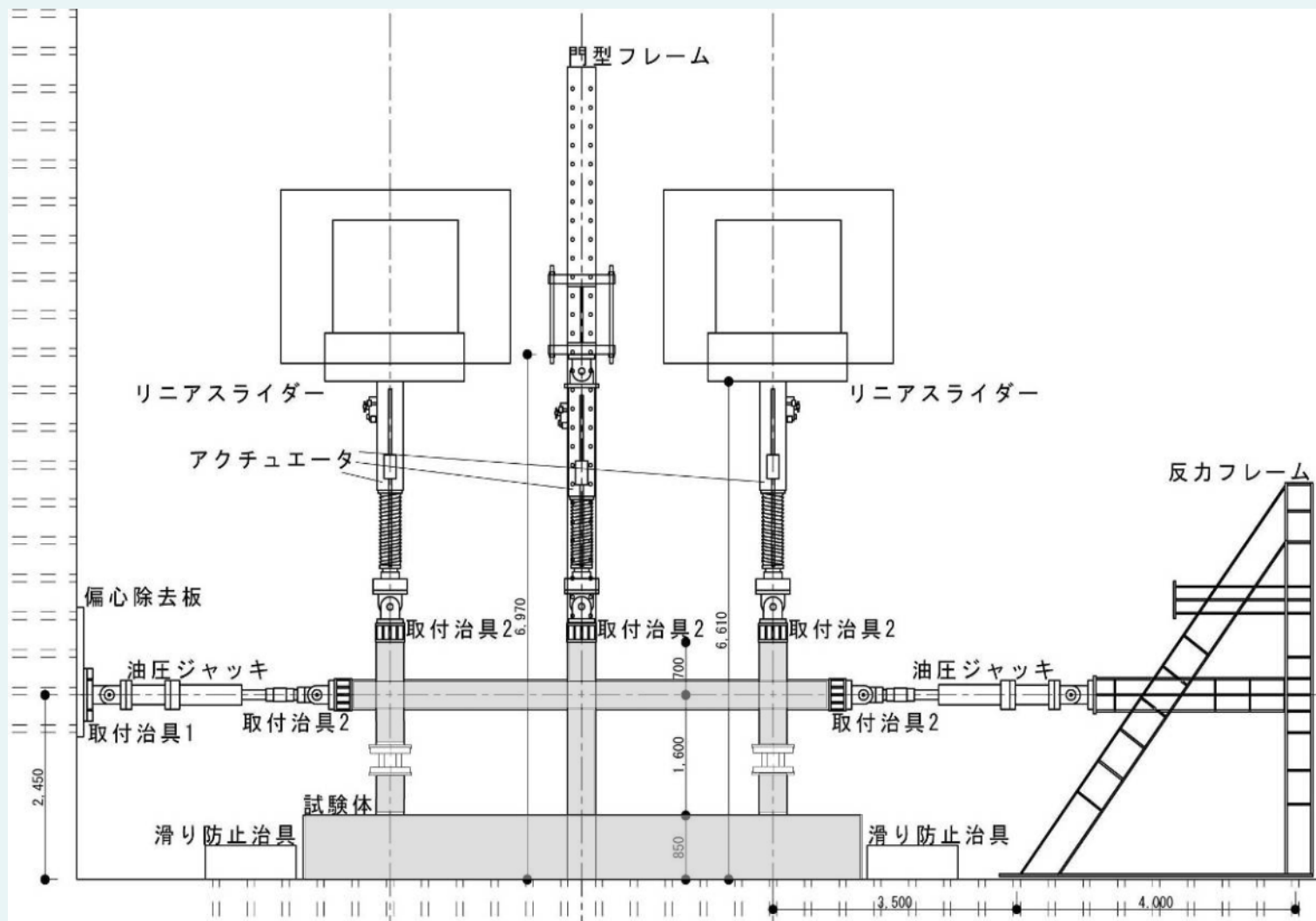


②せん断柱部材を含む部分架構の載荷実験⇒(Ⅰ)(Ⅱ)

- ✓せん断柱部材を含む部分架構の水平および鉛直抵抗機構の解明を目的とした載荷実験を実施(2010年度)



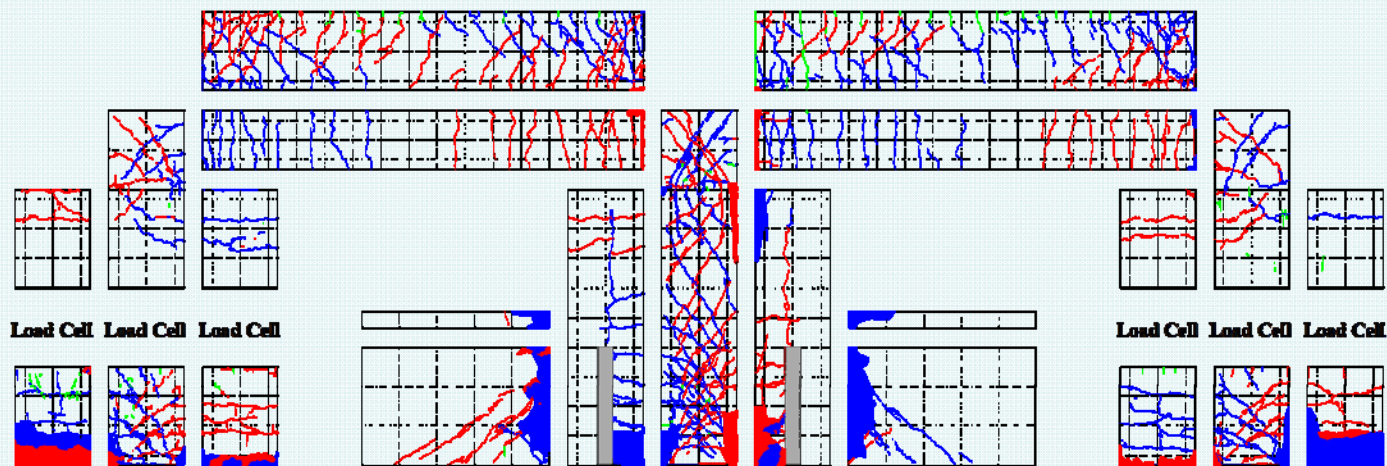
②せん断柱部材を含む部分架構の載荷実験⇒(Ⅰ)(Ⅱ)



加力装置東立面図

テーマと研究成果

②せん断柱部材を含む部分架構の載荷実験⇒(Ⅰ)(Ⅱ)



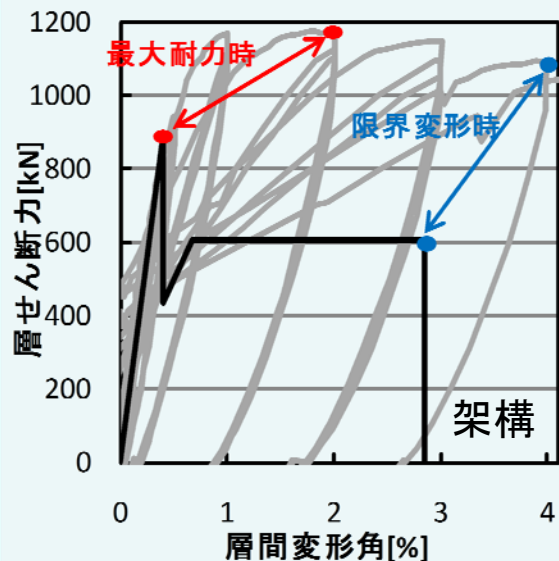
1/33rad.除荷時



押し切り1/12rad.

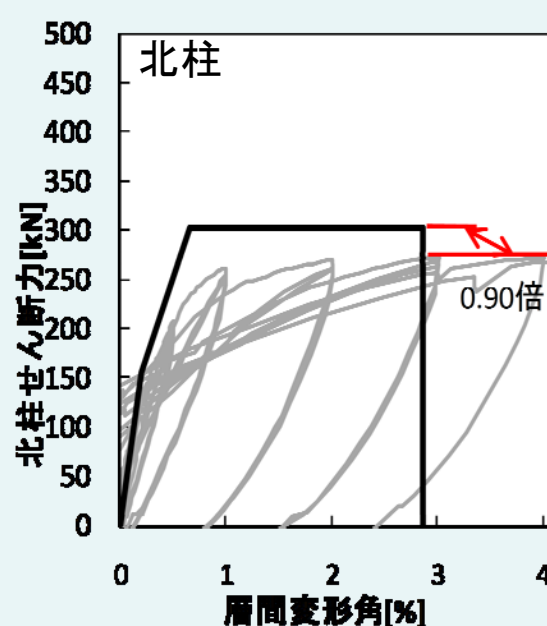
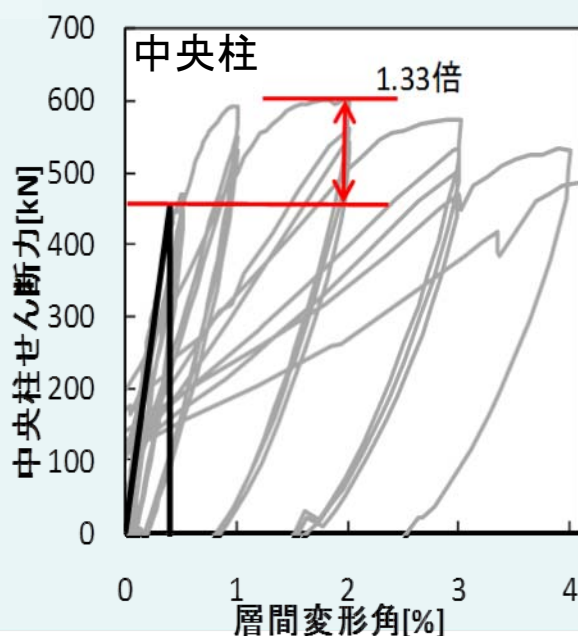
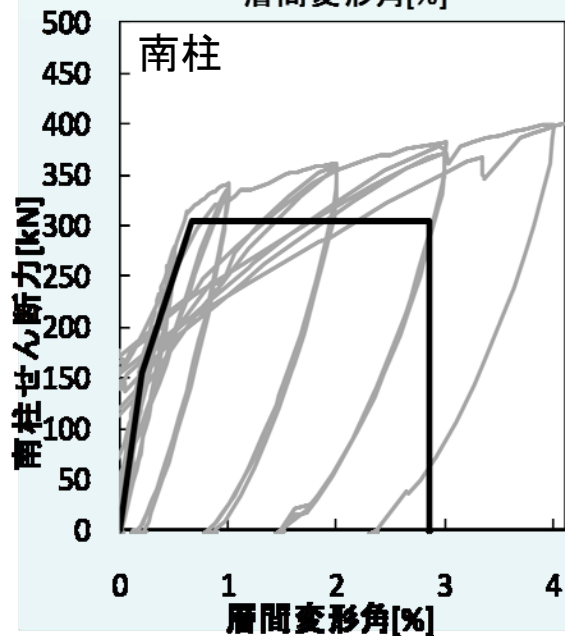
テーマと研究成果

②せん断柱部材を含む部分架構の载荷実験⇒(I)(II)



耐震診断基準と実験結果の比較

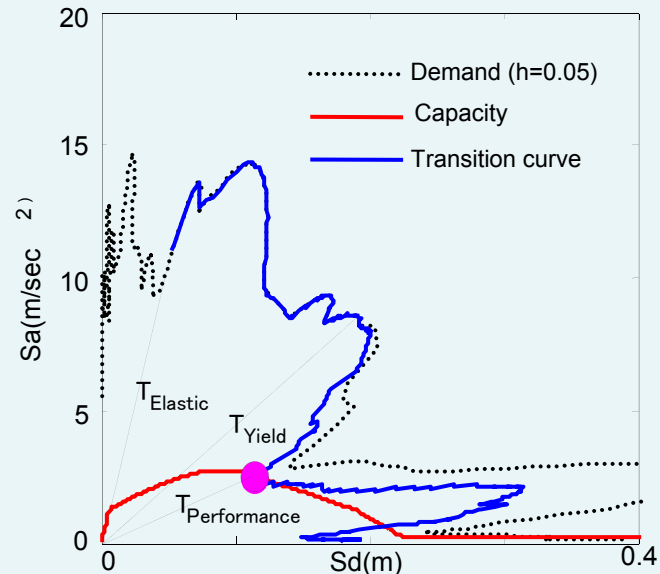
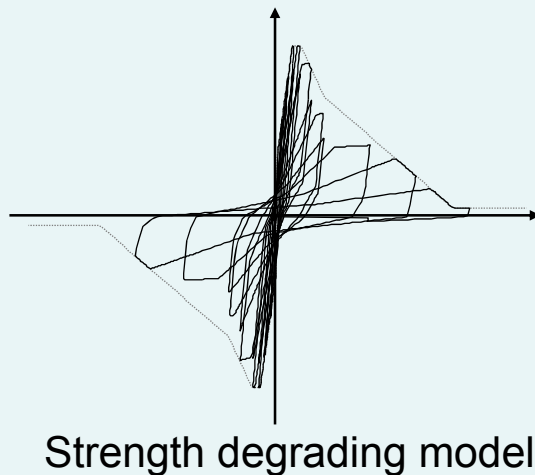
		実験値	計算値
最大耐力時	強度指標C	0.64	0.48
	靱性指標F	2.60	1.00
	構造耐震指標Is	1.65	0.48
限界変形時	強度指標C	0.59	0.33
	靱性指標F	3.40	3.02
	構造耐震指標Is	2.00	0.99



③耐力劣化部材を含む架構の非線形解析手法の高度化⇒(Ⅱ)

✓ 柱および梁の耐力劣化の有無をパラメータとして、耐力劣化型履歴モデルの構築，等価1自由度系縮約手法および静的漸増解析手法による耐力曲線の作成，等価減衰評価

⇒ 耐力劣化モデルの開発，耐力劣化部材を含む架構の等価1自由度系への縮約手法，縮約時における外力分布の影響を明らかにし，さらに等価減衰評価法，スペクトル低減係数評価のためのサブプログラム(アルゴリズム)を開発した。

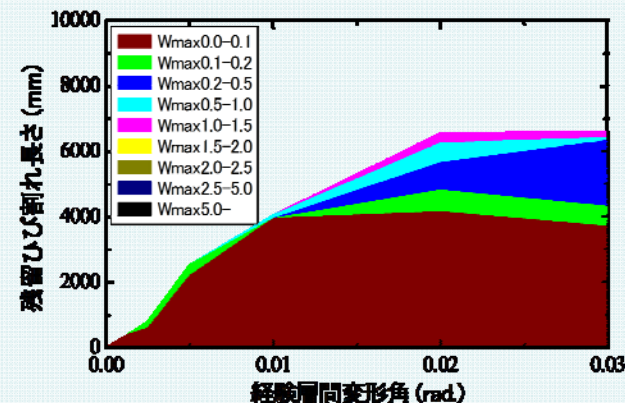


④構造特性に基づく修復性能⇒ (Ⅱ)

- ✓ 実験結果等を参考に、各損傷状態において適用される修復工法の種類と、これら補修工法における必要労務量と修復単位費用の設定および、これらに基づき算出される修復費用および修復時間に関して検討

⇒ 必要労務量と修復単位費用に関する検討は、修復性能指標 (ID指標) 構築のための基礎資料として利用可能

損傷度	損傷状態	修復工法とその工事量
I	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ (ひび割れ幅0.2mm未満)	○シール工法 (0.46 m/m ²)
II	肉眼でははっきり見える程度のひび割れ (ひび割れ幅0.2~1.0mm程度)	○シール工法 (2.61 m/m ²) ○手動式エポキシ樹脂注入工法 (1.02 m/m ²)
III	比較のおおきなひび割れ (ひび割れ幅1.0~2.0mm程度) コンクリートが極わずかに剥落	○シール工法 (2.25 m/m ²) ○手動式エポキシ樹脂注入工法 (1.43 m/m ²) ○Uカット可とう性エポキシ樹脂充填工法 +自動式低圧樹脂注入工法 (0.29 m/m ²)
IV	大きなひび割れ (ひび割れ幅2.0~5.0mm程度) コンクリートの剥落も多い	○シール工法 (2.68 m/m ²) ○手動式エポキシ樹脂注入工法 (2.08 m/m ²) ○Uカット可とう性エポキシ樹脂充填工法 +自動式低圧樹脂注入工法 (0.97 m/m ²) ○RCパッチング (0.004 m ² /m ²)
V	ひび割れ幅5.0mm以上 内部コンクリートも崩れ落ちて いる	全撤去 コンクリート打ち直し



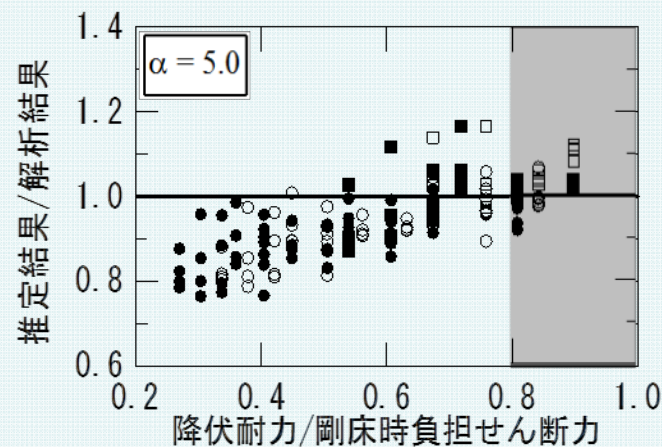
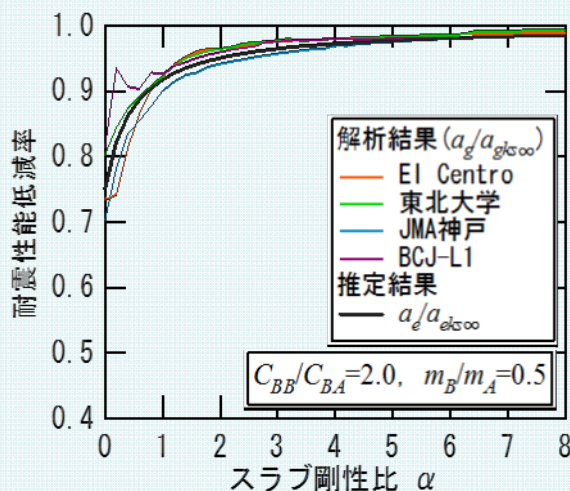
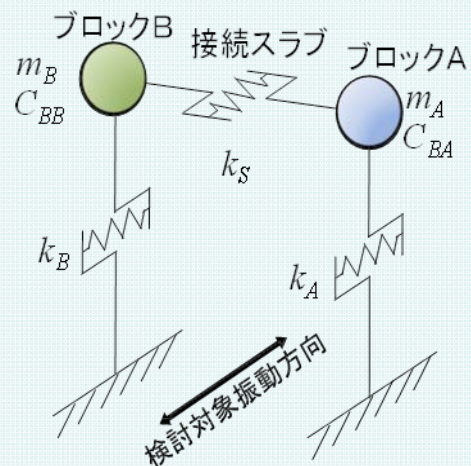
損傷度	労務量 (人・日)	修復費用
I	0.13	0.3
II	2.64	5.9
III	4.14	9.9
IV	7.69	19.1
V	23.76	38.7

⑤ 平面的不整形建物の剛床仮定成立限界⇒ (I)

✓ 平面的不整形建物の主体部～突出部に設けた接続スラブの剛性・強度が建物全体の並進振動性状に与える影響を検討

⇒ 「接続スラブが剛床時の耐震性能」に対する「非剛床時の耐震性能」の比率を耐震性能低減率として定義し、これを静的な力の釣合いに基づき簡便に推定する手法(推定式)を提案するとともにその適用限界を明らかにした。

⇒ 一体として(剛床仮定して)評価した診断結果に耐震性能低減率を乗じることで構造耐震性能が評価可能

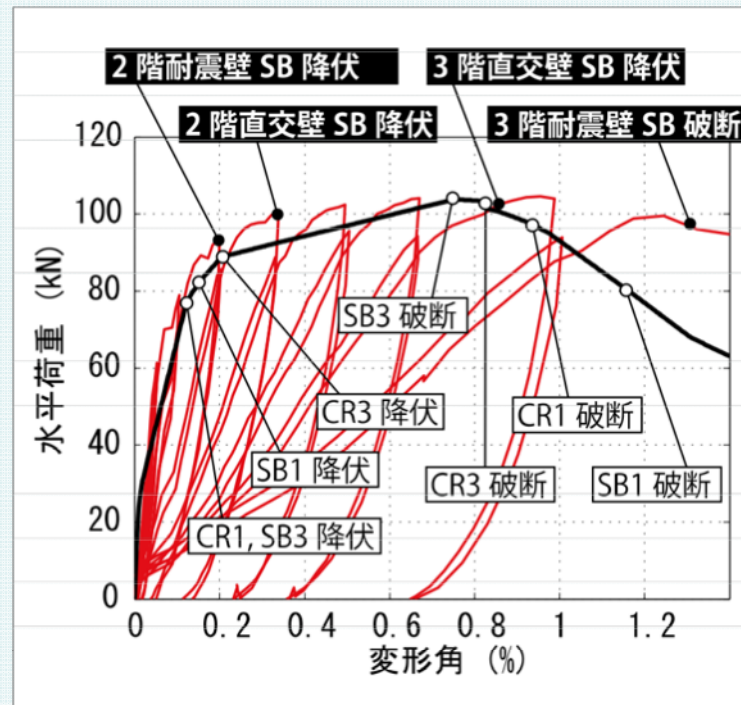
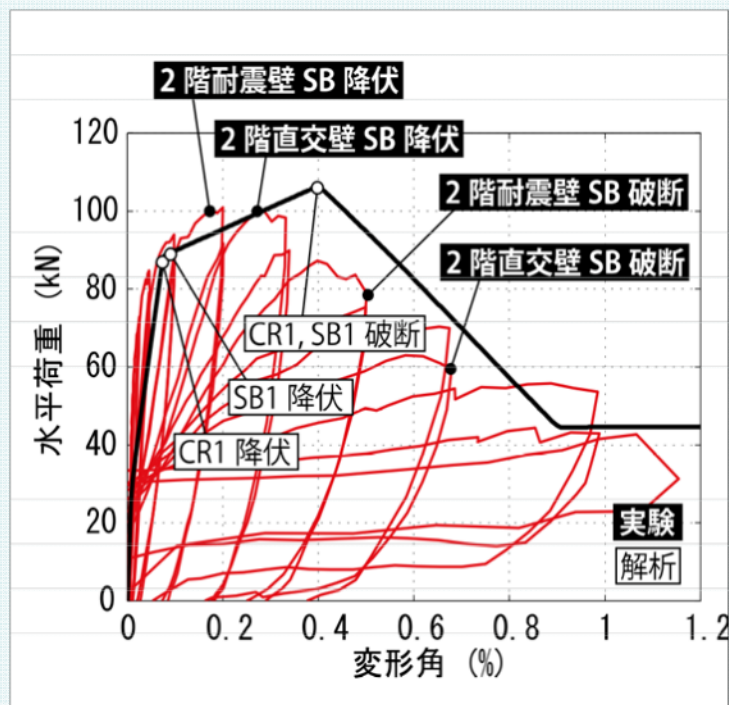


⑥WPC壁部材の耐震性能評価⇒ (I)

✓ WPC耐震壁の静的載荷実験結果に基づき破壊メカニズムと耐震性能の評価を検討

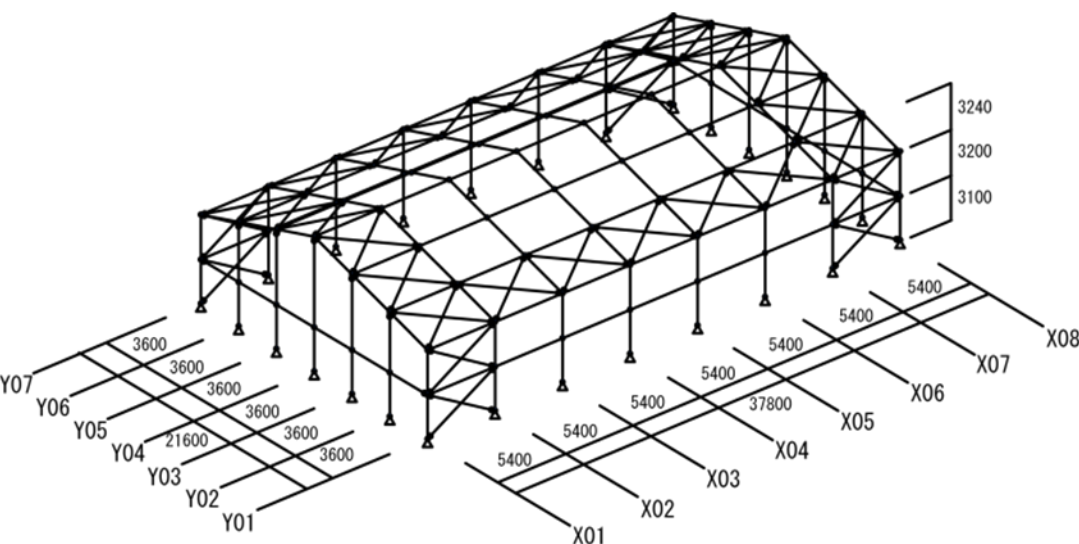
⇒ 1/2スケールモデルの耐震実験結果を参考に、弾塑性解析モデルを作成し、無開口試験体(下図左)および有開口試験体(同右)の実験時挙動を追跡した。

⇒ 既存+開口新設改修架構の適切な評価手法開発⇒自由度↑



鉄骨造体育館に対する三次元非線形時刻歴応答解析による診断法の検討

基本モデル(S1タイプ)の設定



学校施設の耐震補強マニュアル(S造屋内運動場編)4)第5章、設計例1(Sタイプ)に基づく

三次元非線形時刻歴応答解析・三次元静的弾塑性解析、簡易モデルによる応答解析により

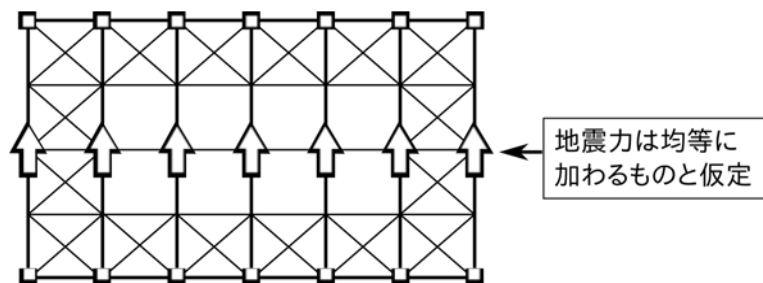
1. 地震時に鉄骨造体育館の屋根面ブレースに作用する最大軸力
2. 体育館屋根面の荷重伝達性能
3. ブレースの弾塑性挙動およびブレース接合部の破断が応答に及ぼす影響などを検討

→

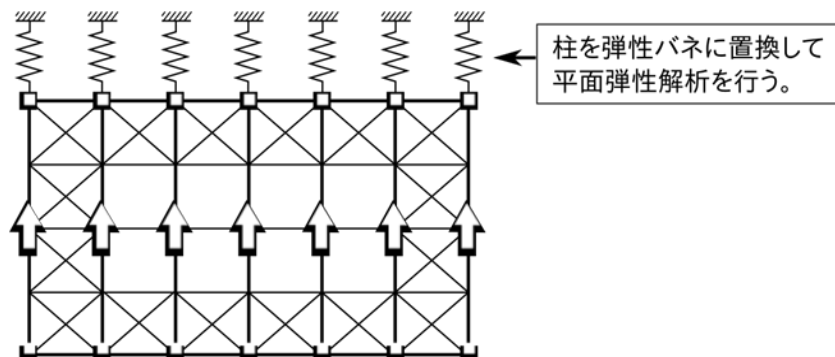
具体的には、「剛床仮定の成立条件」と「ゾーニングによる耐震診断の妥当性」が主な検討項目

地震時に鉄骨造体育館の屋根面ブレースに作用する最大軸力

- 屋内運動場等の耐震性能診断基準(以下、「屋耐基準」)に3通りの方法が提示されている



外力の仮定



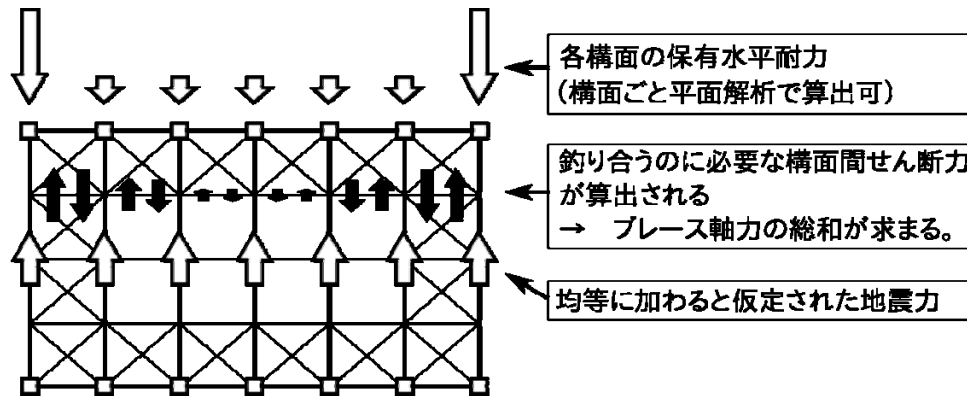
柱梁を含めてすべての部材が弾性であることを仮定しているため、この方法によって柱梁が大きく塑性変形を生じた後の挙動を把握することは原理的にできない。

→

(1)の方法は検討しない

(1) 弾性解析による方法

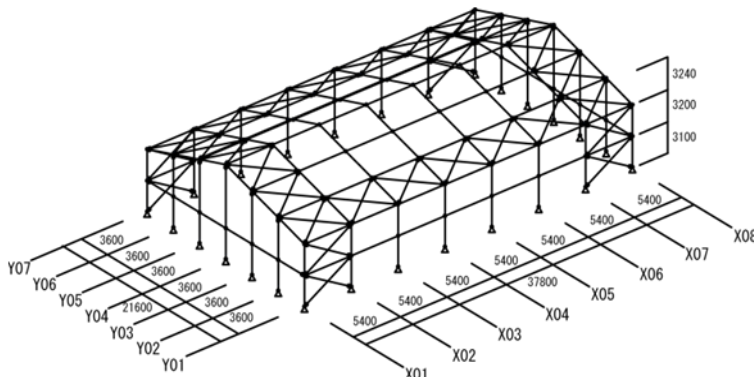
地震時に鉄骨造体育館の屋根面ブレースに作用する最大軸力



(2) 保有水平耐力の算定結果に基づく方法

「各構面にかかる水平力」と「保有水平耐力時構面せん断力」との差分を計算することにより、構面間ごとのせん断力を求め、これを構面間のブレース数で除することによって、ブレース軸力を計算する方法。

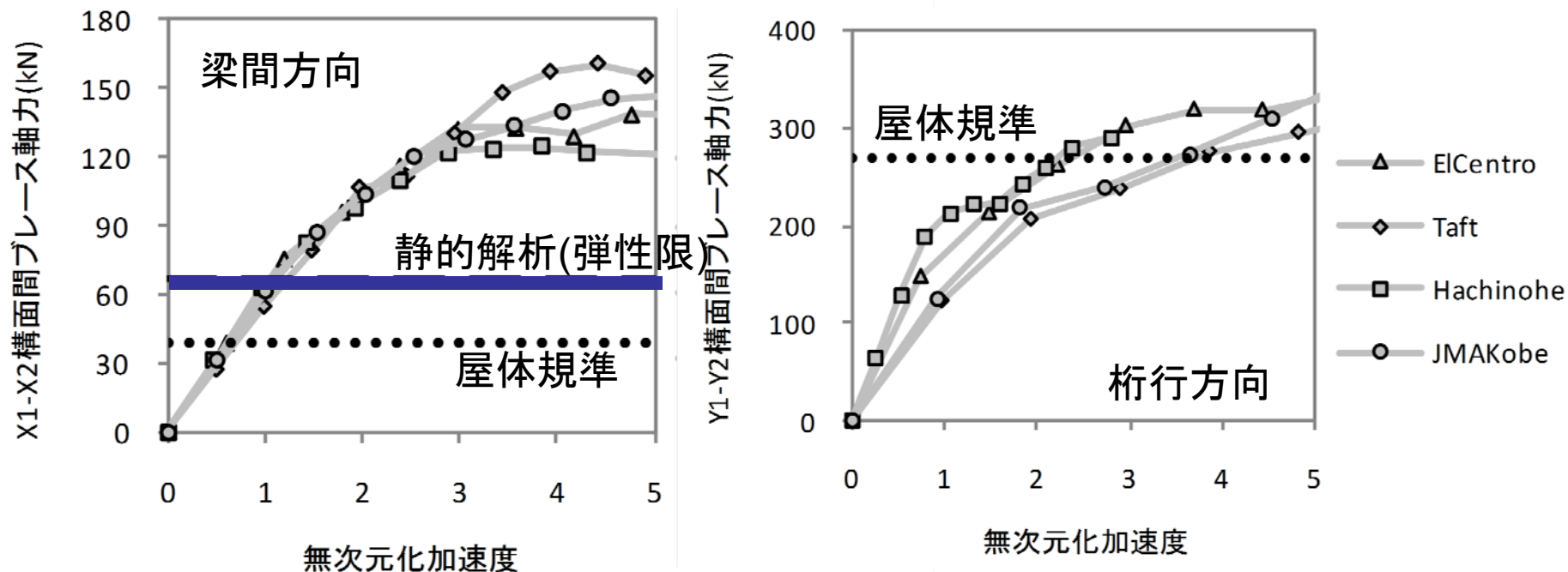
構面間に存在するブレース軸力がすべて等しいとの仮定に基づいていることに注意が必要である。



(3) 静的弾塑性解析による方法

(2),(3)による結果と、三次元非線形時刻歴応答解析の結果を比較し、屋根面ブレースによる応力伝達条件を検討

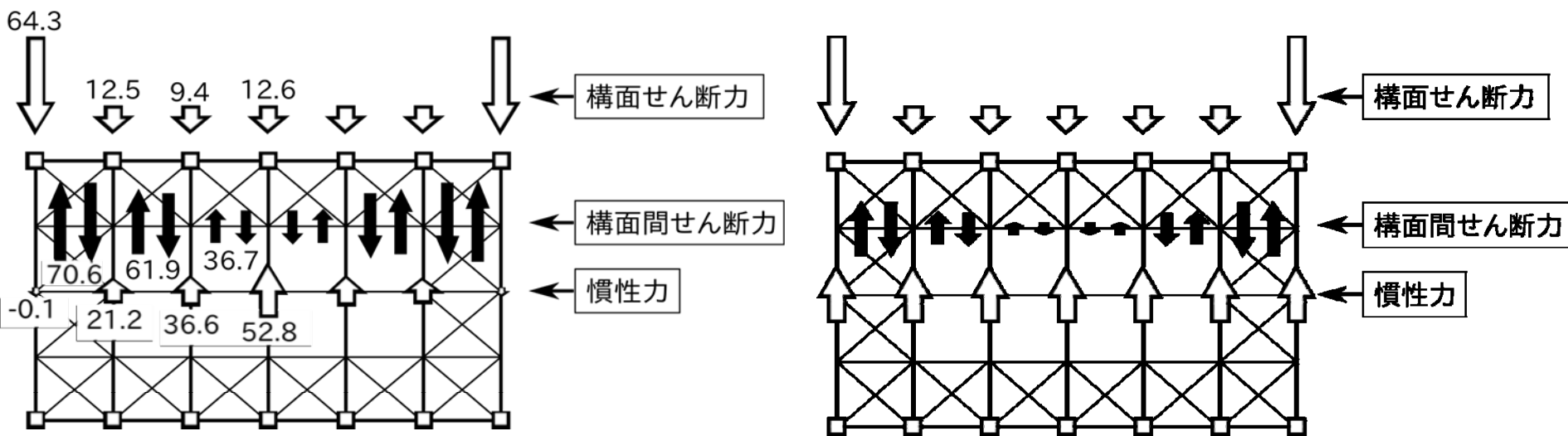
地震時に鉄骨造体育館の屋根面ブレースに作用する最大軸力



桁行方向入力時は中間架構が存在しないため、理論と実際がほぼ整合するが、梁間方向では中間架構がある程度のせん断力を負担し、かつ骨組が降伏した後は理論通りの地震力分布となっていないため、実際にブレースに作用する軸力は大きくなる可能性がある。

(ブレースは弾性を仮定して計算)

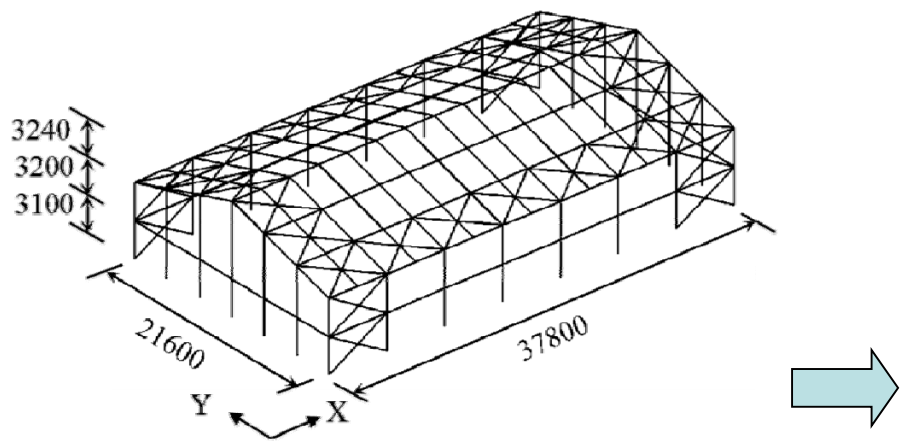
地震時に鉄骨造体育館の屋根面ブレースに作用する最大軸力



入力地震動最大加速度が900galの場合の桁行き方向で、ブレース軸力が最大を迎えた瞬間における、力の釣り合い。

応答値では水平慣性力は妻面構面で小さく、中間構面で大きくなっている。

体育館屋根面の荷重伝達性能



- ・パラメータ:
- 屋根面ブレースの断面と配置
- ・桁行方向にレベル2相当の地震波を入力

表3.5ー屋根面に作用する構面間せん断力

モデル	3-2-2	Q_{ryi}	BCJ-L2	Eln	八戸	神戸
a - φ16	83.6	85.4	85.4	85.4	85.4	85.4
			0.82	0.44	0.38	0.81
a - φ19	83.5	120	120	117	99	109
			0.30	0.26	0.21	0.26
a - L65	82.9	323	114	111	79	117
b - φ16	139	212	176	182	132	181
			0.17	0.16		0.19
b - φ19	139	299	187	183	138	182
						0.14
b - L65	139	795	173	167	164	188
c - φ19	139	422	193	181	149	195

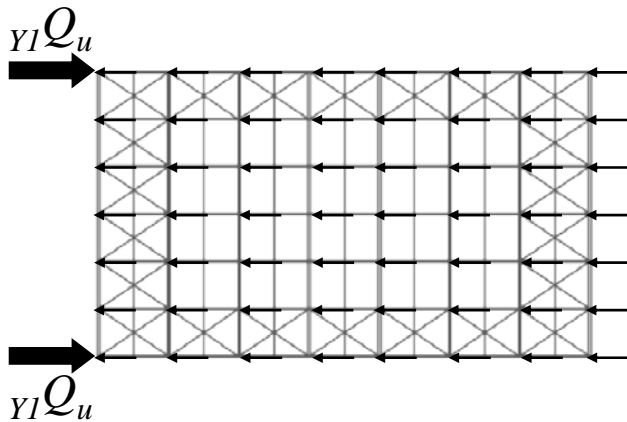
*単位kN **網掛けは構面間で全ブレースが降伏

構面間の全ブレースが降伏しなければブレースの伸び量は比較的小さく抑えられる。

全ブレースの降伏耐力総和が構面間に作用するせん断力を上回るように設計することが有効

構面間に作用するせん断力の推定精度

屋体基準：保有水平耐力の算定結果に基づく方法



構面間せん断力に推定誤差が生じる要因

- (1) 鉛直構面の保有水平耐力の推定誤差
- (2) 水平震度分布の仮定
(水平震度一様が妥当でない場合)

鉛直構面の保有水平耐力 $Y_1 Q_u$ について

- ・一定値とする場合
- ・ケース毎に地震応答解析結果を参照して誤差を排除した場合

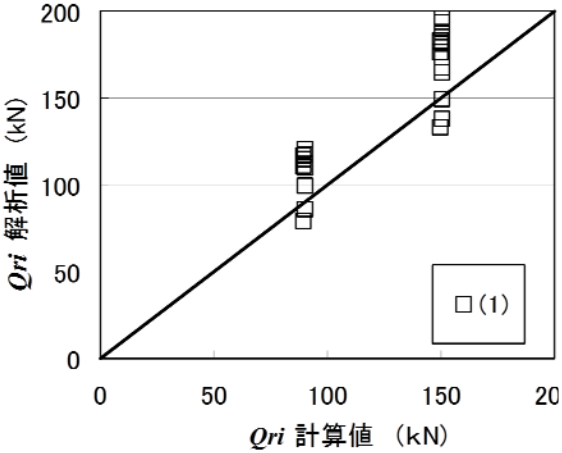
水平震度分布について

- ・水平震度一様と仮定した場合
- ・屋根頂部～軒にかけて水平震度を变化させる場合

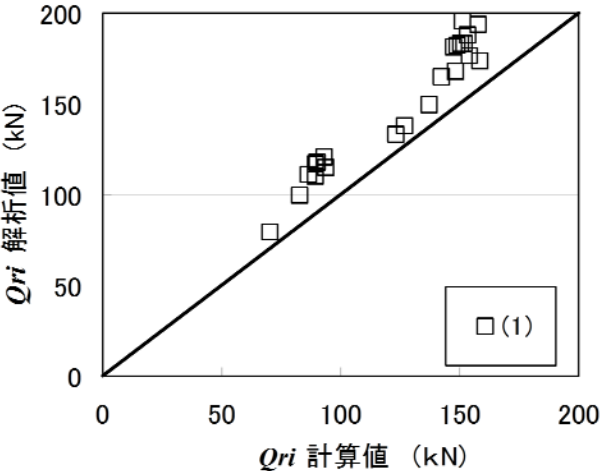
各ケースについて
構面間せん断力を計算し、
地震応答解析による
構面間せん断力と比較

体育館屋根面の荷重伝達性能

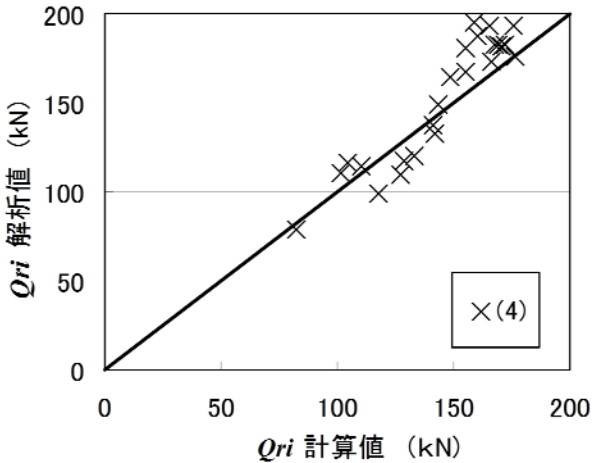
構面間せん断力解析値と推定値の比較



$\gamma_1 Q_U = 200 \text{ kN}$
水平震度一様

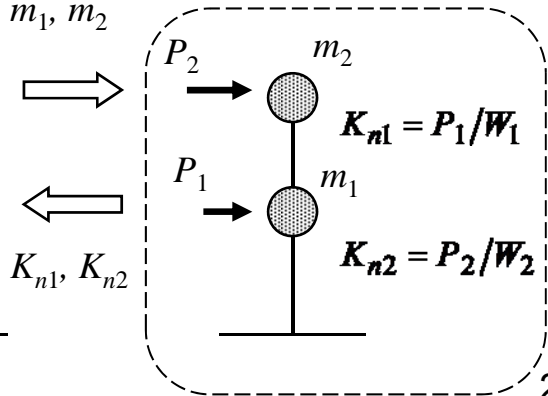
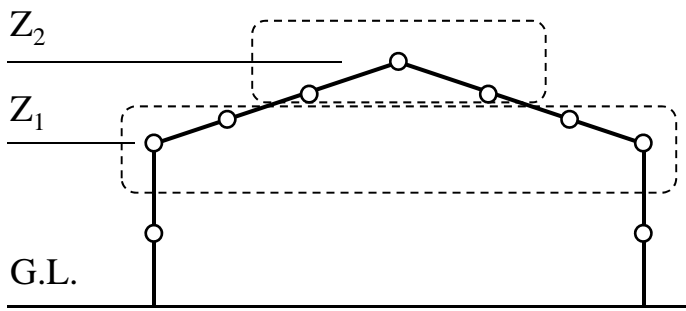


応答解析から求めた $\gamma_1 Q_U$
水平震度一様



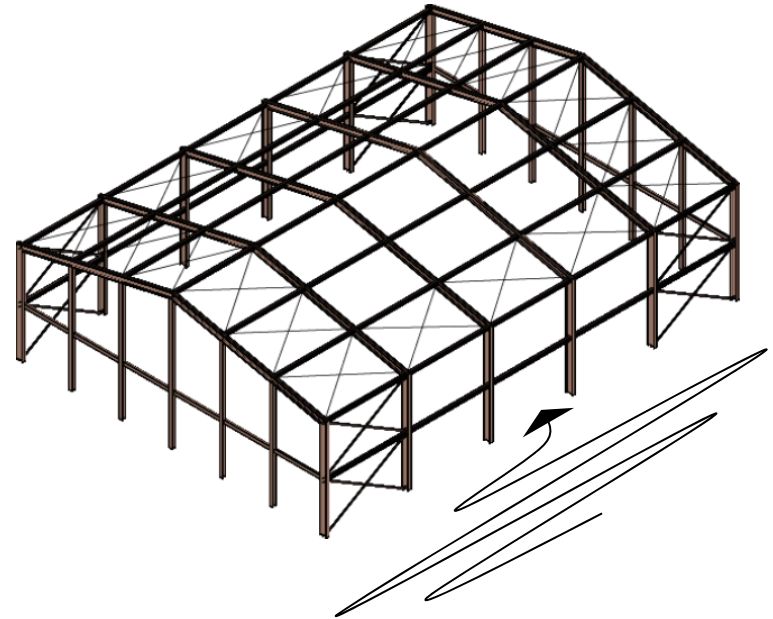
応答解析から求めた $\gamma_1 Q_U$
固有値解析による水平震度分布

構面間せん断力の推定精度向上

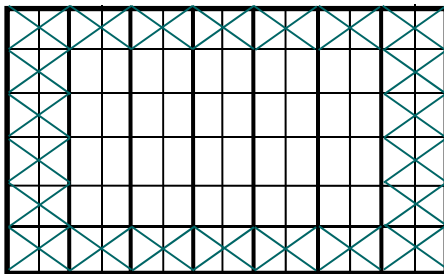


ブレースの弾塑性挙動および接合部の破断が応答に及ぼす影響

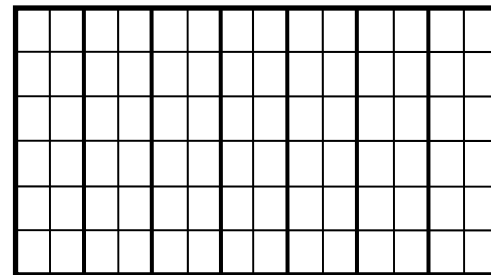
3次元弾塑性解析および簡易解析により、水平ブレースの弾塑性挙動や接合部を起点とした破断を考慮した解析を行い、構面毎の挙動で耐震性能を検討することが妥当であるかを調べる。



パラメータ：屋根面の荷重伝達性能
(ブレース断面, ブレース有無)



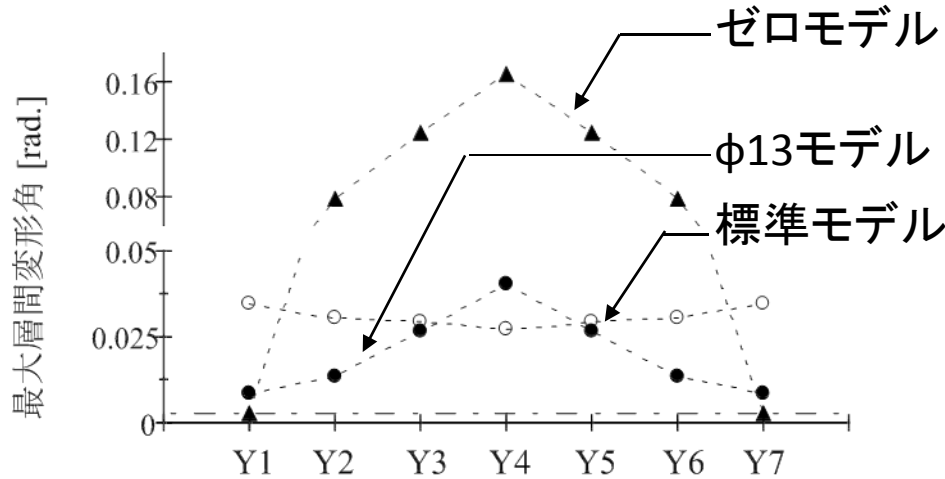
φ19(標準モデル) : 荷重伝達可能
φ13(φ13モデル) : 荷重伝達不可



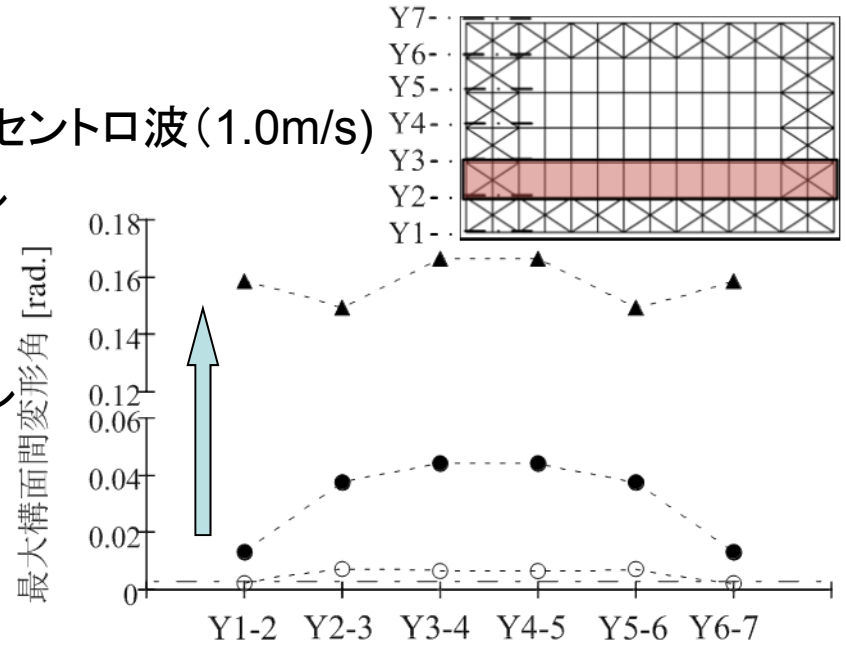
荷重伝達不可

ブレースの弾塑性挙動および接合部の破断が応答に及ぼす影響

最大応答変位 (水平ブレース: 弾塑性) エルセントロ波 (1.0m/s)



(a) 構面応答変位

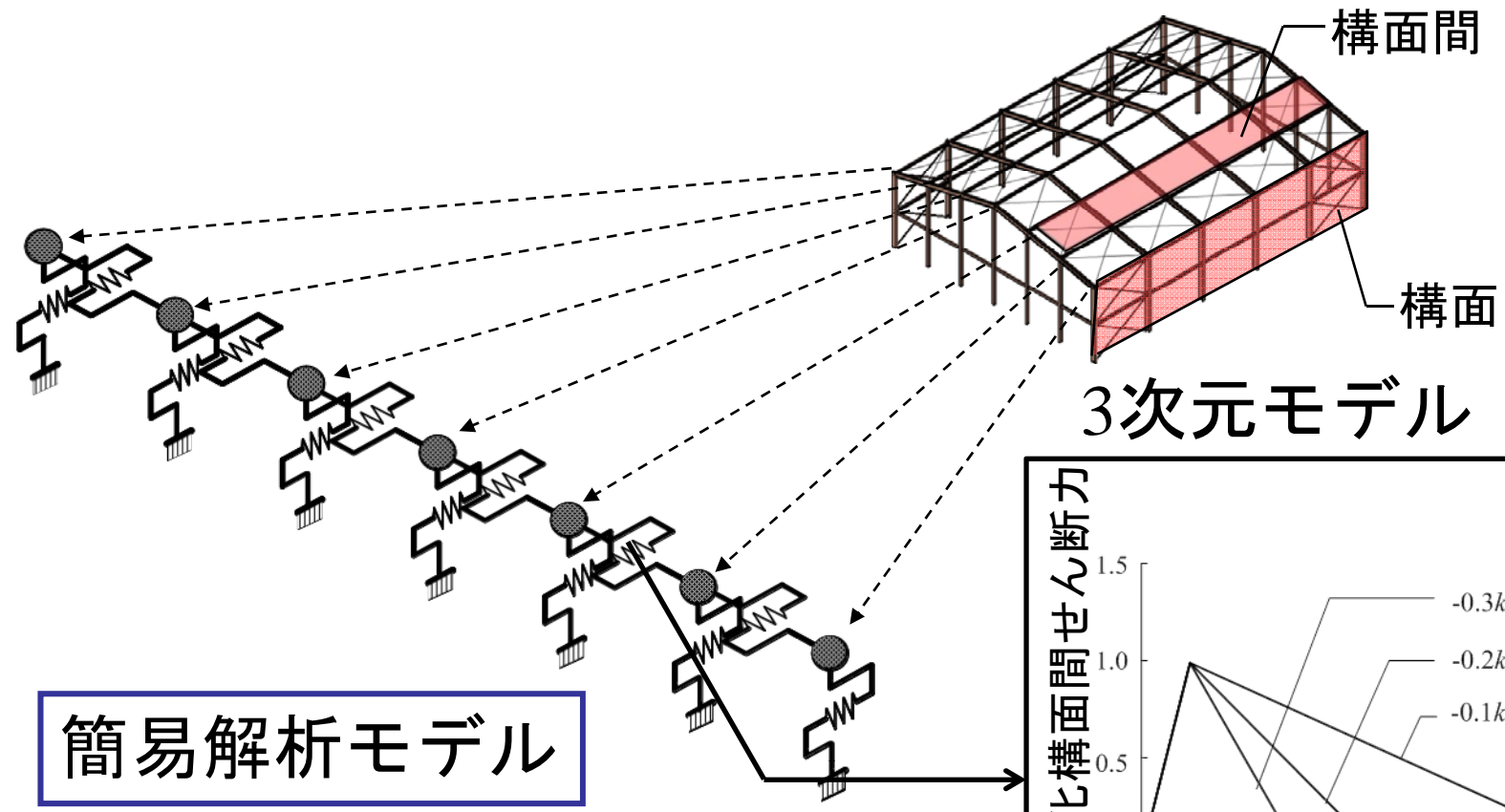


(b) 構面間応答変位

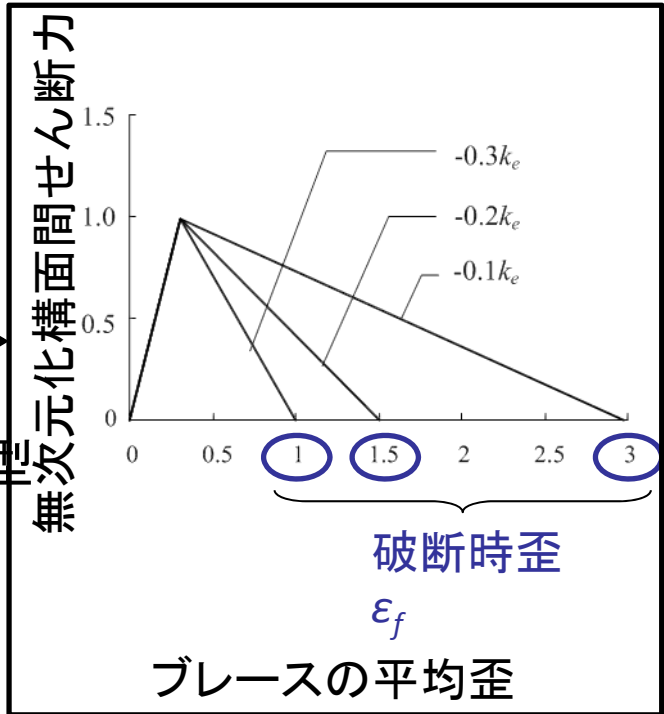
桁行全体応答: 水平ブレースが取り付く場合では最大応答値に
大きな差異が見られない

構面間応答: 荷重伝達性能が悪くなるにつれて応答が増大

ブレースの弾塑性挙動および接合部の破断が応答に及ぼす影響



3次元モデル

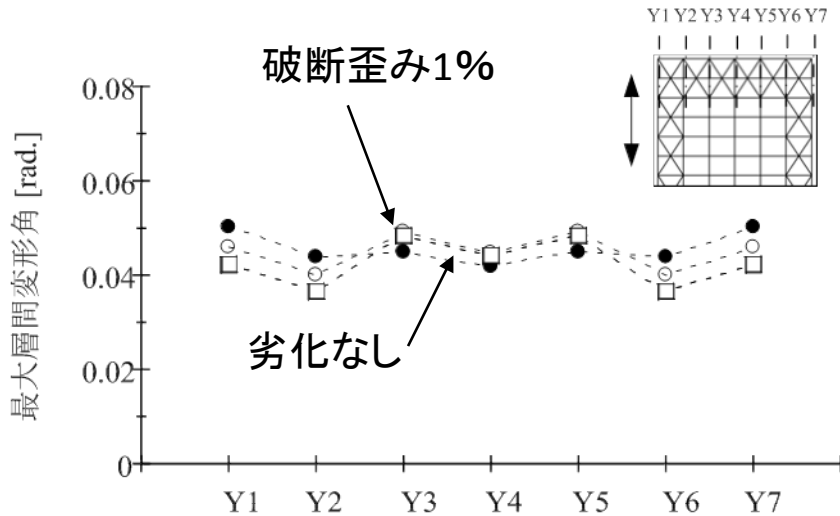


簡易解析モデル

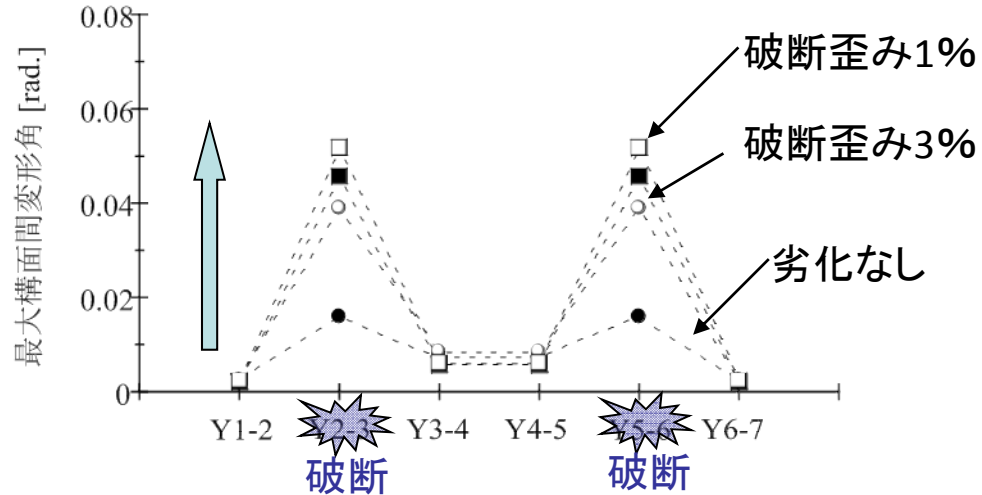
水平ブレース破断: 負の劣化勾配をもつバイリニア型
(履歴則: スリップ型)

ブレースの弾塑性挙動および接合部の破断が応答に及ぼす影響

最大応答変位(水平ブレース破断考慮)標準モデル(エルセントロ波入力時(1.0[m/s]))
 屋根面:荷重伝達可能



(a) 構面応答変位



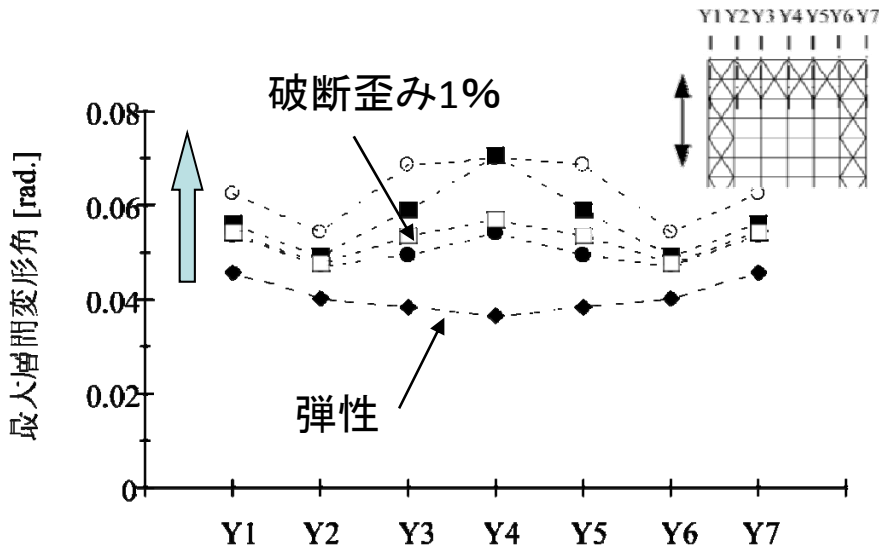
(b) 構面間応答変位

桁行全体応答:水平ブレース破断による影響は小.

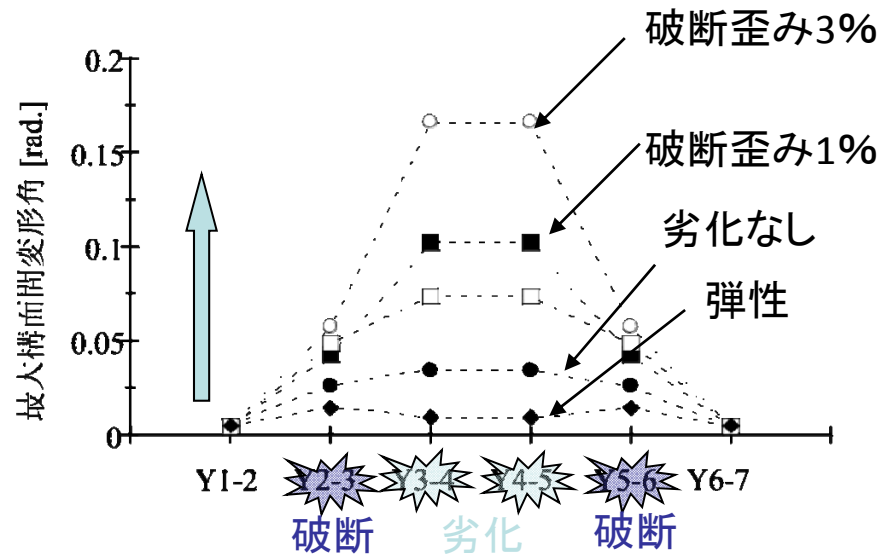
構面間応答:水平ブレース破断によって局所的に応答が増大
 より早期に(脆性的に)破断することで増大する傾向

ブレースの弾塑性挙動および接合部の破断が応答に及ぼす影響

最大応答変位(水平ブレース破断考慮)標準モデル(エルセントロ波入力時(1.0[m/s]))
 屋根面:荷重伝達不可



(a) 構面応答変位

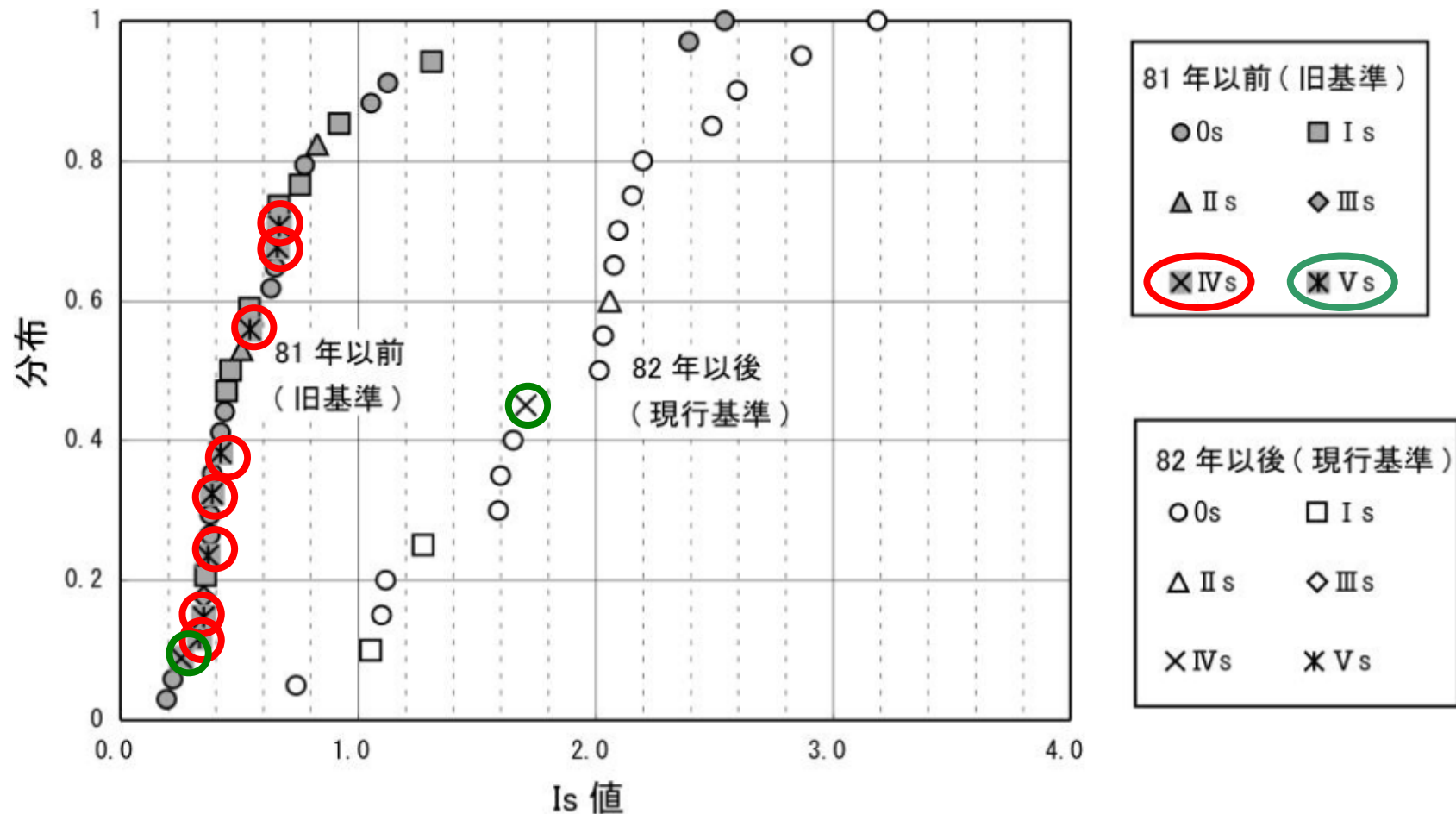


(b) 構面間応答変位

桁行全体応答:水平ブレース破断によって増幅する.

構面間応答:水平ブレース破断あるいは劣化が複数の構面間で生じ全体的に応答が増大

新潟県中越地震で被害調査を行った体育館のIs値と被害状況の対応

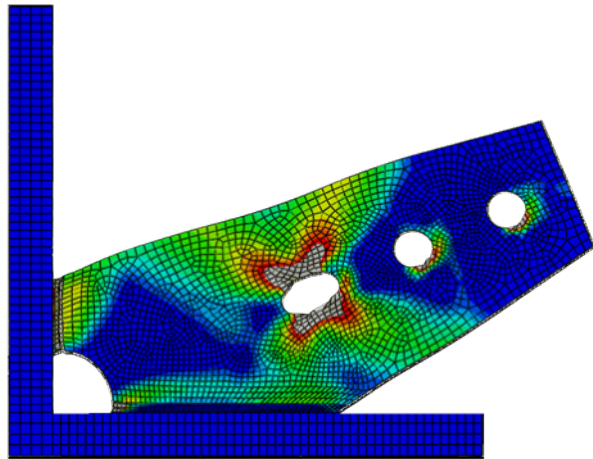


旧基準と現行基準ではIs値の分布に大きな差が有る。

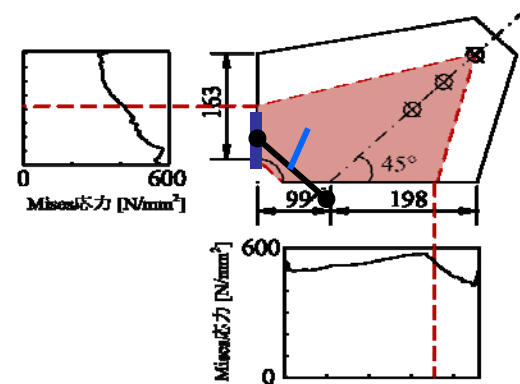
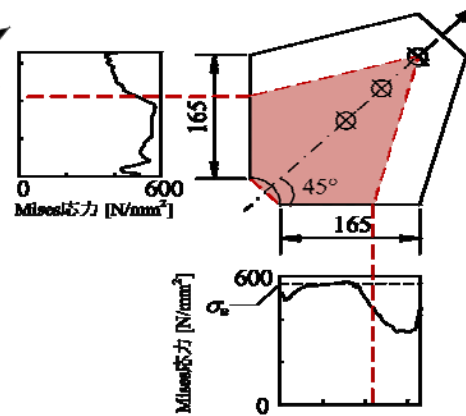
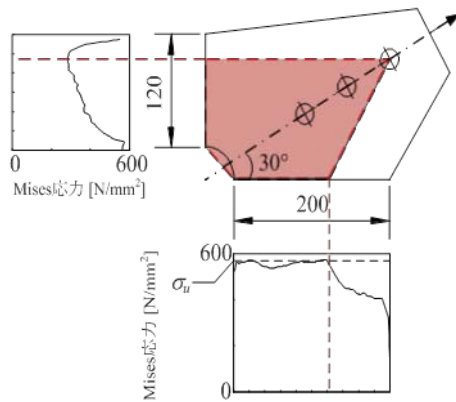
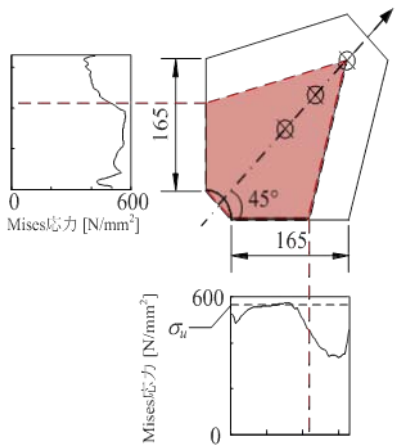
(平均値は旧基準が0.67、現行基準が1.88)

Is値が0.7以下の体育館では、構造被害ランクVsの大きな被害が発生し、0.7以上の体育館ではIIsの被害にとどまっている。

ブレース端接合溶接部の耐力評価

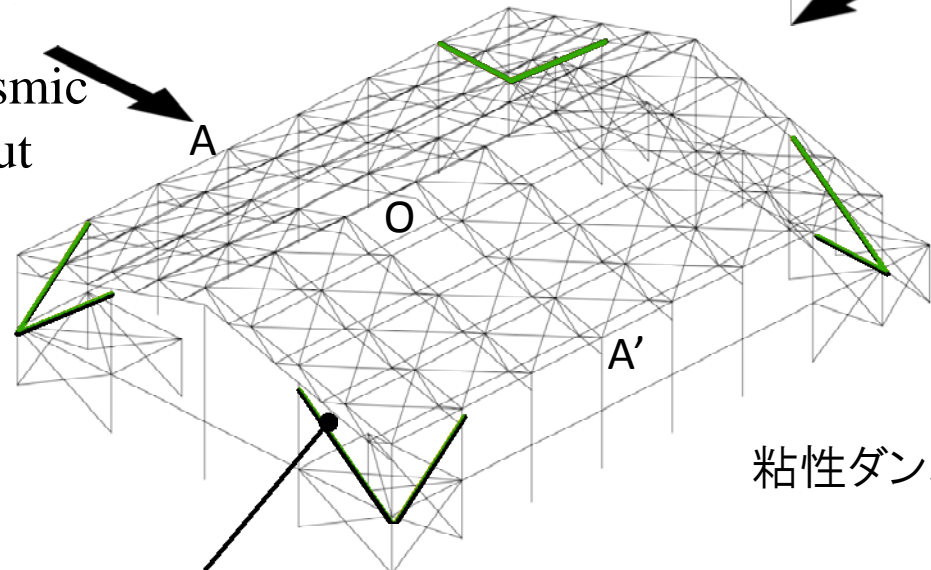


ブレースの取り付け角度
 偏心量をパラメーターに解析
 →
 溶接部耐力評価式を提案



制振補強の可能性の検討

Seismic Input



弾塑性ダンパー:

Y-方向 $K_d/K_f=0.5, 1.0, 2.0$

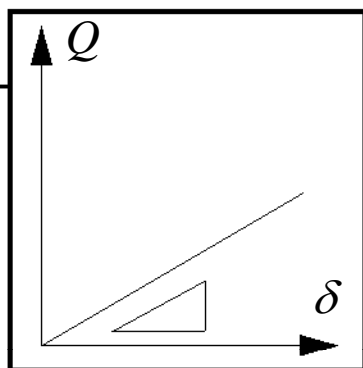
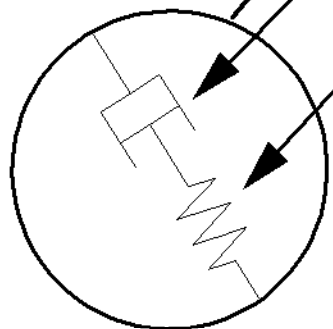
X-方向 $K_d/K_f=10, 20, 30, 50$

降伏変形角 $\theta_{dy}=1/1000 \sim 1/500$

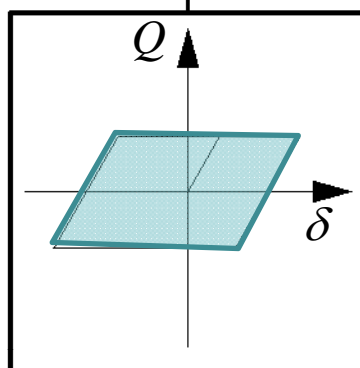
粘性ダンパー:

付加減衰係数 $h_{eq}=0.04, 0.1, 0.2$

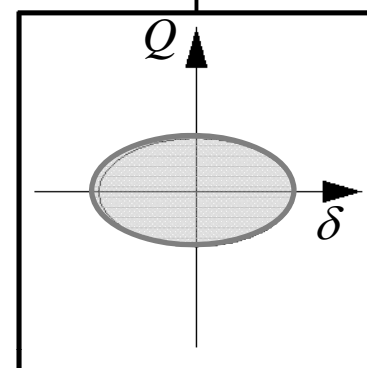
粘性ダンパー



主架構



弾塑性ダンパー

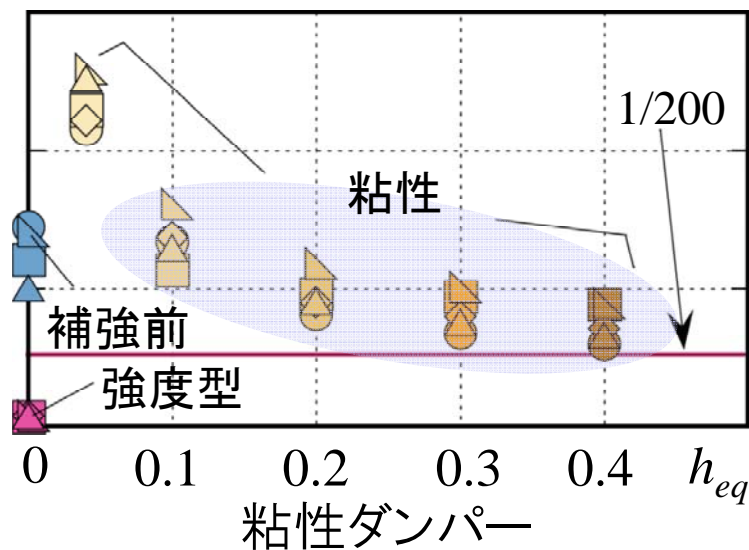
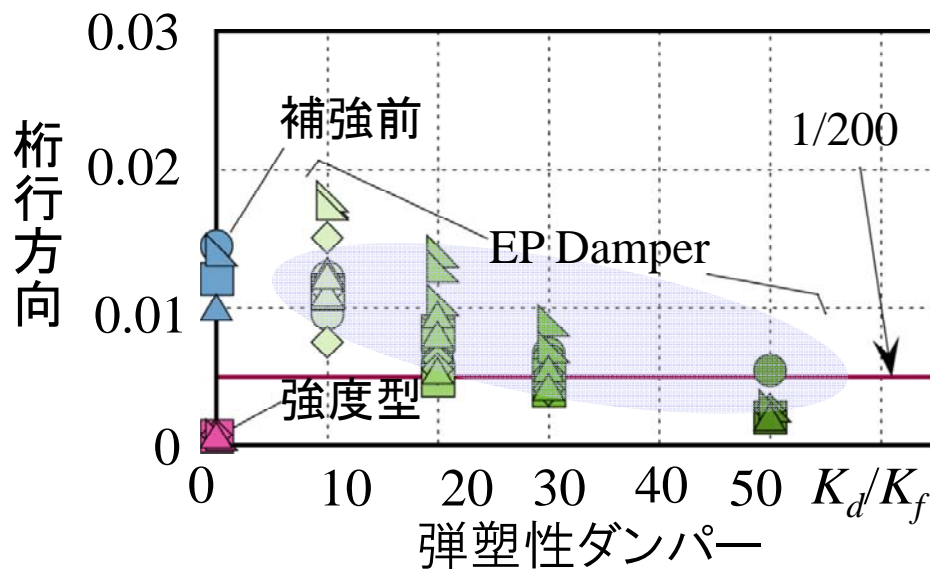
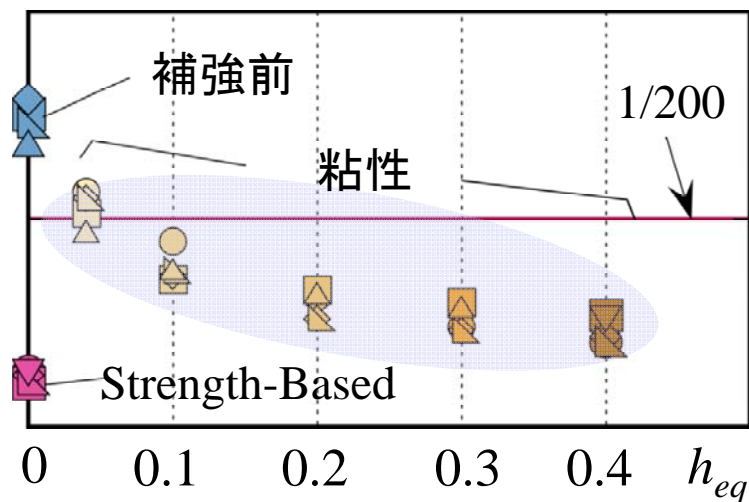
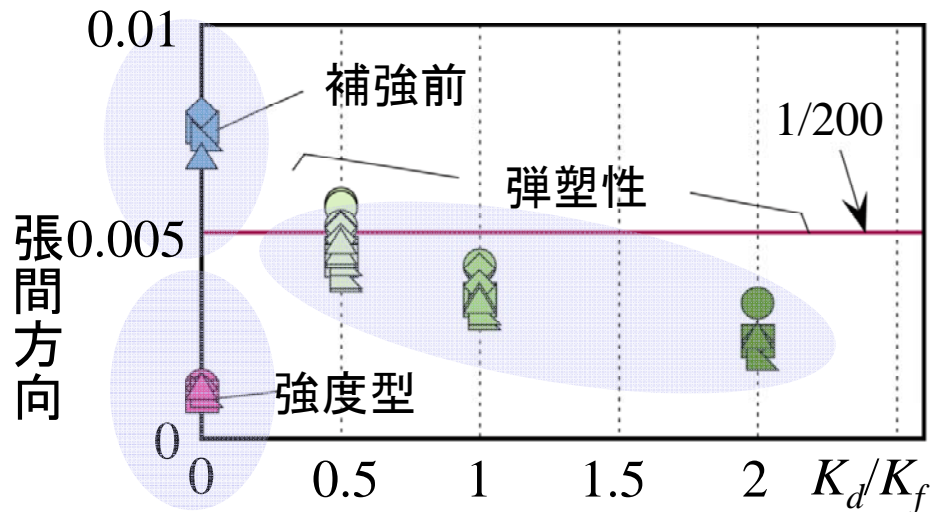


粘性ダンパー

最大層間変形角

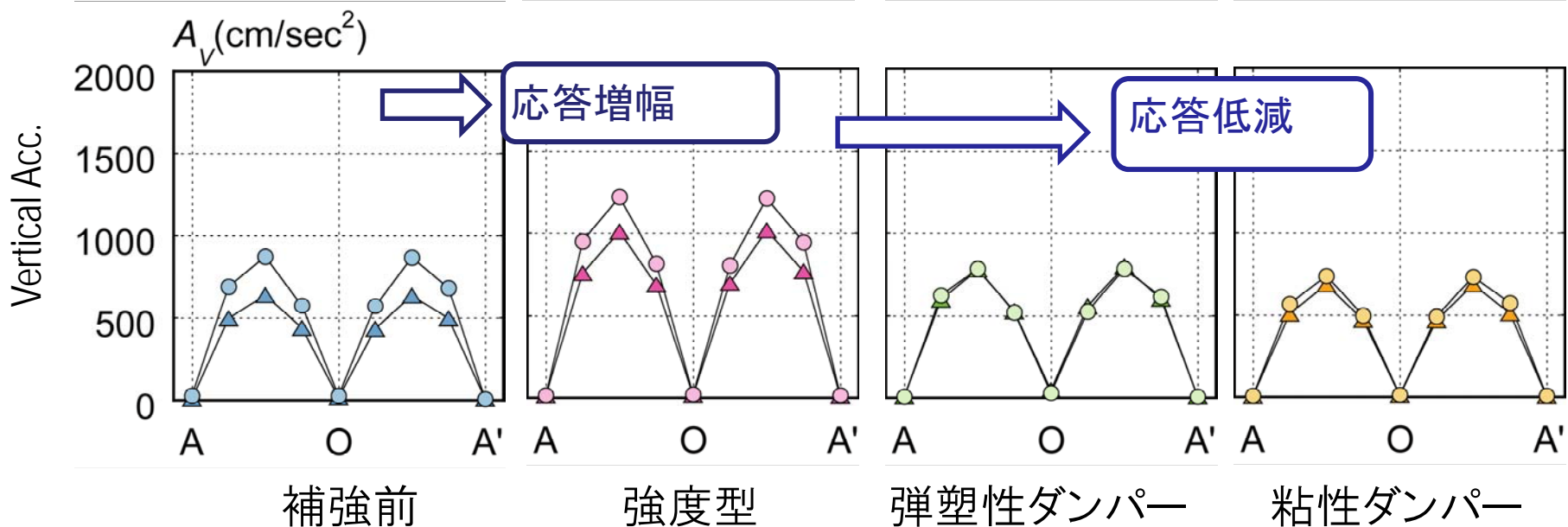
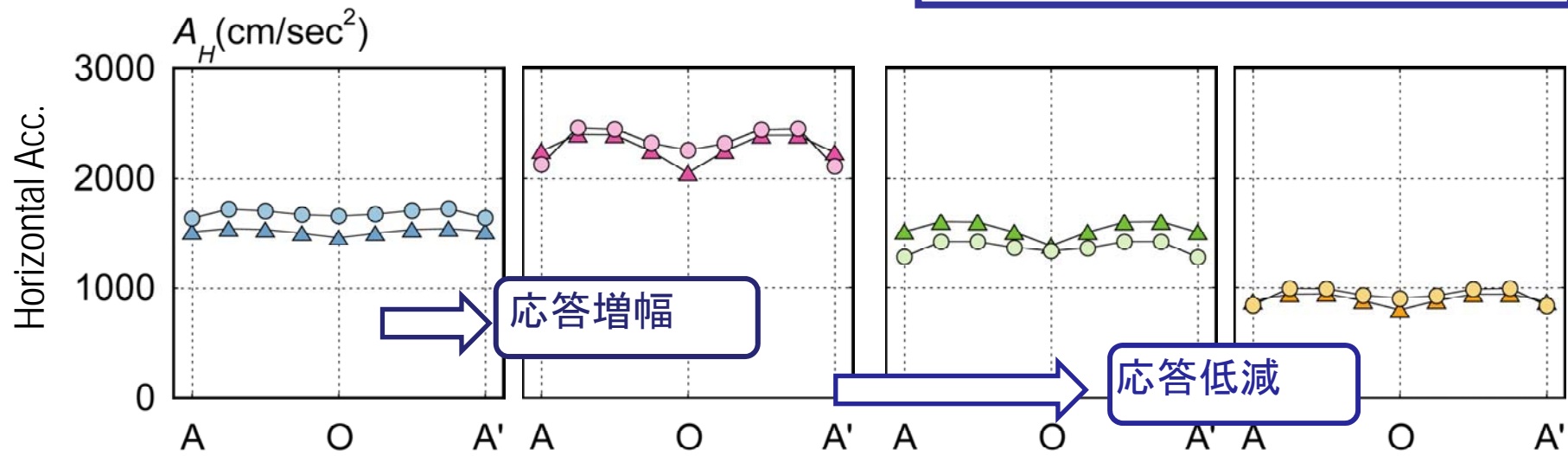
制振補強の可能性の検討

● BCJ L2 ■ ElCentro ◆ Hachinohe ▲ JMA Kobe ▲ Taft



屋根最大応答加速度(梁間方向)

制振補強の可能性の検討



強度型補強は層間変形抑制には有効であるが屋根応答を増幅させ、天井落下を促進するおそれがある。一方、制振補強は応答低減に効果的

木造建築物に対する一般診断法と精密診断法の評価法の検証

- (1) 詳細モデルの精度向上、信頼性向上
- (2) 木造建物用解析プラットフォームの整備
- (3) 経年変化の補正

耐震診断法の精度確認

既存の地震被害調査

木造建物の
被害モード
被災度の分類

2008,2009,2010

耐震診断による
木造建物
耐震性能評価

2008,2009,2010

地震観測による
入力地震動
の推定

2009

耐震診断による耐震性能と被災度の関係

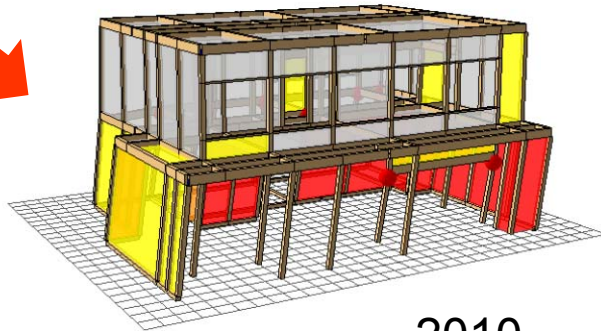
2008,2009

耐震診断法の評価方法の検証

耐震診断法の精度確認



2009



2010

W4

耐震診断評点 X方向 0.15 → 0.19

耐震診断(応答予測)



地震被害

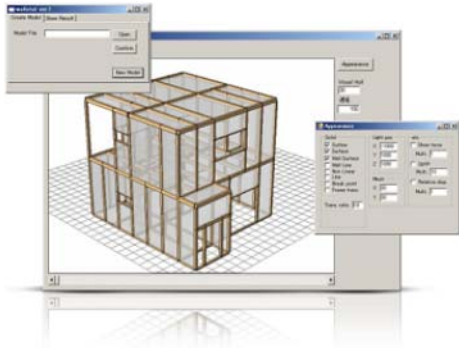
強モデルのJMA輪島の解析結果が近い変形状態となっている。変形の方法は異なるが、差鴨居部の柱の折損位置等も概ね一致する結果となった。

接合部バネなど、耐震要素データの整備が必要

耐震診断法の精度確認

木造建物用解析
プラットフォーム

耐震要素データベース
の整備

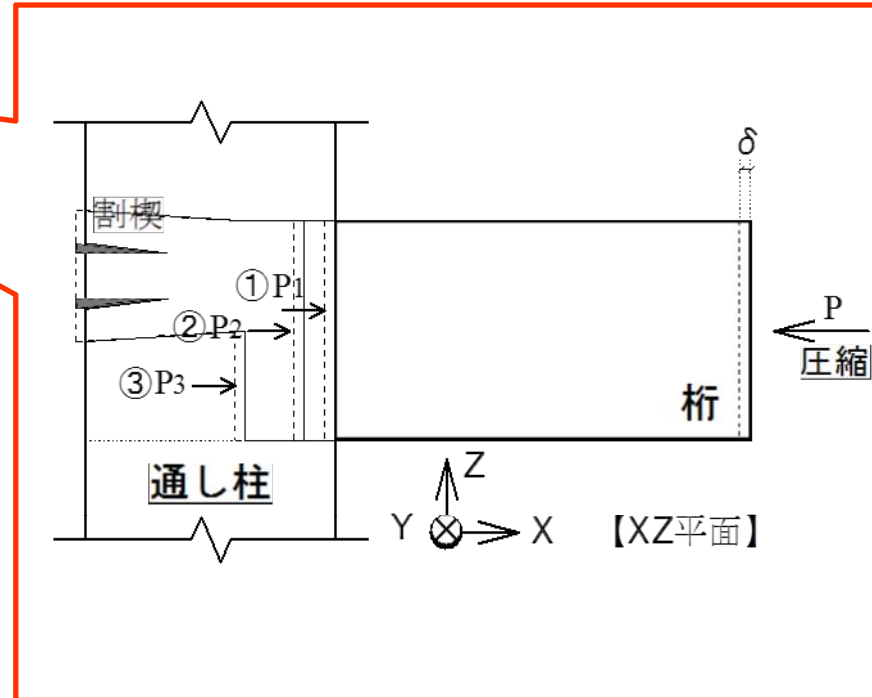


通し柱-桁		
力学モデル (-) ほぼ大人部分のめり込み抵抗	Kx	力学モデル (+) 割材のめり込み抵抗
力学モデル (-) ほぼ部分のめり込み抵抗	Ky	力学モデル (+) 仕口部のめり込み抵抗
力学モデル (-) ほぼ部分のめり込み抵抗	Kz	力学モデル (+) ほぼ部分のめり込み抵抗
力学モデル (-) 仕口部のめり込み抵抗	Ry	力学モデル (+) 仕口部のめり込み抵抗
力学モデル (-) 仕口部のめり込み抵抗	Rz	力学モデル (+) 仕口部のめり込み抵抗

接合部バネの理論式
寸法、樹種への対応

木造住宅
倒壊解析ソフトウェア
Wallstat
(開発: 建築研究所)

接合部モデル
Kx、Ky、Kz
Rx、Ry、Rz
6自由度の整備

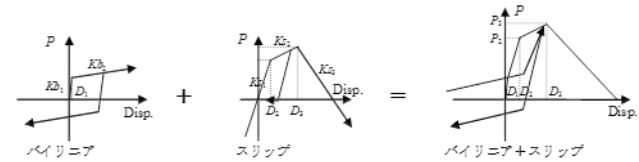


木造建物の破壊モード

現状の耐震診断法で評価できない破壊モード

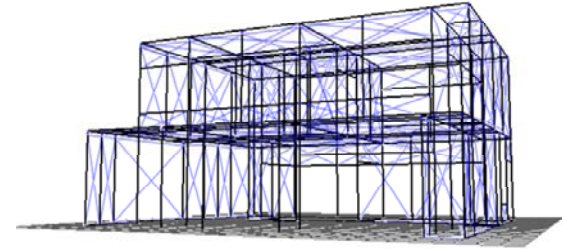
(1)破壊モード

- 1.柱頭・柱脚接合部の先行破壊(柱頭・柱脚接合部低減係数)
- 2.P- δ 効果による破壊(倒壊限界変形角)
- 3.床・屋根の先行破壊
- 4.横架材接合部の外れによる破壊
- 5.建物の移動、柱脚の踏み外し、又裂きによる破壊
- 6.柱の曲げ破壊と鉛直支持能力



(2)耐震要素

- 1.垂れ壁付き独立柱の柱曲げ破壊、垂れ壁腰壁付き独立柱の曲げ破壊
- 2.土蔵造(土壁大壁)の破壊
- 3.135角筋かい(学校建築)の評価 → 兵庫県
- 4.方杖(学校建築)の評価 → 荷重-変形部会
- 5.通し柱の評価、通し柱の曲げ破壊
- 6.浴室部のブロック壁の評価
- 7.階段のさらの効果
- 8.高さ方向(1, 2階)、幅方向の連続壁の効果
- 9.防火壁の評価(学校建築)



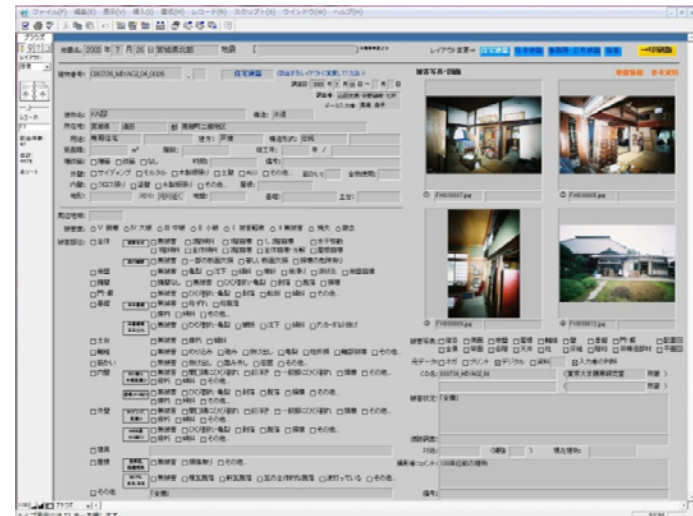
赤字は詳細モデルでも再現できていない破壊モード
→要素データの収集整備

(3)劣化

- 1.モルタル塗り壁の劣化による破壊
- 2.釘打ち面材壁、金物接合部の劣化による破壊
- 3.経年変化の影響測定

(4)荷重、入力

- 1.入力地震動の推定 → 基準整備別委員会
- 2.積載荷重の移動
- 3.地震時積載荷重、地震時積雪荷重
- 4.積雪の地震時の挙動(積雪の落下)
- 5.柱脚・壁の浮き上がりと積載荷重による抑え込み
- 6.入力低減
- 7.防火壁の評価(学校建築)



木造建物地震被害写真データベース

木造部会 今後の課題

- (1) 詳細モデルの精度向上、信頼性向上
- (2) 木造建物用解析プラットフォームの整備

今回の解析モデルは、「木造住宅の耐震診断と補強方法」(建築防災協会)の、改訂作業において、耐力壁に対して接合部の先行破壊を考慮する「柱頭柱脚接合部の性能による低減係数」のパラメータ解析に使用されており、今後、接合部データや信頼性向上を図りながら、さまざまな木造建物の耐震診断のためのデータ整備が必要である。

過去の地震被害による入力地震動の大きさと被害程度の調査結果を十分反映する必要がある。現在規定されている一般診断法や精密診断法に最近の地震被害調査結果を反映して更なる精度の向上を図る必要がある。

- (3) 経年変化の補正

1) 部材断面性能、2) ヤング係数、3) 接合部荷重変形関係に反映することが考えられる。