

令和2年度 建築基準整備促進事業

S30. 鉄筋コンクリート造の限界耐力計算における 応答変位の算定精度向上に向けた建築物の 振動減衰性状の評価方法の検討

事業主体名： 株式会社 堀江建築工学研究所

学校法人 中部大学

国立大学法人 名古屋大学大学院

国立大学法人 東京大学地震研究所

国立大学法人 山口大学大学院

国立研究開発法人 防災科学技術研究所

・兵庫耐震工学研究センター

共同研究 : 国立研究開発法人 建築研究所

第 I 編 調査方針

応答低減係数 F_h の評価精度に大きな影響を及ぼす建築物の振動減衰 h の設定を精緻化する方法を提案する。

- (1) 実験データベースより、壁部材の降伏点を評価し、提案手法を検証する。
- (2) 部材実験の結果より、乾燥収縮を考慮した降伏点を評価し、提案手法を検証する。
- (3) 架構の動的解析より、応答値を把握し、部材降伏点の提案手法を検証する。
- (4) 架構の等価線形化法より、架構降伏点の評価を行い、提案手法を検証する。
- (5) 大型振動台実験用試験体の上層部分の作成と、その動的特性の観測を行う。
- (6) 大型振動台実験より、動的解析と等価線形化法の応答値を検証する。
- (7) 部材の降伏点、架構の降伏点の算定方法を提案し減衰の設定を精緻化する。

第 I 編 実施体制

	配置予定者	所属・役職	担当する分担業務の内容
管理 技術者	① 太田 勤 ② 勅使川原 正臣 ③ 楠 浩一 ④ 稲井 栄一 ⑤ 丸山 一平 ⑥ 長江 拓也 ⑦ 梶原 浩一	堀江建築工学研究所・取締役所長 中部大学・教授 東京大学 地震研究所・教授 山口大学大学院創成科学研究科・教授 名古屋大学大学院環境学研究科・教授 名古屋大学減災連携研究センター・准教授 防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究 センター・センター長	振動実験計画 振動実験計画 データベース検討 評価方法の検討 データベース検討 振動実験計画 振動実験計画
技術 担当者	① 浅井 竜也 ② 清原 俊彦 ③ 迫田 丈志 ④ 高橋 愛 ⑤ 尾畑 徹	名古屋大学 環境学研究科・助教 堀江建築工学研究所・設計部長 堀江建築工学研究所・企画開発部長 堀江建築工学研究所・企画開発課長 堀江建築工学研究所・設計部係長	実験実施 試験体設計 架構解析 評価手法の検討 設計法の検討

第 I 編

令和2年度の調査項目

- 降伏点変形角の評価方法の提案とデータベースによる検証
平成30年度・令和元年度の柱・梁の実験データベースによる提案式の精度検証に引き続き、壁部材のデータベースを用いて提案式の妥当性を評価し、梁・柱・壁部材の検証結果に影響した因子の分析も行う。
- 鉄筋コンクリート造部材の降伏変形に関する確認実験
床スラブ付き梁 部材の力学特性について、コンクリート乾燥による変化を実験的に検証するため、令和元年度報告に続き、令和2年度は、剛性および降伏点がどの程度変化するのかを、未乾燥・乾燥試験体の実験結果を比較することで検証する。
- 大型振動台実験用試験体の検討
建築物の振動減衰を表す数値 h の新たな設定方法の提案に向けて、大型振動台実験による検証をおこなう。

第Ⅱ編 降伏点変形角の評価方法の提案とデータベースによる検証

壁部材に対する評価方法および検証

$$R_y = R_x + R_s + R_b$$

提案式 抜け出しによる変形角 R_x : $R_x = \min \left\{ \frac{L_{p1}}{J_1} \quad \frac{L_{p2}}{J_2} \right\}$ → 柱の主筋と壁板の縁の縦筋による抜け出し変形角をそれぞれ算出し、より小さい方を抜け出し変形角に用いることとした

せん断による変形角 R_s : $R_s = \frac{\kappa Q}{\beta_s G t L}$

曲げ降伏による変形角 R_b : $R_b = \frac{1}{3} \phi_y h$ ここで、断面の曲率 $\phi_y = \frac{2\varepsilon_y}{D}$

データベース

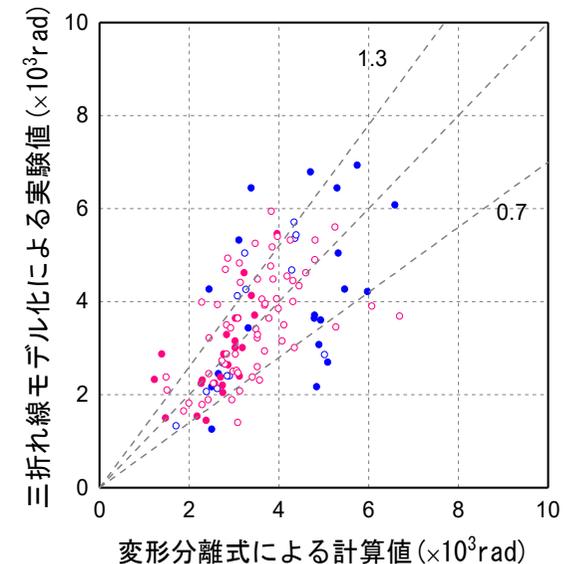
	矩形断面		I形断面	
	曲げ破壊	曲げ・せん断破壊	曲げ破壊	曲げ・せん断破壊
総試験体数	20	21	28	84
除外した試験体	0	7	5	20
1/50(rad.)までに明瞭な降伏点を示していない	0	2	0	12
論文に荷重-変形曲線が記載されていない	0	3	5	7
論文にその他の必要なデータを載せていない	0	2	0	1
採用した試験体	20	14	23	64

実験値における降伏点の定義:

- 壁部材の荷重-変形曲線を三折れ線モデル化し降伏点を抽出した。
- 軸力が降伏点に与える影響(P-Δ効果)を考慮するため、P-Δ効果補正を行った。

比較・検討結果

提案式による降伏点変形角の実験値/計算値の平均値および標準偏差はそれぞれ **1.04, 0.33** となり、**提案式の精度が比較的高い**ことが確認できた。



● 矩形断面・曲げ破壊 ○ 矩形断面・曲げせん断破壊
 ● I形断面・曲げ破壊 ○ I形断面・曲げせん断破壊

第Ⅱ編 降伏点変形角の評価方法の提案とデータベースによる検証

梁・柱・壁部材の検証結果による影響因子分析

影響因子分析

- 梁部材では、コンクリートの圧縮強度、主筋の降伏強度、主筋比、シアスパン比と降伏点変形角の実験値／計算値には明確な相関が見られなかった
- 柱部材では、シアスパン比が大きくなると、降伏点変形角の計算値が実験値に近づく傾向が見られたが、シアスパン比が3.0以上のデータが少ないため、さらに多くの実施データベースを用いて検証する必要がある
- 壁部材では、軸力比が0.15以上の範囲において、軸力比が大きくなるに従って、降伏点変形角（実験値／計算値）が減少する傾向があったが、軸力が高い実験データが少ないため、さらに多くの実施データベースを用いて検証する必要がある

影響因子の組み合わせについての分析

- 柱部材では、高シアスパン比かつ高軸力比の柱部材では、変形分離式による計算値は過大評価となる傾向があった

米国の柱部材のデータベースを用いた再検証

	変形分離式	菅野式
検討試験体数	76体	76体
平均値	0.95	1.24
標準偏差	0.35	1.02
変動係数	0.33	0.82
±30%以内割合	65.2%	29.0%

降伏点変形角の実験値／計算値の平均値および標準偏差がそれぞれ**0.95**、**0.35**となり、昨年度実施した柱部材の検討結果（降伏点変形角の実験値／計算値の平均値および標準偏差はそれぞれ**1.00**、**0.33**）と概ね一致しており、**提案式の精度が比較的高い**ことが分かった

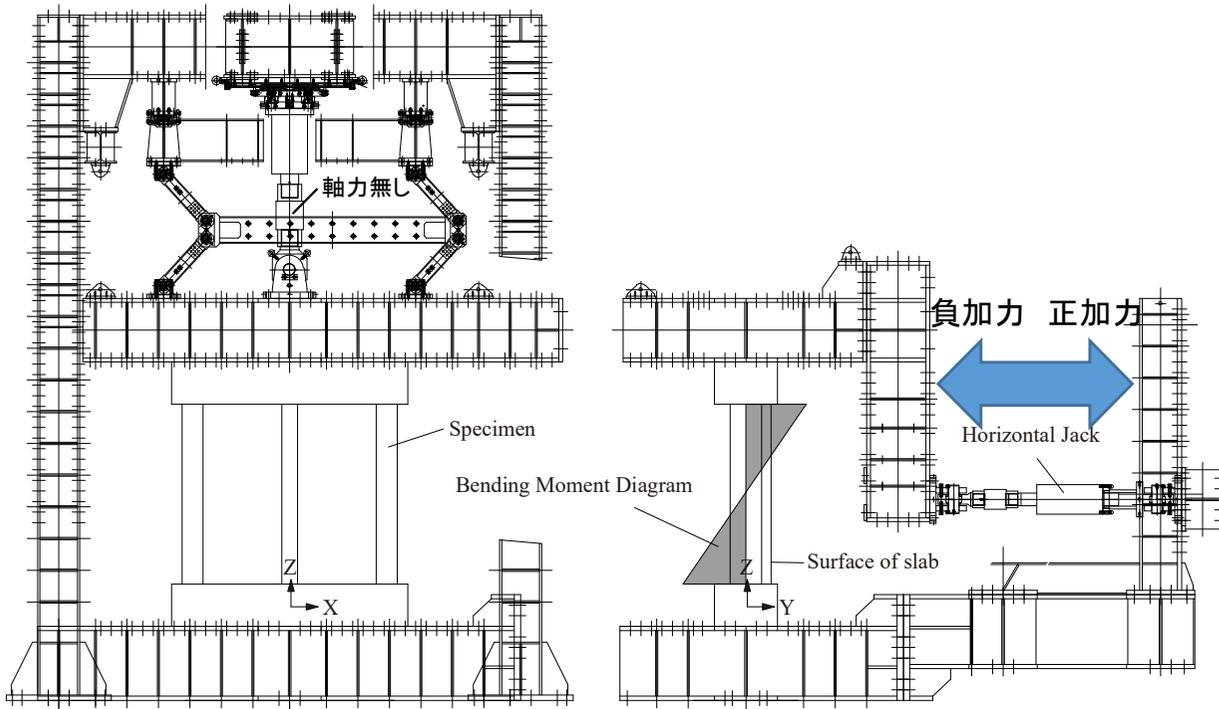
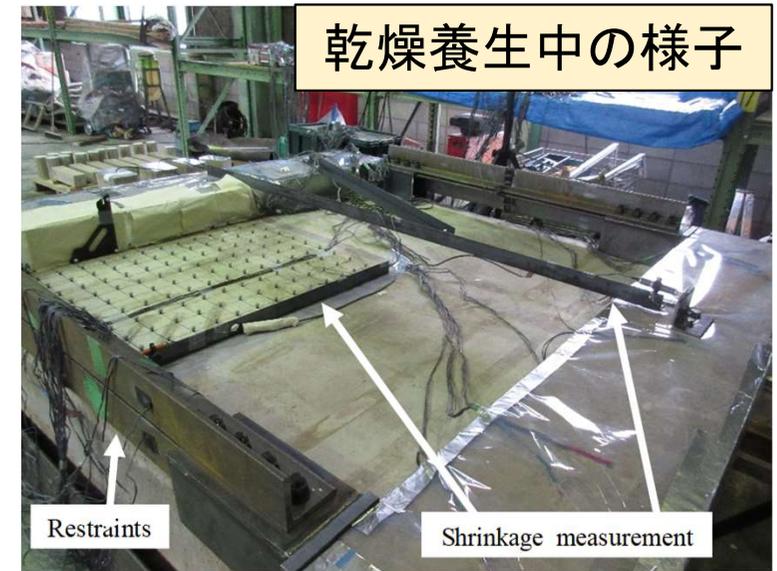
第Ⅲ編

床スラブ付き梁部材の降伏変形に関する実験的検討

コンクリートの乾燥が降伏変形に与える影響分析

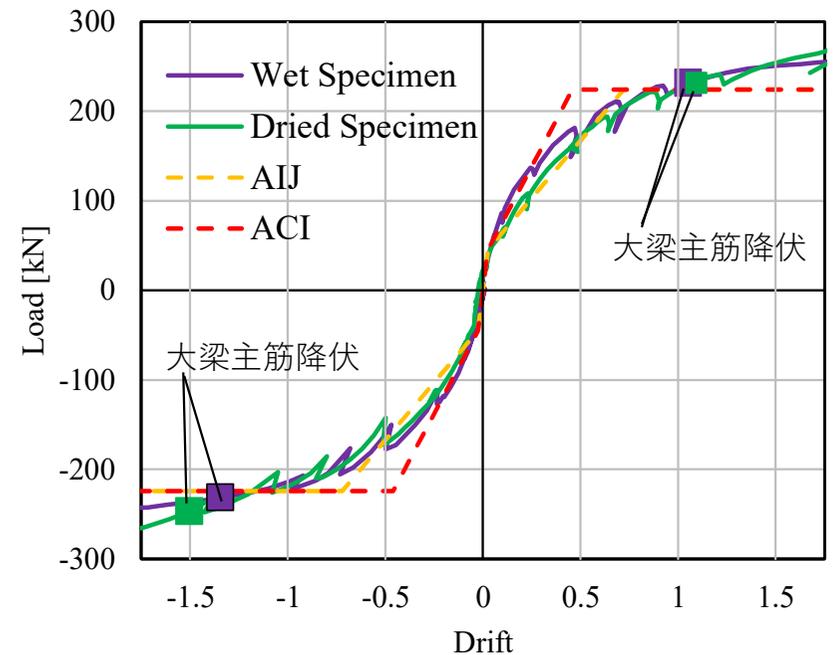
- 2体の試験体を作成し約3か月間水中養生
 - 1体はすぐに載荷
 - もう1体は約10カ月間の乾燥後に載荷
- } 比較

⇒乾燥により初期剛性は76%程度に低下。
 降伏点はほとんど変わらない。



※実験詳細は前年度報告書もしくはSatya et al. 2020, 2021を参照されたい。

載荷装置図



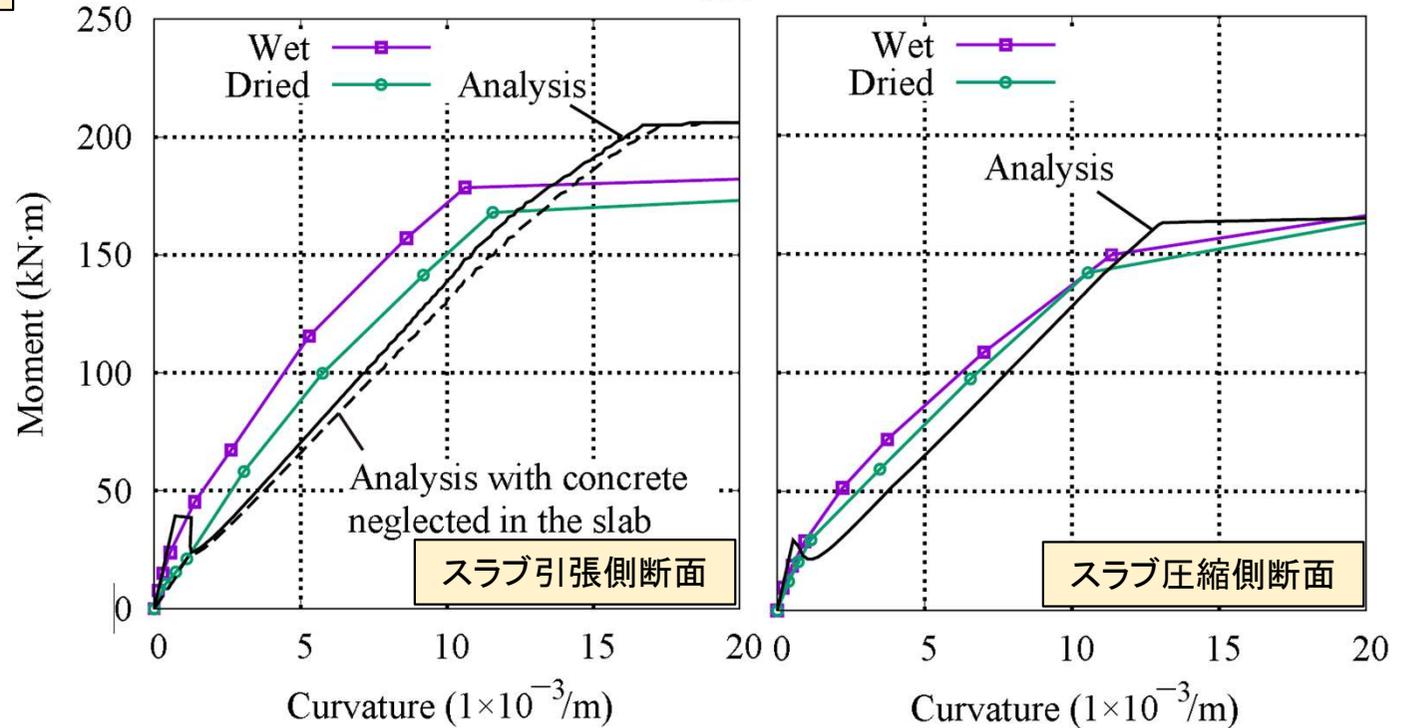
水平力－水平変形角関係

第Ⅲ編

鉄筋コンクリート造部材の降伏変形に関する実験および解析

モーメントー曲率関係

- ・ 上下危険断面位置の結果。
- ・ 反曲点位置は、大梁の主筋ひずみが0となる点として算定。
- ・ 曲率は大梁の圧縮側／引張側主筋ひずみの差をその距離で除して算定。
- ・ Analysisは平面保持仮定に基づく曲げ断面解析結果 (Bentz 2000)。



初期水平剛性: 76%程度に低下

曲げ剛性(EI)は、スラブが引張力を受ける断面で50%程度に低下、圧縮力を受ける断面ではほぼ変化しない。水平剛性は両者の平均的な値に低下した。

- ・ 乾燥収縮ひび割れは主にスラブで生じ、スラブ圧縮時にはそれらがすぐに閉じる。
- ・ スラブ引張側の曲げ剛性は、スラブの剛性寄与を無視することで概ね再現可能。

降伏変形: ほぼ変化しない

乾燥収縮ひび割れの発生により鉄筋の応力が解放されるため。

第Ⅳ編 震動台実験による降伏点評価手法の検討

試験体概要

5階建てRC造 全体崩壊形 防災拠点(耐震ランクII)

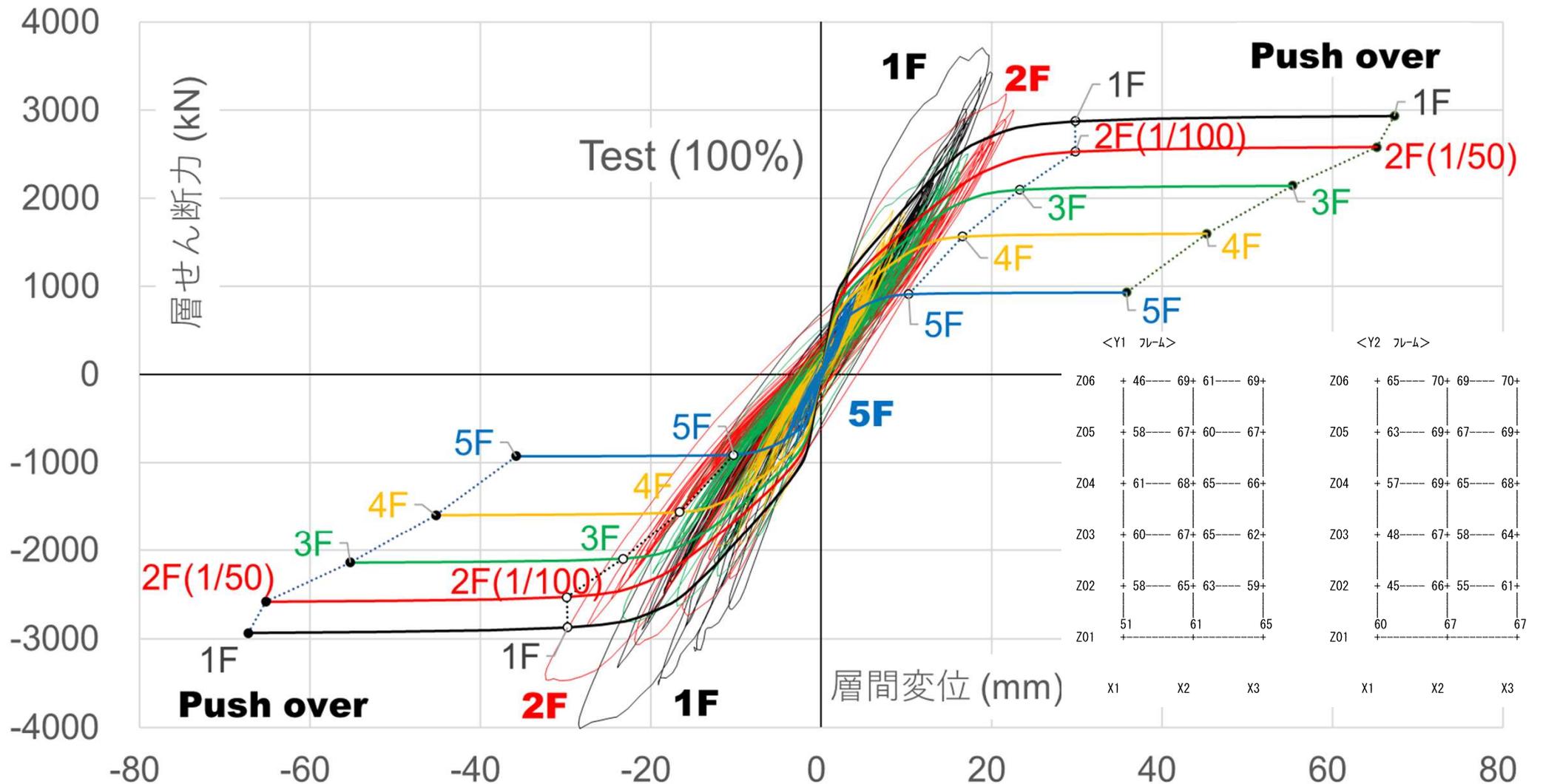


- 高さ1階3.6m, 2～5階3.2m
- 平面寸法 12m×6m
- 柱(mm)480×720, 480×480
- 梁(mm)320×800, 320×640
- スラブ厚200mm
- F_c33
- 固定荷重910kN/基準階

第Ⅳ編 震動台実験による降伏点評価手法の検討

試験体の設計と耐震ランクII(CB=0.4時点で最大1/200以下)

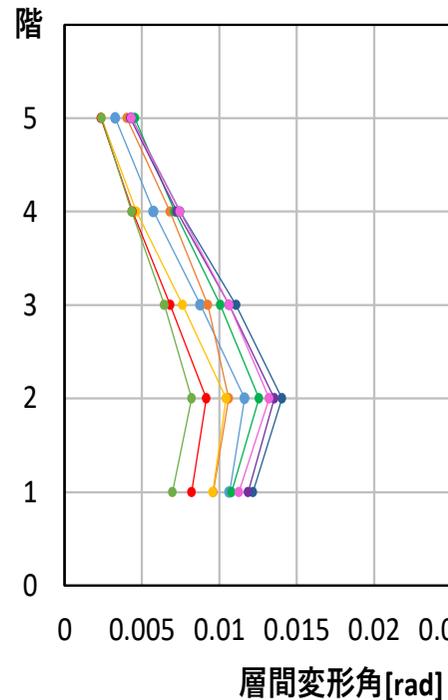
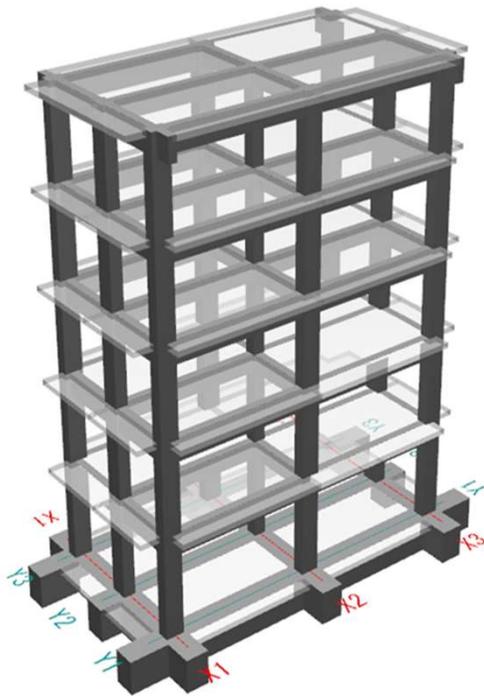
- Q-δ 関係(CB=0.4:1/357, 0.6:1/100, 0.64:1/50)と崩壊メカニズム



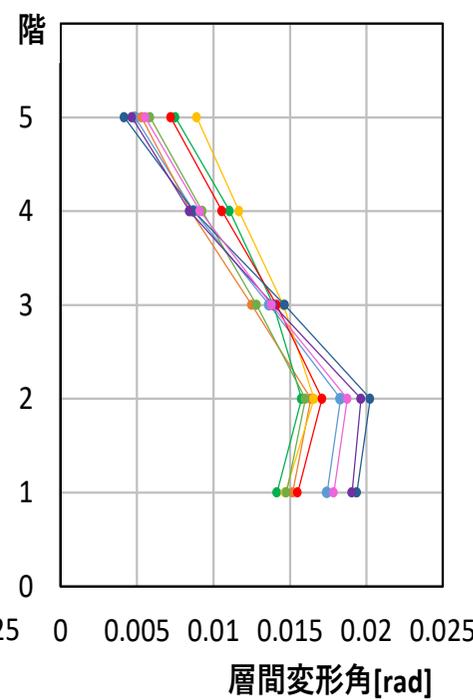
第IV編 震動台実験による降伏点評価手法の検討

事前時刻歴応答解析(入力地震波の選定と入力レベルの決定)

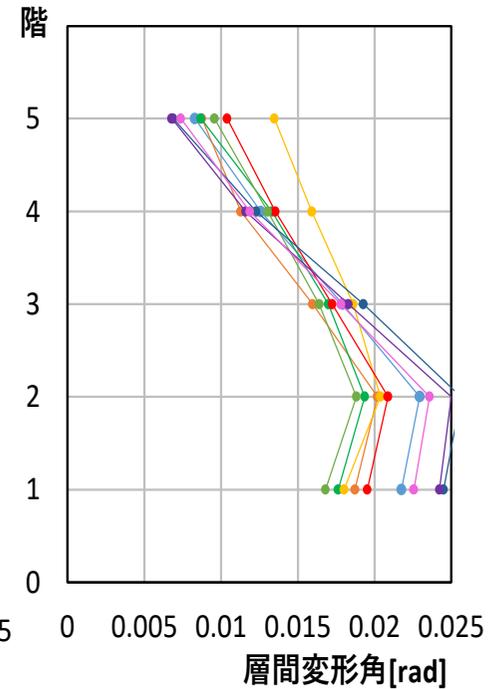
検討地震波: 告示波9種[Z=1、簡易第2種地盤]
(ランダム位相5波と既往の観測波の位相4波)



(a)100% 入力



(b)100%+125%
連続入力



(c)100%+150%
連続入力

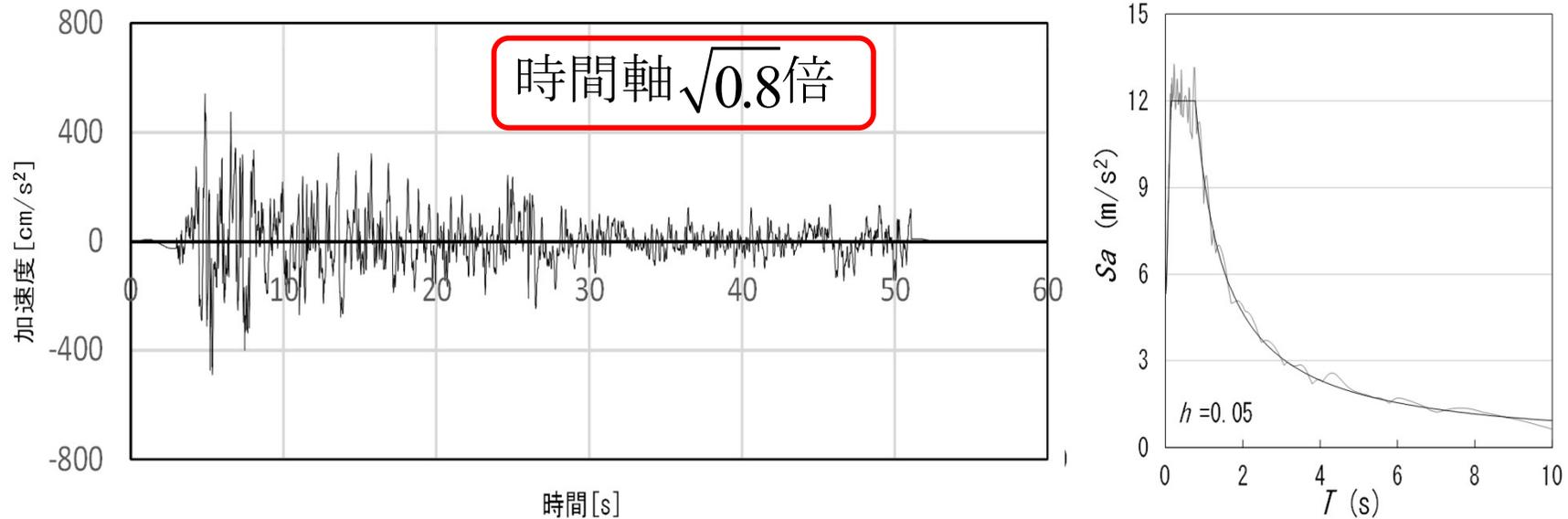
解析モデル

- ・ヤング係数 3種類
 - ・主筋降伏強度 3種類
- 合計9種類

9種類の解析モデルの最大層間変形角
(告示波 [El Centro NS位相])

第Ⅳ編 震動台実験による降伏点評価手法の検討

入力地震波(告示波[EI Centro NS位相] Z=1、簡易第2種地盤)



入力地震波の時刻歴と加速度応答スペクトル(告示波[EI Centro NS位相])

本実験の相似則

変位	α	0.8
時間	$\alpha^{0.5}$	0.894
質量	α^2	0.64
加速度	1	
応力度	1	

α は試験体の縮小率 (=0.8)

加振プログラム

加振	加振レベル
① [R1]	加速度60%
② [R2]	加速度100%
③ [R3]	加速度125%
④ [R4]	加速度125%

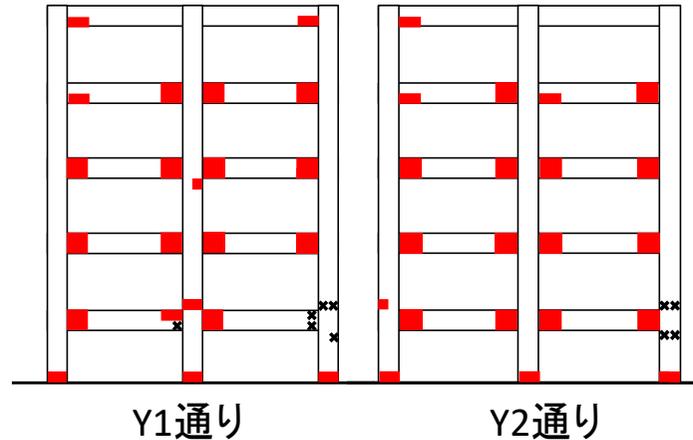
第Ⅳ編 震動台実験による降伏点評価手法の検討

震動台実験結果の概要

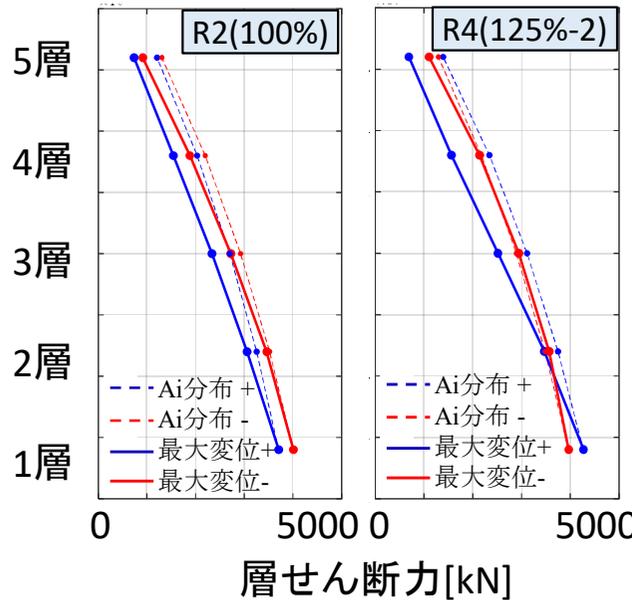
- 主筋降伏はひずみ計測値と材料試験結果に基づき判定。
- 固有周期は各加振後のWN加振のFFTに基づき算定。
- 層せん断力は各階の計測加速度と質量に基づき算定。
- 層間変位は各階床スラブから鉛直方向に張り出した鋼材の相対変位の平均値。

- 試験体は概ね良好な全体降伏形を示した。
- 固有周期は2倍程度まで増大した。
- せん断力分布は変形の増大に伴い直線的になった。
- R4加振(最大層間変形角1/50)まで耐力低下やスリップ性状は見られない。

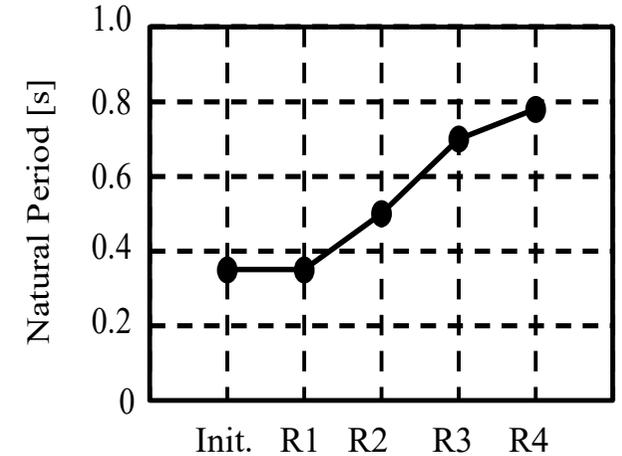
※赤色部は降伏箇所、×はデータ欠損箇所。



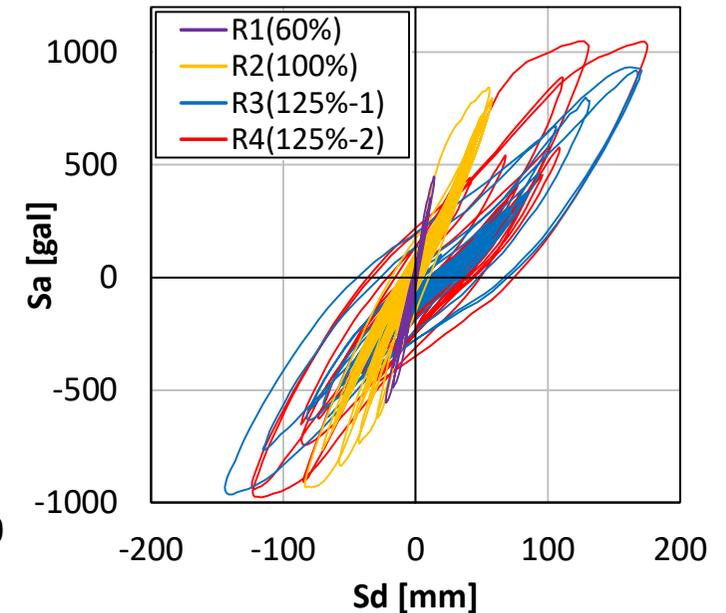
引張主筋降伏図(R4加振)



せん断力分布(最大層間変位時)



固有周期の推移(各加振後)



縮約系のSa-Sd関係

第Ⅳ編 震動台実験による降伏点評価手法の検討

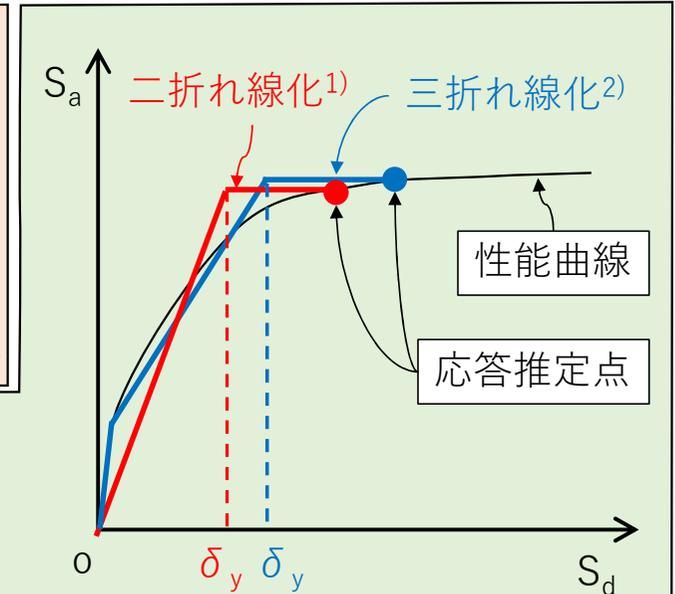
降伏変形評価手法の提案

既往手法 1 : 部材の減衰定数を足し合わせる (式 (1))

$$h_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_y} h_{eq-i} W_i}{\sum_{j=1}^N P_j \delta_j / 2} \quad \dots (1)$$

h_{eq}, h_{eq-i} : 縮約系, 部材端*i*の履歴減衰定数
 W_i : 部材*i*のポテンシャルエネルギー[kN]
 n_y : 降伏部材端数 N : 質点数
 P_j : 質点*j*への水平外力[kN]
 δ_j : 質点*j*の水平変形[m]

⇒適用が比較的煩雑。降伏点を定めないため塑性率の議論ができない。



既往手法 2 : 性能曲線の近似折れ線の折れ点として降伏変形 (および塑性率 μ) を評価し, 式 (2) により算定。

$$h_{eq} = \gamma(1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad \dots (2) \quad \gamma: \text{復元力の形状に関する定数}$$

⇒折れ点から履歴減衰が開始するとは限らない。降伏変形が最大応答点によって変動する。

提案手法 : 式 (4) を満たす降伏変形を評価し, 式 (2) により算定。

・式 (4) は, 式 (1) の両辺を μ で微分し, 縮約系と部材の履歴減衰定数の関係式 (3) を用いて導出される。

$$h_{eq}(\mu) = \left\{ \sum_{i=1}^n W_i / \sum_{j=1}^N P_j \delta_j / 2 \right\} h_{eq-i}(\mu_i) \quad \dots (3)$$

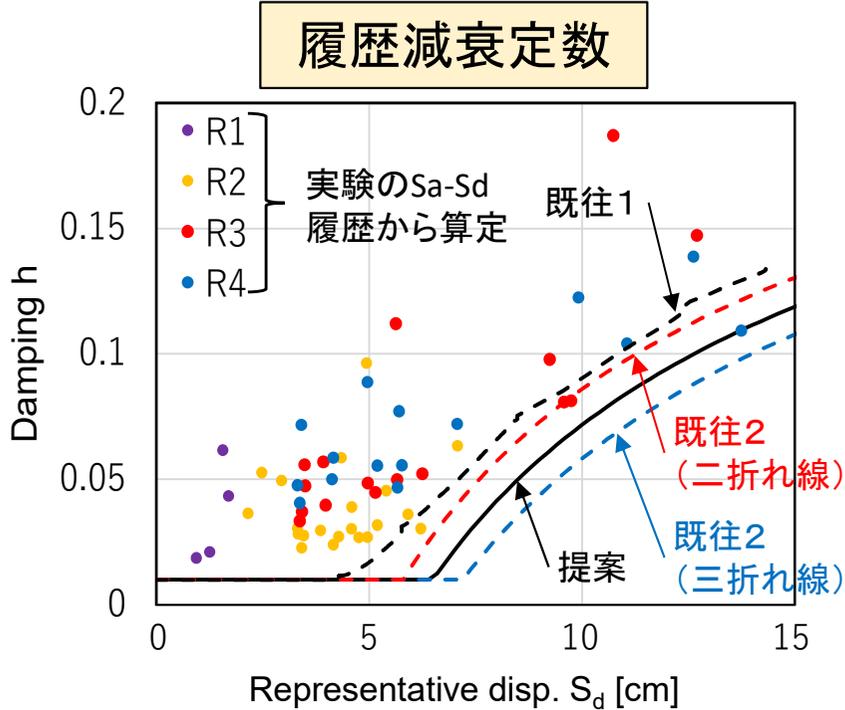
$$\sum_{i=1}^{n_y} \frac{W_{yi}}{\sum_{i=1}^n W_{yi}} \frac{d\mu_i}{d\mu} \Big|_{\mu=1} = 1 \quad \dots (4)$$

h_{eq}, h_{eq-i} : 縮約系, 部材端*i*の履歴減衰定数
 n : メカニズム時にヒンジに到達する部材端数
 W_{yi} : 部材端*i*の降伏時ポテンシャルエネルギー [kN]
 n_y : 降伏した部材端ヒンジの数
 μ, μ_i : 縮約系および部材端*i*の塑性率

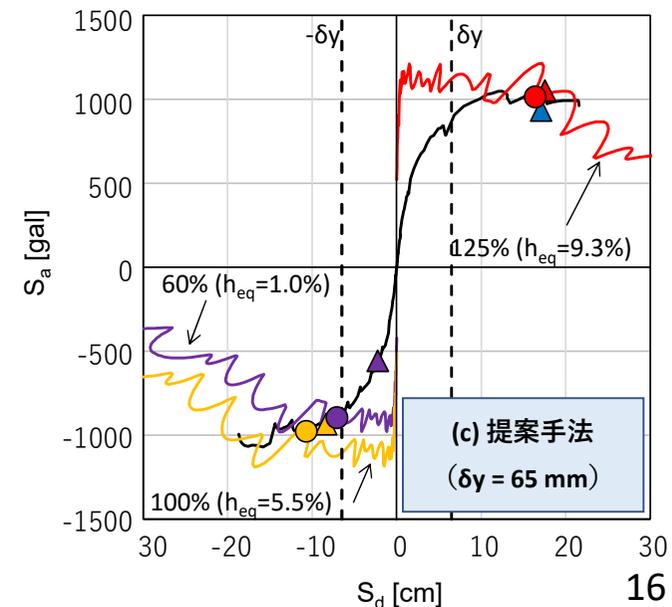
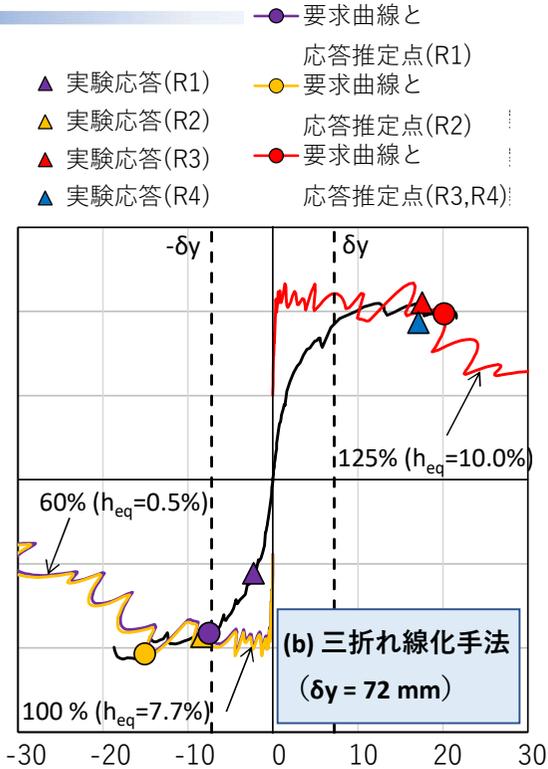
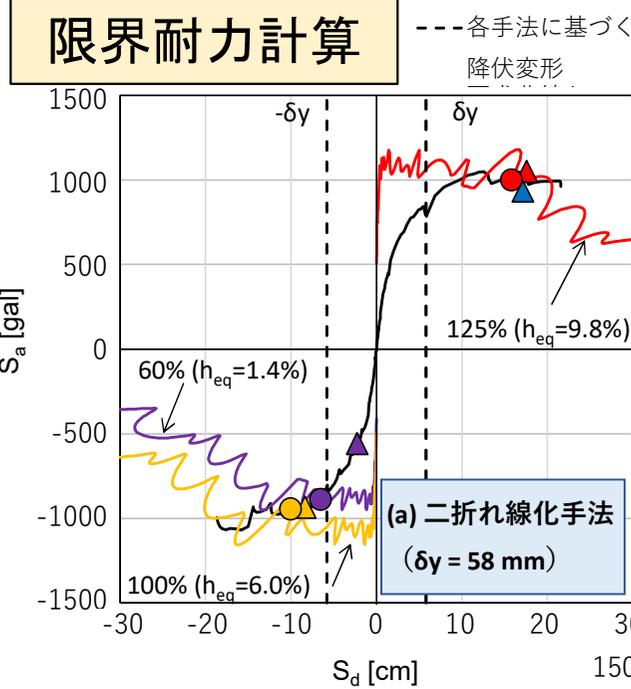
⇒部材の履歴減衰性状を考慮して降伏点を定めることが可能。限界耐力計算への適用も手法1より簡便。

第IV編 震動台実験による降伏点評価手法の検討

提案手法の適用



※推定値はいずれも内部減衰として1%を加えている。
 提案手法および既往手法で $\gamma=0.25$ としている。



- 各手法に基づく履歴減衰定数の算定結果は、いずれも Sa-Sd履歴から得られる結果と概ね整合した。
- 限界耐力計算結果は、R1加振を除き、二折れ線化手法および提案手法が比較的实验結果と近い値となった。
- 応答算定結果に依存せず、なおかつ限界耐力計算への適用が比較的簡便な降伏点評価手法を提案した。

第V編 調査事項に対する提案

- ・部材の降伏点変形角を評価する新たな提案式について、これまでの柱・梁部材のデータベースに引き続き、壁部材のデータベースを用いて提案式の妥当性を評価し、梁・柱・壁部材の検証結果に影響した因子の分析を行った結果、提案式の精度が比較的高いことが確認できた。
- ・床スラブ付き梁部材の剛性および降伏点が、コンクリートの乾燥によりどの程度変化するのかを、未乾燥・乾燥試験体の実験結果を比較することで検証した結果、初期剛性は、乾燥により76%程度に低下したが、既往の他部材の事例と比べると小さく、降伏点の変化はほとんど見られなかった。
- ・建築物の振動減衰を表す数値 h の新たな設定方法の提案に向けて、大型振動台実験による検証を行い、各部材端の降伏時ポテンシャルエネルギーと、それらの塑性率を用いて降伏変形を定義する式を提案し、提案手法により評価した降伏変形に基づく架構の履歴減衰定数は、実験結果の下限包絡線(すなわち定常ループでの履歴減衰定数)と良好に対応することを確認した。また、得られた履歴減衰定数を用いて、限界耐力計算に基づき各加振の最大応答推定を行ったところ、二折れ線化手法および提案手法が比較的实验結果と近い値となった。