

北海道自然災害科学地区講演会、北海道大学大学院工学研究科A101会議室、2015年2月23日(月)16:30-17:30

鉄骨造建物の耐震性・機能維持性の向上をめざして －仲間と歩んで40年－

北海道大学大学院 緑川光正

主な研究プロジェクト

- 1) 鉄筋コンクリート造実大7層建物の耐震実験(1980's前半, 日米共研RC造)
- 2) 鉄骨造実大6層建物の耐震実験(1980's, 日米共研鉄骨造)
- 3) 金属系新素材・新材料の利用技術の開発(1980's末-1990's前半, 建設省総プロ)
- 4) 曲げとせん断を受ける地震エネルギー吸収金属梁の力学性能(1990's前半, 建研先端技術)
- 5) 建築構造物の制振構造の実用化技術の開発(1990's前半, 建設省官民共研)
- 6) 住宅を対象とした免震構法技術の開発(1990's後半, 建研)
- 7) 建築基準法令耐震関係規定の性能規定化(1990's後半-2000's前半, 建研)
- 8) 高知能建築構造システムに関する構造実験(1990's末-2000's前半, 日米共研スマート)
- 9) ロッキング構造システムの耐震性能(2000's~現在, 北大, 日米共研E-defense)
- 10) 耐震診断結果に基づく北海道の建物の耐震性能(2000's中頃~現在, 北大)
- 11) 基礎浮き上がり構造物の地震応答(2000's中頃~現在, 北大)
- 12) 座屈拘束フレースの力学性能(2000's中頃~現在, 北大, 神奈川大共研)

2

主な地震被害調査

- 1) 1978年伊豆大島近海の地震
- 2) 1978年宮城県沖地震
- 3) 1987年千葉県東方沖地震
- 4) 1994年米国ノースリッジ地震(鉄骨造建物調査)
- 5) 1995年兵庫県南部地震(応急危険度判定, 建物調査)
- 6) 2004年新潟県中越地震(免震建物調査)
- 7) 2010年チリ・マウレ地震(JICA)
- 8) 2011年東北地方太平洋沖地震(AIJ, 米国EERI)

3

過去の大震災による死因の比率

死因	割合	震災
火災	87%	関東大震災 (1923)
建物倒壊	83%	阪神・淡路大震災 (1995)
溺死	92%	東日本大震災 (2011)

- 震災によりかなり異なった様相。

出典: 国土交通省国土技術政策総合研究所, (独)建築研究所・平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料No. 674, 建築研究資料, No. 136, 2012.3
図引用: 構造設計一級建築士定期講習テキスト, 建築技術教育普及センター, 2014.5

4

阪神・淡路大震災の鉄骨造被害-1

- 激震地区を含む特定地域の軽量鉄骨を除く3階建以上の全数調査結果*1
- 1) 新耐震以前と以後で大破/倒壊した鉄骨造建物の割合は3:1, 無被害の割合は1:2.5で, 以後の建物は耐震性能が大幅に改善された。
- 2) 柱梁溶接接合部の被害は以前と以後で有意な差が認められない。

*1 緑川光正, 長谷川隆, 向井昭義, 西山功, 福田俊文, 山内泰之, "1995年兵庫県南部地震における特定地域の鉄骨造建物被害調査", 日本建築学会構造系論文集, 第493号, pp. 115-120, 1997.3

5

鉄骨造建物の被害調査地域(神戸市)

軽量鉄骨を除く3階建以上の全数調査 628棟
(東灘区, 中央区, 兵庫区の一部で震度7を含む地域)

6

阪神・淡路大震災の鉄骨造被害-2

● 約1,000棟の被害建物調査の結果^{*2}

- 1)全被害建物の約40%が大破/倒壊.
- 2)新耐震以後急増した冷間成形角形鋼管柱ラーメン構造153棟の74棟が大破/倒壊.
- 3)この内45棟は柱梁溶接接合部の破壊が原因.

^{*2}日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会: 1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書, 1995.5

7

阪神・淡路大震災の鉄骨造被害-3

● 柱梁溶接接合部の破壊^{*3}

- 1)柱梁溶接接合部の被害は2種類に分類. a)完全溶込み溶接のものを隅肉溶接したための破断, b)梁フランジ端部は完全溶込み溶接されていたがスカラップ底, エンドタブ付近, 溶接止端・熱影響部等を起点とする塑性歪履歴経験後の高応力脆性破断.



^{*3}井上一朗: 地震被害事例から学ぶ構造設計: 鉄骨造, 建築技術, pp.156-159, 2010.10

日本建築学会: 阪神・淡路大震災調査報告
建築編-3 鉄骨造建物, 1997.10より

8

阪神・淡路大震災の鉄骨造被害-4

● 柱梁溶接接合部の破壊^{*3}(続き)

- 2)梁端部で高応力脆性破断が生じた建物は約30棟で1棟を除き補修後全て再使用.
- 3)カーテンウォールの脱落は皆無.

注)脆性破壊は特定の条件下で発生し、一般には、a)引張応力の存在、b)切欠などの欠陥(応力・歪集中源)の存在、c)低韌性、の3条件が同時に満足される場合に限って生じると言われている。

^{*3}井上一朗: 地震被害事例から学ぶ構造設計: 鉄骨造, 建築技術, pp.156-159, 2010.10

9

東日本大震災の鉄骨造被害-1

● 地震動被害の特徴^{*4,*5}

- 1)短周期成分が比較的卓越した地震動だったため大きな震度の割には建物被害が少ない.
- 2)大破以上の被害を受けた新耐震以後の建物はなく、以前の建物に大きな被害が多い.
- 3)部材被害では鉄筋コンクリート造との接合部(鉄骨造屋根支承部、露出柱脚部)の損傷が多い.
- 4)その他の被害も含めていざれも過去の地震被害で報告されているものと同様.

^{*4}国交省国総研、建築研究所: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告、建築研究資料、No.136, 2012.3

^{*5}日本建築学会: 2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011.7

10

東日本大震災の鉄骨造被害-2

● 地震動被害の特徴^{*4,*5}(続き)

- 5)新耐震以前、以後にかかわらず天井材や内外装材などの非構造部材被害が多く、かつ比較的古い構法によるものの被害が多い.
- 6)BCP(事業継続計画)については課題が残る^{*6}。地震動による直接・間接の被害が生じ、多くの企業の操業停止、サプライチェーンの停止、世界的な完成品の供給停止を引き起こした.

^{*4}国交省国総研、建築研究所: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告、建築研究資料、No.136, 2012.3

^{*5}日本建築学会: 2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011.7

^{*6}指田朝久: 事業継続計画(BCP)の課題と建物の耐震性の確保、日本地震工学会誌, No. 22, pp. 29-32, 11 2014.6

鉄骨造建物の耐震性能の現状と評価-1

- ・ 入力地震動レベルと2次設計用地震力を比べると、阪神・淡路大震災では入力レベルが設計レベルを大きく上回り、東日本大震災では同程度.
- ・ 阪神・淡路では梁端溶接部破断があったが、東日本では報告なし.
- ・ 1000年に一度の巨大地震に対して鉄骨造建物は対応できたのか？
→構造は概ね対応できたが非構造には大きな課題.

11

鉄骨造建物の耐震性能の現状と評価-2

- 現行耐震基準による鉄骨造ラーメン構造では強震動時の変形が大きくなりすぎて機能維持が困難。
- 機能性向上のためには応答低減機構などを用いて変形を抑制することが肝要。
- 我が国が過去数十年にわたって培ってきた耐震設計の妥当性。(木造は課題あり)
耐震設計の目標=中地震動-損傷抑制、大地震動-人命保護

13

鉄骨造建物の耐震性能の今後-1

- 終局状態における構造の耐震性能を本来の意味で確認するためには、倒壊に対する余裕度評価が重要。
- 天井材などの被害軽減を図るには、フロアレスポンス(床応答)による評価などの対応が必要。
- 大地震動に対して建物に要求される耐震性能は、人命保護は当然だが、高度に集約され複雑にネットワーク化された現代社会では、事業(業務)継続計画(BCP)の観点から地震後の建物の機能維持が求められ、持続可能で回復力のある建物への要求が高まっている。

14

鉄骨造建物の耐震性能の今後-2

- 構造、非構造、設備を含む総合的な耐震性能を確保する必要。
- 鉄骨造建物では、過大な変形・加速度が生じないように地震応答低減機構などを利用して変形を抑制する必要。

寺田寅彦：鎖骨、昭和8年1月、工業大学蔵前新聞
鎖骨が、いわば安全弁のような役目をして気持ちよく折ってくれるので、その身代わりのおかげで肋骨その他のもっとだいじなものが救われる。
どこか「家屋の鎖骨」を設計施工していく、大地震がくれば必ずそこが折れるようにしておく。そのかわり他のだいじな致命的な部分はそのおかげで助かるというようにすることはできないものかと思う。時々その道の学者たちに話してみたこともあるが、だれもいっこう相手になってくれない。

15

ロッキング構造システム

- 現在の耐震設計は、柱・梁などの塑性変形によって地震入力エネルギーを吸収して強震動に抵抗するという考え方。
- 地震被害から明らかなように、強震動によって構造物は塑性変形を生じて大きな損傷を受ける。
- 構造物に生じる塑性変形は損傷そのものであり、柱・梁などの塑性変形に期待する従来の耐震設計の考え方はその損傷拡大を容認せざるを得ないという矛盾。
- 構造物の地震時損傷を軽減して耐震安全性・機能性向上を図るには、その地震応答を低減させて塑性変形を抑えることが肝要。

→無損傷の耐震構造

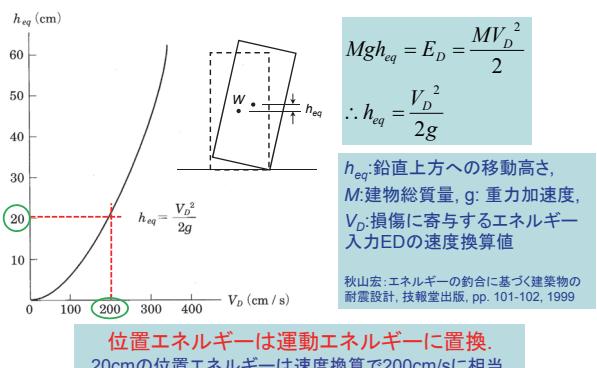
16

鉛直荷重と位置エネルギー

- 建築構造物の要求基本性能の一つは鉛直荷重支持。
- 建物重量の位置エネルギーは地震入力エネルギーに比べて遙かに大きい、強震動により構造物が損傷を受けて鉛直荷重支持能力を失うと、位置エネルギーが解放されることで、構造物の損傷が著しく進行。
- 鉛直荷重は一般に構造物の耐震性能を損なうものと考えられている。
- 今までの地震被害調査などから、強震動を受けた構造物がロッキング振動に伴う基礎浮き上がりを生じることにより地震被害が軽減される場合があるとの指摘。
- 鉛直荷重が構造物の耐震性能に正の効果をもたらす場合があることを示唆。

17

位置エネルギーの効果



18

芦屋浜高層住宅(シーサイドタウン)の厚肉大断面柱の引張脆性破断では…

箱形断面50x50cm
板厚50mm

1995年兵庫県南部地震における被害
建物階数: 14F, 19F, 24F, 29Fの4種類
29F以外の棟で計57か所の弦材(組立柱の弦材)破断
人命保護は確保
圧縮座屈(沈下)ではなく引張破断(浮き上がり)

19

ロッキング構造システムの特徴-1

- 柱脚部を基礎に緊結することにより構造物内に過大な応力が生じる場合あり。
- 柱脚部の浮き上がりを許容することで、ある特定部分の応力が過大になる前に、建築構造物への地震動入力効果を頭打ちにできる。
- 耐震設計の合理化。
- 耐震改修にも適用。

柱脚部を基礎に緊結することにより構造物内に過大な応力が生じる場合あり。
柱脚部に配置した制振部材により軽減
衝撃力
柱脚部に配置した制振部材により軽減
重心の上下移動によるエネルギー吸収
水平地震力は建築物浮き上がり後、頭打ち
地震力の反転時に、自重を復元力として活用
圧縮部分の圧壊抑制
杭の引き抜き力低減
制振部材配置(降伏型ベースプレート等)
頂部変位
地盤の浮き上がり後、頭打ち

20

ロッキング構造システムの特徴-2

- 動力学的な観点からの構造物の浮き上がり応答。
- 浮き上がった状態と着地した状態で異なる振動系。
- 浮き上がりと着地を繰り返す度に異なる二つの振動系の過渡応答が生じる強非線形現象。
- 共振あるいは共振に近い状態が生じ難い。

柱脚部に配置した制振部材により軽減
衝撃力
柱脚部に配置した制振部材により軽減
重心の上下移動によるエネルギー吸収
水平地震力は建築物浮き上がり後、頭打ち
地震力の反転時に、自重を復元力として活用
圧縮部分の圧壊抑制
杭の引き抜き力低減
制振部材配置(降伏型ベースプレート等)
頂部変位
地盤の浮き上がり後、頭打ち

21

浮き上がり降伏ベースプレート(BPU)を有する鉄骨造ロッキング架構の地震応答性状と耐震性能

22

浮き上がり降伏ベースプレート(BPU)を有する鉄骨造ロッキング架構

- 強震動に対して応答低減を図り地震後に主要機能を確保できる建築構造物の実現を目指し、簡易な機構により強震動時に柱脚部浮き上がりを許容するロッキング構造システム。
- 架構の最下層柱脚部に上部構造の降伏に先行して浮き上がり降伏するように工夫されたベースプレート(以下、浮き上がり降伏ベースプレートBPUという)を配置。
- 一定レベル以下の地震動入力に対してベースプレートは浮き上がらずに弾性範囲内に收まり、浮き上がり後にはベースプレートの塑性化による履歴エネルギー吸収を期待。
- 地震後には自重で元の位置に復帰。

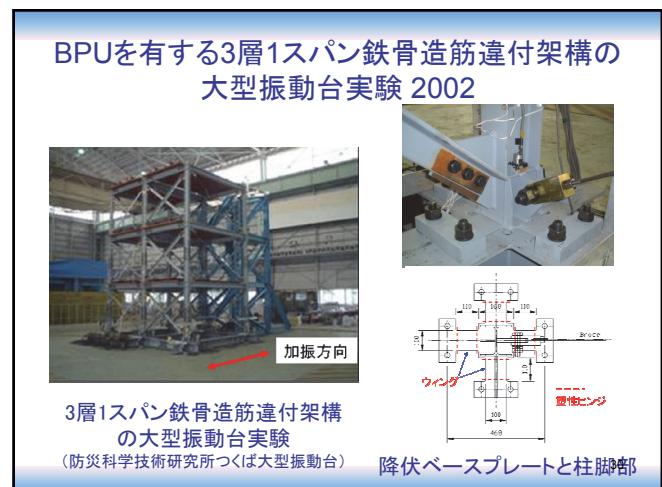
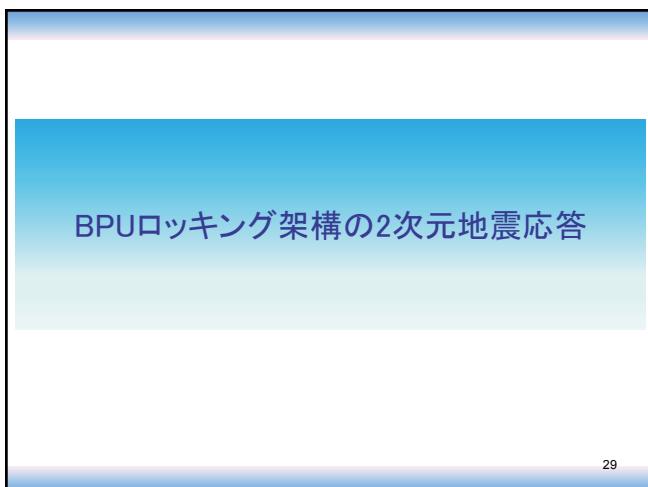
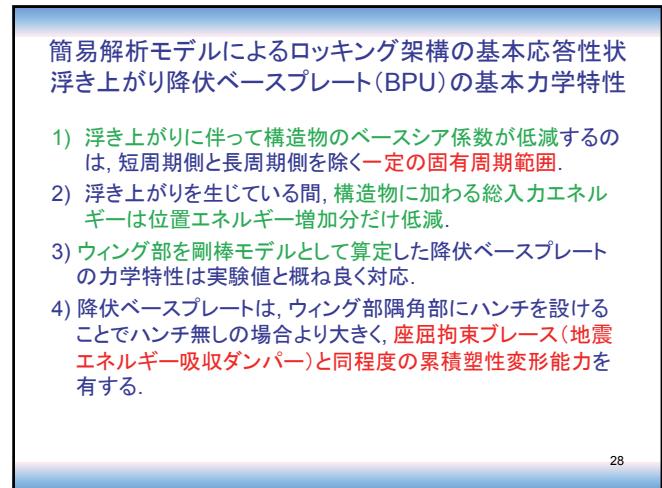
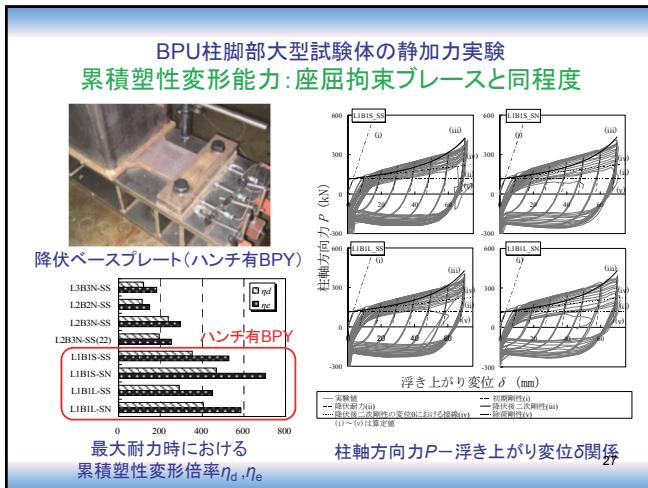
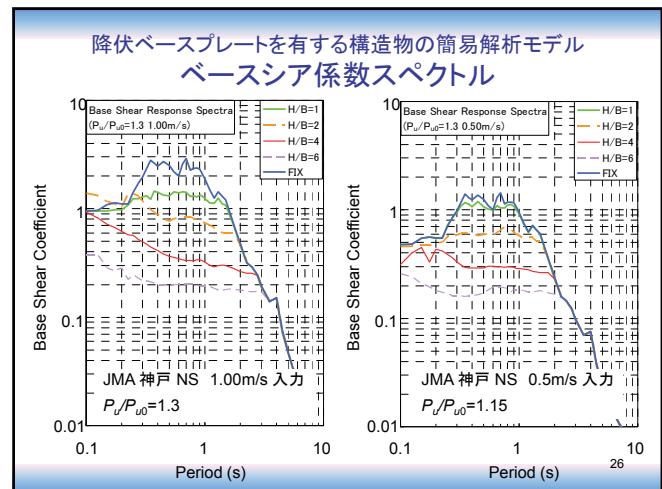
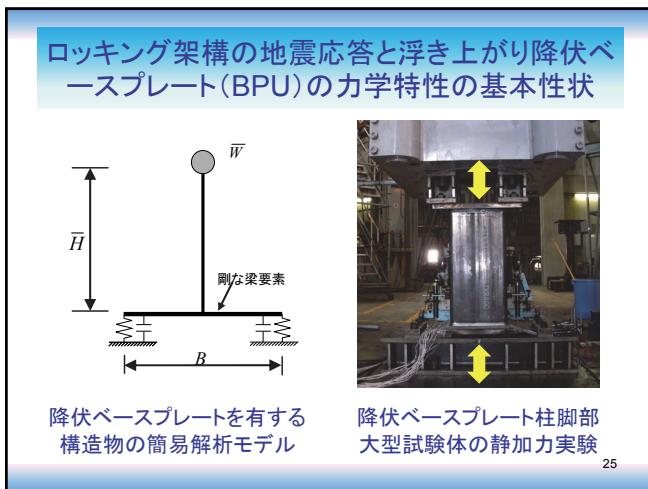
23

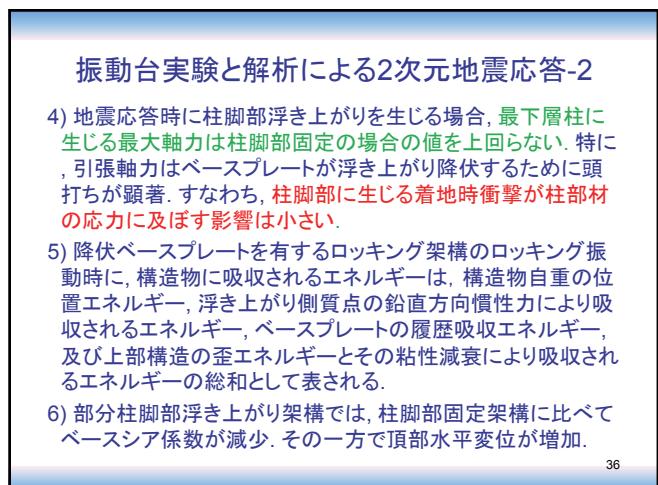
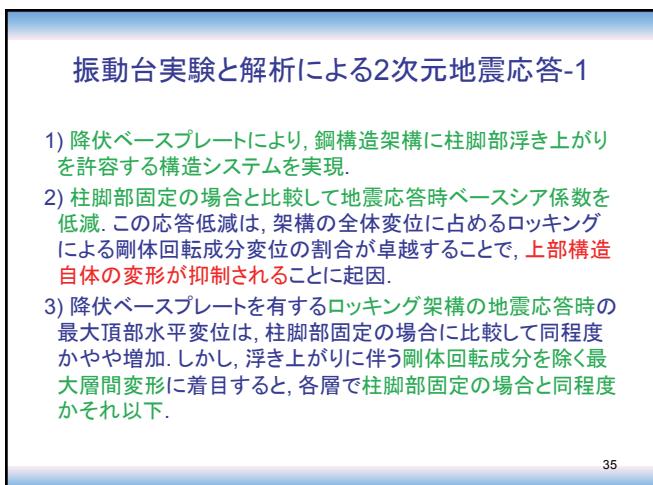
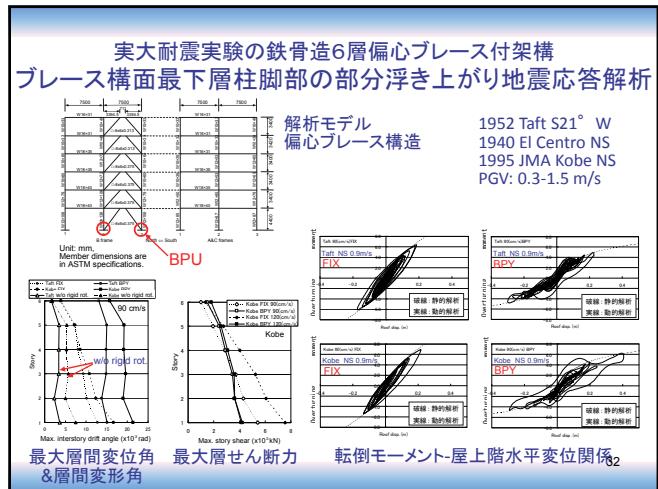
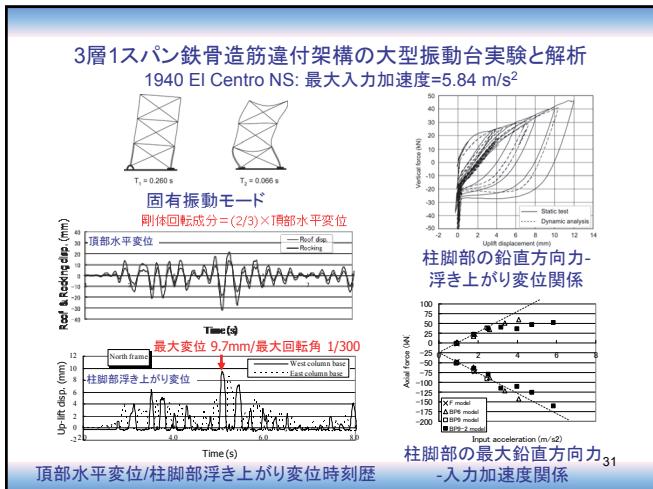
浮き上がり降伏ベースプレート(BPU)を有する鉄骨造ロッキング架構

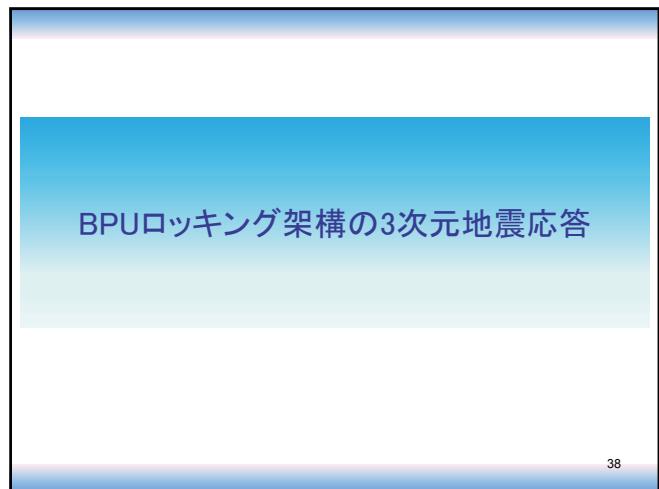
- 最下層柱脚部に耐力の小さいベースプレート(BPU)を設置。
- BPUが柱の引張り軸方向力を受けて降伏。

最下層柱脚部に耐力の小さいベースプレート(BPU)を設置。
BPUが柱の引張り軸方向力を受けて降伏。

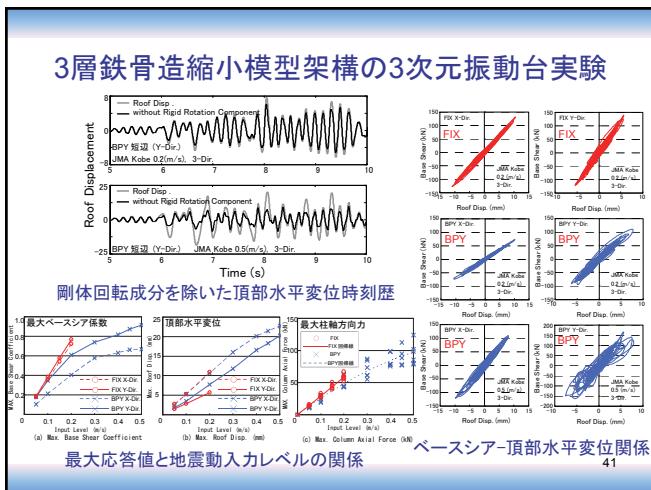
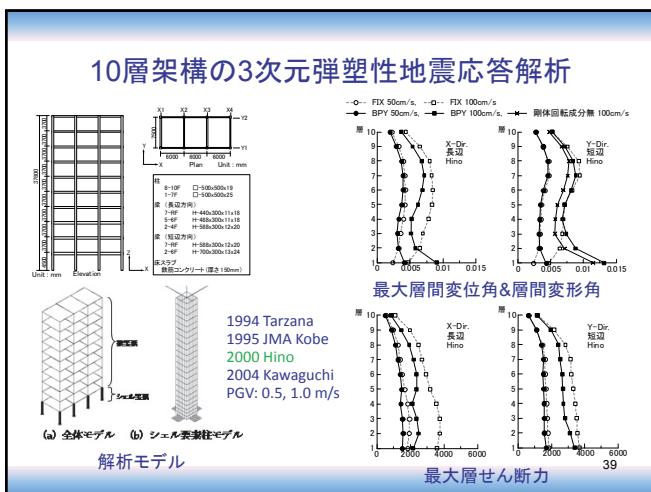
24







38



42

3次元振動台実験ビデオ 柱脚部 1940 El Centro, 0.50m/s

- 3層1x2スパン鉄骨造縮小模型架構 BPU柱脚部
- 1940 El Centro 0.50m/s

UN_XYZ50kine_20081210164145(柱脚X1Y1スロー1MB).



43

振動台実験と解析による3次元地震応答

- ベースプレート降伏とともに柱脚部の浮き上がりを許容する構造システムは、実際規模の立体架構でもベースシア係数が低減し、応答低減効果を発揮。また、強震動時において降伏ベースプレートは主にウイングの面内引張力で水平力を抵抗。
- 地震動の入力方向次数が柱脚部浮き上がり立体架構の応答に及ぼす影響は、最大柱脚部浮き上がり変位は3方向入力で最も大きく、次いで2方向、1方向の順に小さくなる。一方、頂部水平変位やベースシア係数などの水平方向の最大応答は、入力方向次数による影響を殆ど受けない。
- 柱脚部浮き上がり架構の最大柱軸力は柱脚部固定架構を上回らない。
- 柱脚部浮き上がり架構では偏心無しでも柱脚部固定の場合より大きな床振れ角を生じるが、入力レベルが増加しても偏心の有無による床振れ角の差は拡がらずほぼ一定値を保つまま増加。

44

BPUを有する鉄骨造ロッキング架構の地震応答性状と耐震性能

- 強震動に対して損傷軽減を図り地震後に主要機能を確保できる建築構造物の実現を目指して、一般の鋼構造建物にも容易に適用できる自重を活用した新たな概念に基づく簡単な構造システム、すなわち、浮き上がり降伏するベースプレート(BPU)を有する鋼構造ロッキング架構を提案。
- 地震応答低減効果を振動台実験と解析を通して検証し、地震応答性状と耐震性能を明らかにした。
- 地震応答におけるベースシア係数低減、残留変形の最小化、耐震改修への適用性などの利点を持つロッキング構造システムを世界に先駆けて提示し、それを実用に供しうる段階にまで導いた。

45

せん断パネル及び張力材を有する鉄骨造ロッキング架構の地震応答性状と耐震性能

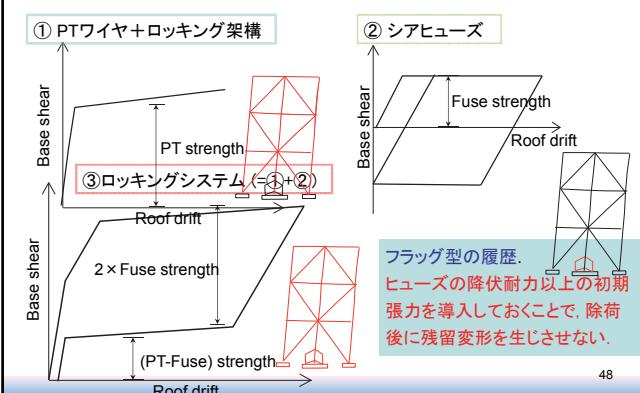
46

せん断パネル及び張力材を有する制御型ロッキング架構

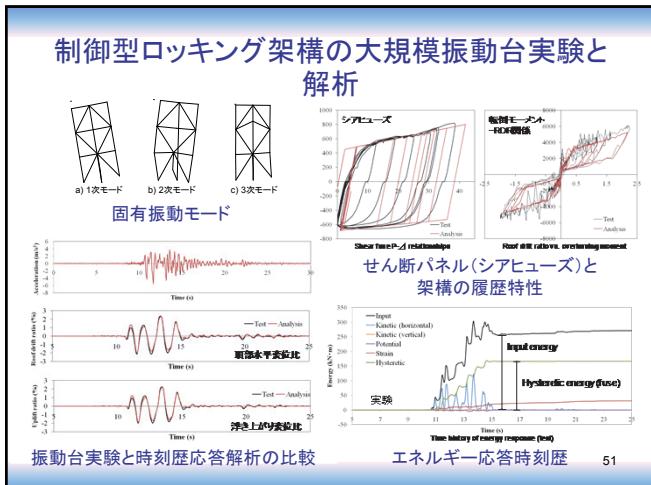
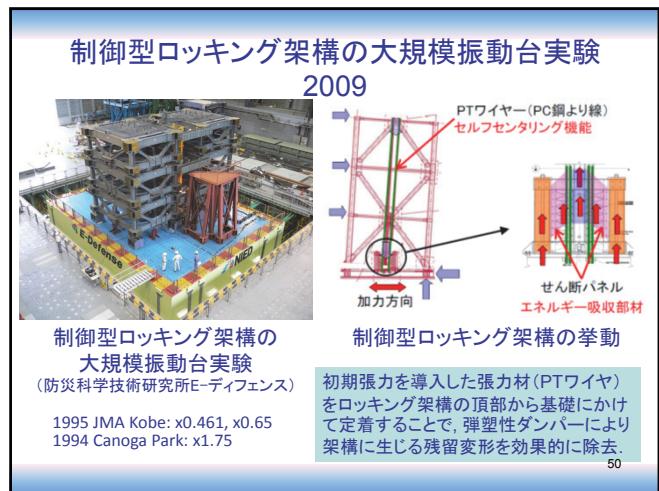
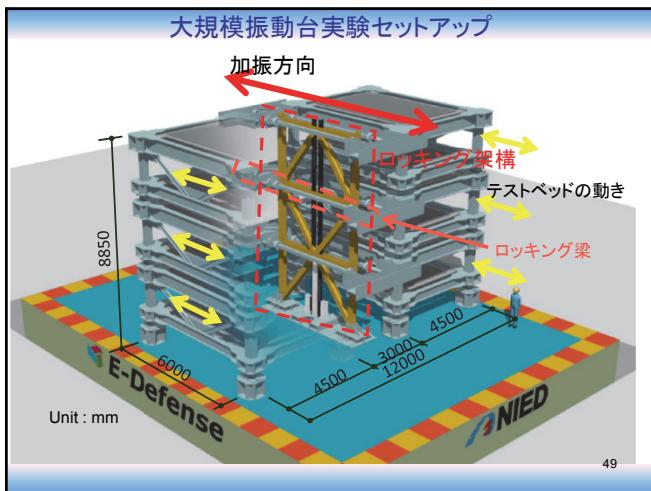
- 強震動後に降伏ベースプレートなどの弾塑性ダンパーの残留変形を建物自重で除去しうるロッキング架構は、米国の架構のように耐震要素内の柱の床荷重支配面積が狭くて柱軸力が比較的小さい場合には適用が困難。
- 初期張力を導入した張力材(PTワイヤ)をロッキング架構の頂部から基礎にかけて定着することで、弾塑性ダンパーにより架構に生じる残留変形を効果的に除去する制御型ロッキング構造システムを米国研究者とともに検証。

47

制御型ロッキング架構の履歴特性



48

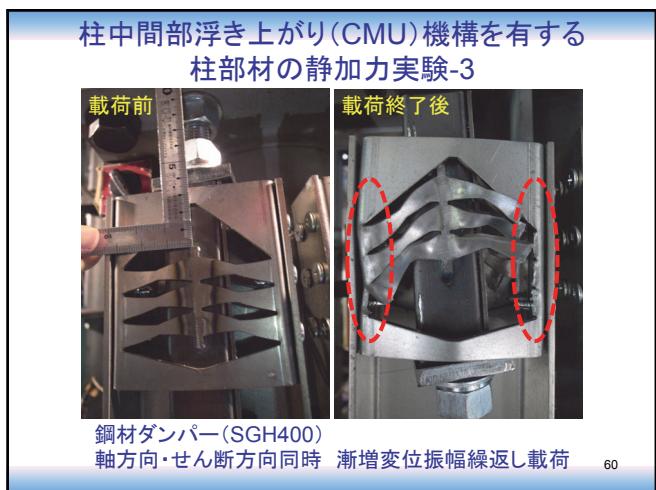
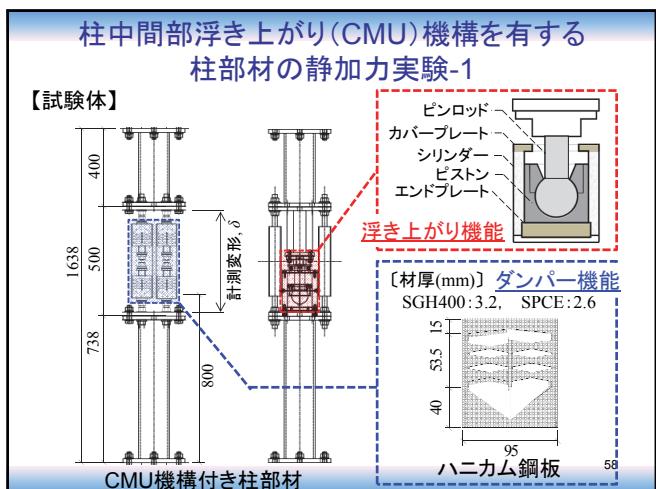
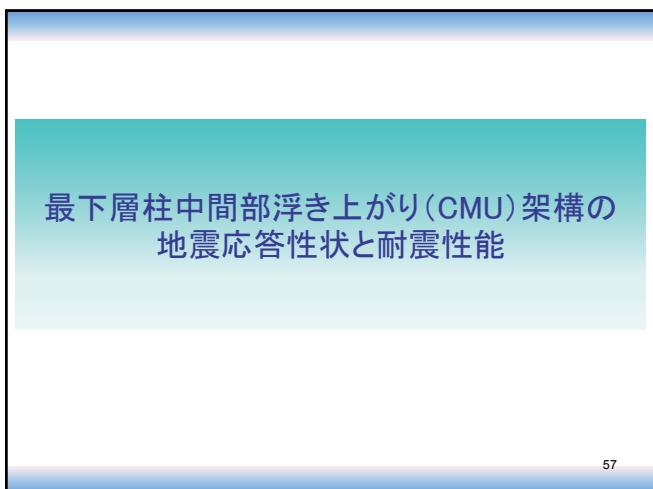


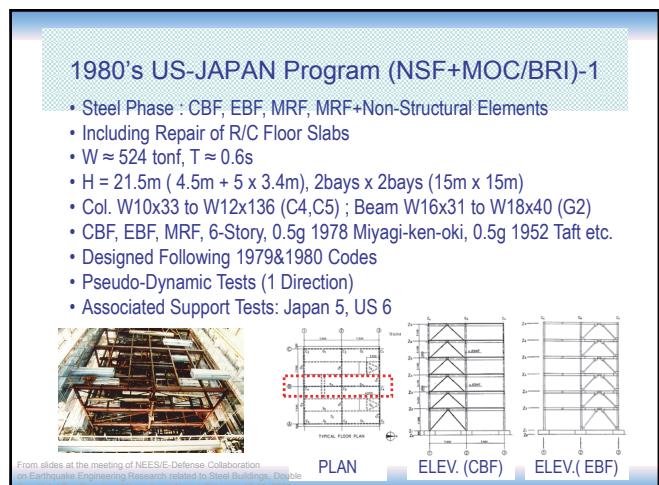
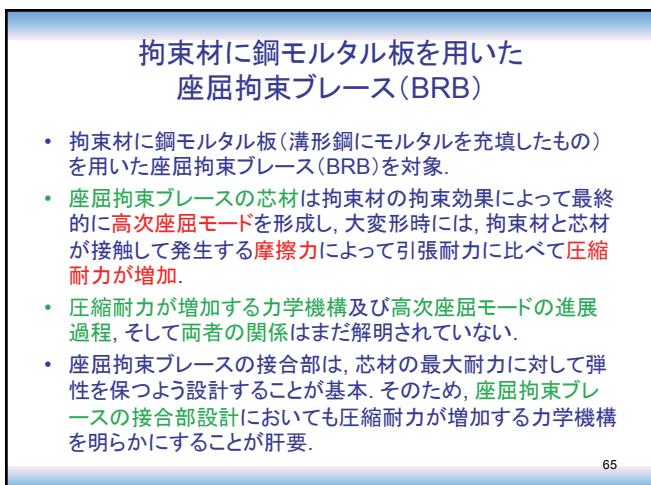
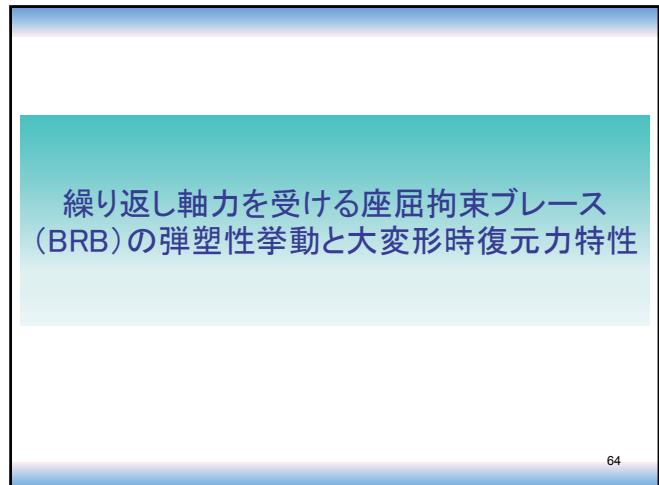
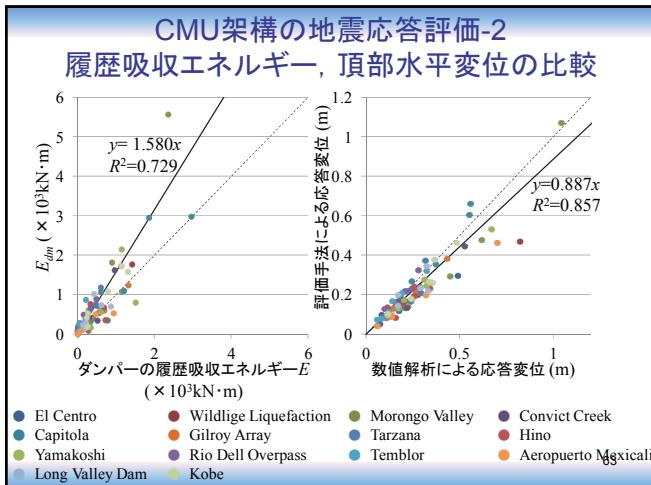
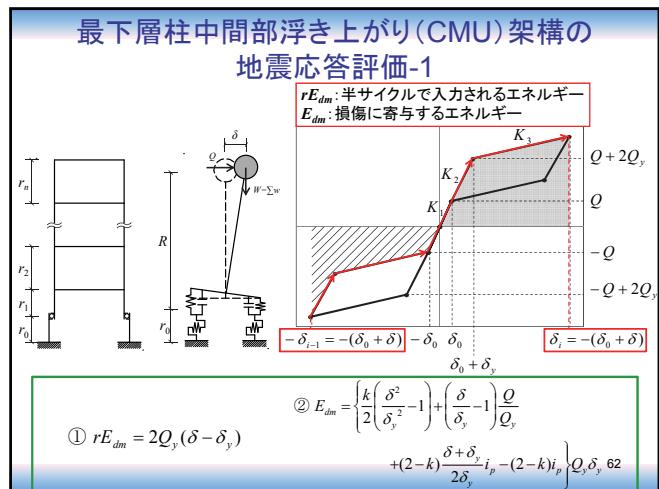
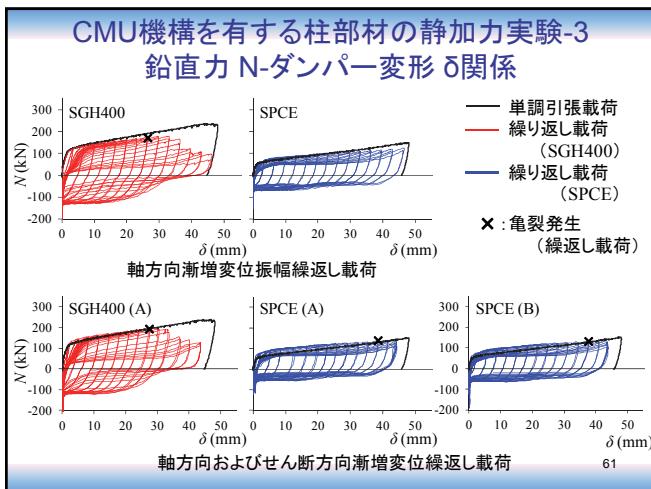
- ### 制御型ロッキング架構の大規模振動台実験と解析
- 1) 制御型ロッキング架構は想定通りの地震応答性状を示した。すなわち、せん断パネル弾塑性ダンパーの降伏耐力以上の初期張力をPTワイヤに導入することで、地震応答低減効果が得られるとともに、架構に復元力を与え、強震動後にも架構に残留変形が生じないことを実証。
 - 2) 柱脚部が浮き上がっている間に、ロッキング架構特有の高次振動モードの影響が部材の歪や変形の時刻歴に現れた。
 - 3) 柱脚部着地時の衝撃荷重の影響では、着地時に柱脚部近傍で瞬間に大きな加速度値を示すものの、上層に行くに従い急速に減衰すること、また衝撃によって部材に生じる歪は転倒モーメントによって生じる歪に比べて小さいことを検証。
 - 4) 制御型ロッキング架構の最大応答は、瞬間最大入力エネルギーと最大浮き上がり変位を生じる1/4周期の浮き上がり開始時(柱脚離間時)運動エネルギーの和が予測できればエネルギーの釣り合いに基づいて概ね評価できることを確認。

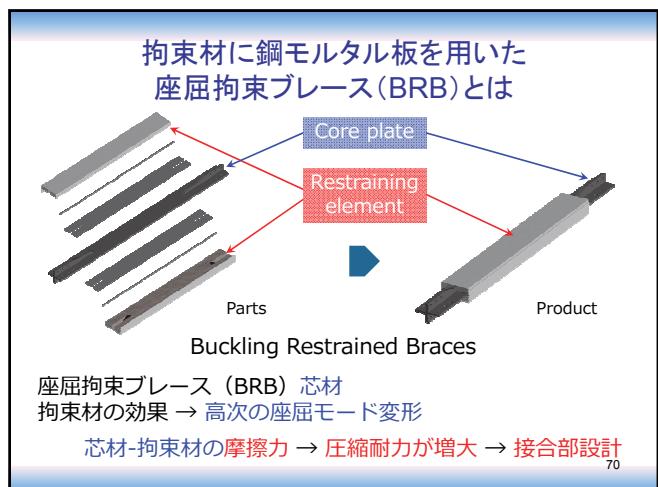
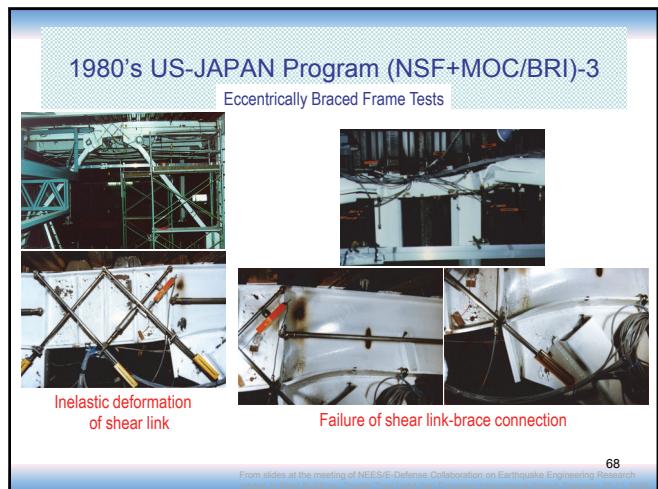
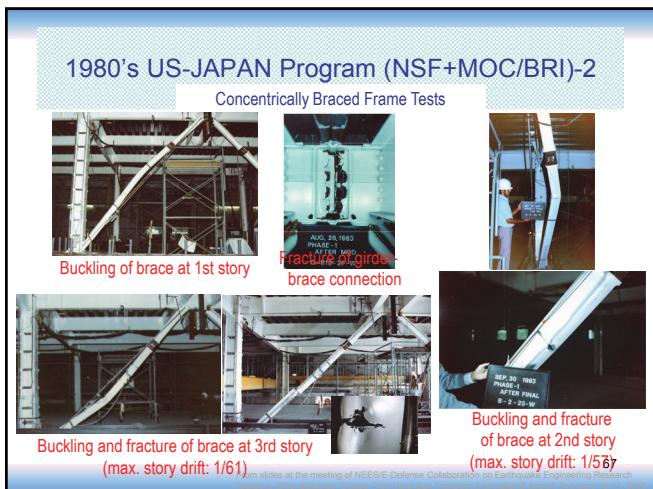
53

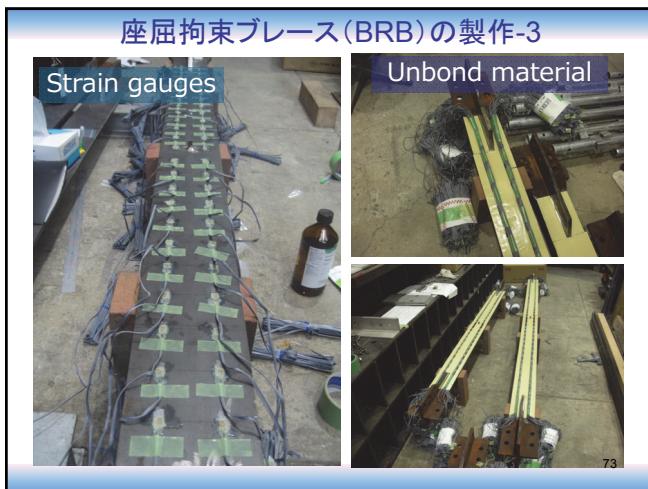
- ### せん断パネル及び張力材を有する制御型ロッキング架構の地震応答性状と耐震性能
- 柱軸力が比較的小さい構造物に適用できるロッキング構造システムを提案。
 - 初期張力を導入した張力材をロッキング架構に付加することで、地震応答低減効果が得られるとともに、弾塑性ダンパーにより架構に生じる残留変形を効果的に除去できることを大規模振動台実験及び解析で実証。

54







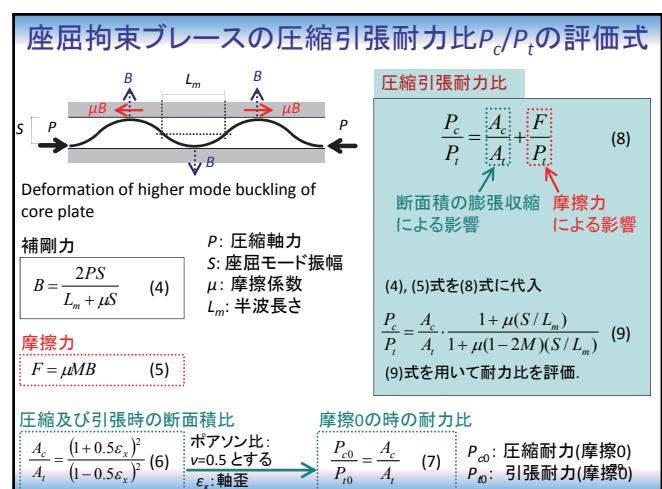
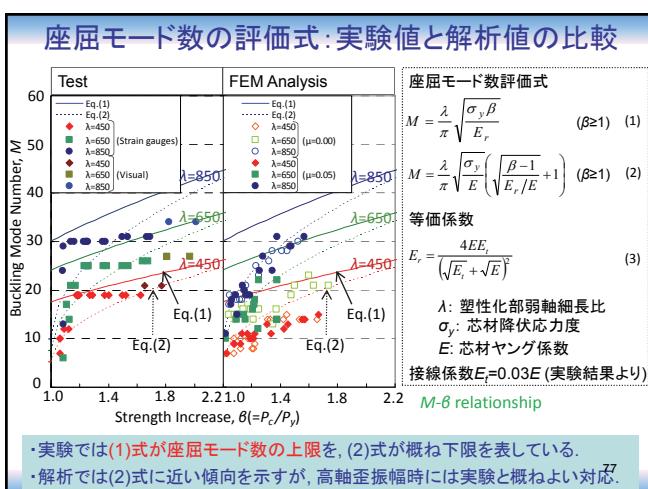
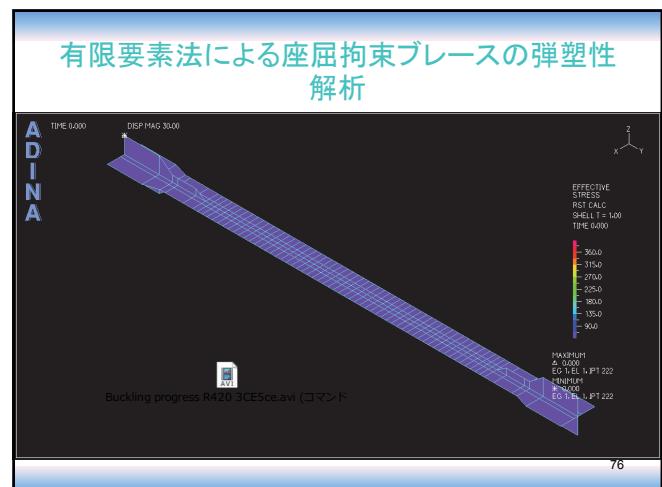
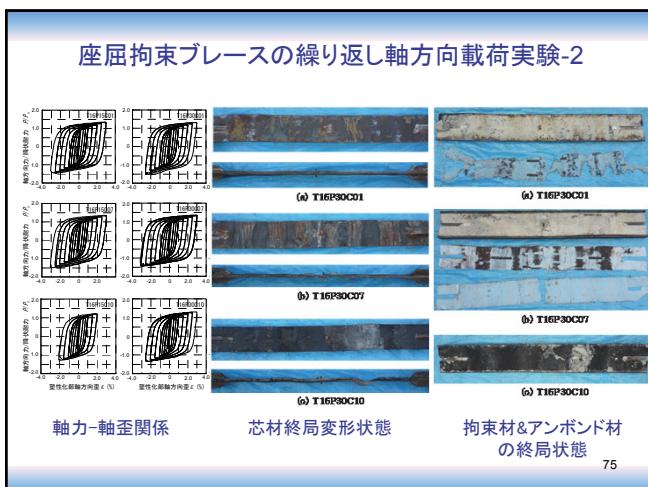


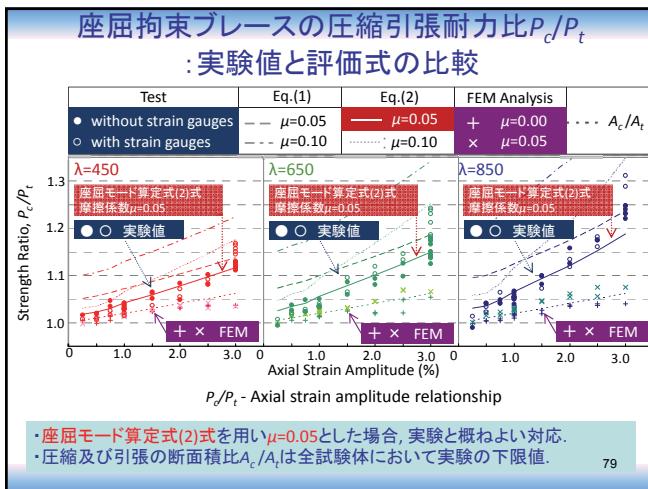
座屈拘束プレースの繰り返し軸方向載荷実験-1

Group	Specimen	Final half-cycle	Failure mode	Buckling mode number M
1	L520	7th (-) 3.0% cycle	Tensile fracture	23
	L560	6th (-) 3.0% cycle	Tensile fracture	27
	L560S	3rd (+) 3.0% cycle	Local buckling about weak-axis near lower end	22
	L600	8th (-) 3.0% cycle	Tensile fracture	32
2	L750	3rd (+) 3.0% cycle	Local buckling about weak-axis at upper end	34
	L750S	3rd (-) 3.0% cycle	Local buckling about weak-axis at lower end	30
	L450P05	6th (+) 3.0% cycle	Local buckling about weak-axis at lower end	26
	L450P08S	1st (-) 3.0% cycle	Local buckling about weak-axis at upper end	21
	L800P08	2nd (+) 2.5% cycle	Local buckling about weak-axis at lower end	34
	L800P70	2nd (-) 3.0% cycle	Local buckling about weak-axis at lower end	55
	L800P90S	1st (-) 2.5% cycle	Local buckling about weak-axis at lower end	29

多數：塑性化部端部 弱軸回り局部変形 増大→耐力低下

L520, L560, L600試験体：引張破断→耐力低下





繰り返し軸力を受ける座屈拘束ブレース

- 1) 降伏耐力に対する引張耐力上昇率は最終的に1.3-1.5程度。一方、圧縮耐力上昇率は、芯材-拘束材間に発生する摩擦力やボアソン比に起因する圧縮時の芯材断面積の膨張により1.5-2.0程度で、引張耐力上昇率よりも大きくなる。
 - 2) 圧縮耐力上昇率及び圧縮引張耐力比は、細長比が大きくなるにつれて増加。
 - 3) 高次モードの塑性座屈耐力算定式に基づいて提案した圧縮耐力上昇率と高次座屈モード数に関する二つの関係式は、概ね実験値の上限値と下限値。
 - 4) 芯材の変形状態に基づく力の釣り合いより算定される芯材-拘束材間の摩擦力とボアソン比に起因する断面積変化を考慮した圧縮引張断面積比の足し合わせとして提案した圧縮引張耐力比算定式は、概ね実験値に近い値。また、圧縮引張断面積比が全ての実験値の下限値。
 - 5) 芯材の高次座屈モード変形の進展過程を実験により初めて捉えた。

繰り返し軸力を受ける座屈拘束ブレースの弾塑性挙動と大変形時復元力特性

- ・ 地震応答低減のために多くの制振構造物に使われている座屈拘束プレースについて、大変形時に顕在化する圧縮と引張の耐力比の評価式並びに圧縮耐力と高次座屈モード数の関係式を新たに提示。
 - ・ 高次座屈モード変形の進展過程を実験により初めて捉えて明らかにした。



免震住宅試験体振動台実験(1990's後半)

古川圭子

82

まとめ

- ・新たな概念により提示した柱脚・柱中間部浮き上がりを伴う三種類のロッキング構造システムの地震応答低減効果と耐震性能の検証.
 - ・座屈拘束ブレースの大変形時に顕在化する圧縮引張耐力差の評価式の提示.
 - ・以上により、回復力があり継続使用が可能な鉄骨造建物をめざした地震応答低減機構・システムを開発・検証.