

論文 大振幅後に小振幅の変形を受ける鉄筋コンクリート柱の除荷剛性に関する基礎的分析

渡邊 泰宏*1・真田 靖士*2・崔 琥*3・Huanjun Jiang*4

要旨: 構造実験データベースを用いて、大振幅後に小振幅の変形を受ける鉄筋コンクリート柱の除荷剛性について検討した。最大変形を更新した直後の除荷剛性とその後的小振幅載荷時の除荷剛性を4ケース定義し、相関が高いケースを抽出した。その結果、最大変形を更新した直後の最大変形点と除荷点を結ぶ割線剛性と、小振幅載荷時の正負最大変形点を結ぶ割線剛性の相関が相対的に高かった。そこで、Takeda modelに基づいて小振幅時の除荷剛性（微動計測等から得られる剛性）から最大経験変形を推定し得る可能性を示した。また、柱試験体のマルチスプリングバネによる解析を行い、実験結果と同様の傾向が得られることを示した。

キーワード: RC, 荷重-変形関係, 除荷剛性, 最大経験変形, データベース, 数値解析

1. はじめに

地震災害は人的、経済的な犠牲を伴い後世の地震防災に重要な知見を残す。途上国で発生する地震災害は先進国よりも遥かに甚大な犠牲を伴うが、強震観測をはじめとする研究体制が乏しいため、災害から得られる知見は概して少ない。

例えば、写真-1は2009年インドネシア・スマトラ島沖地震で損傷した鉄筋コンクリート造（以下、RC）建物であり、日本建築学会の災害調査団により詳細な被害調査が実施されたが¹⁾、建物近傍の強震記録がないため、建物の地震応答や被害分析に限界があった。

そこで、本研究では被災建物の地震後の微動観測記録などの振動特性データに基づいて、建物の地震時の応答を推測する方法を構築することを目的とする。本稿では、RC部材の除荷時剛性に着目して、実験データベースより得られる実験データおよび筆者らによる解析データに基づき基礎的な検討を行った。



写真-1 インドネシア・スマトラ島沖地震で損傷したRC建物

2. 実験データベースに基づく分析

研究対象建物として写真-1に示したRC建物¹⁾を設定し、代表的な柱と同様の構造特性を有する試験体について除荷剛性に着目して分析する。本建物は2009年インドネシア・スマトラ島沖地震の被災建物であり、同国の典型的な中層RC構造である。建物の構造詳細については文献1)を参照されたい。

2.1 大振幅後に小振幅の変形を受ける柱の実験の抽出

本研究では、構造実験データベースであるSPD (PEER Structural Performance Database)²⁾から、大振幅後の小振幅載荷された柱の実験を、対象実験として抽出した。

表-1に抽出条件と対象実験を示す。抽出条件は、研究対象建物の最大被災層である3階の代表的な柱の断面形状、せん断スパン比、引張鉄筋比、軸力比が近似すること、並びに、大振幅後の小振幅載荷が行われたこととした。とくに後者の抽出条件は、対象建物の除荷時剛性に基づいて、建物の最大応答変形を予測する手法の実現可否について検討するための条件である。結果的に、同表の3実験(#51~#53)³⁾が上記抽出条件に該当した。なお、実験名称は文献2)より引用した。

表-1 SPD²⁾から抽出した対象実験と抽出条件

	断面形状 (b/D)	せん断スパン比 (M/Qd)	引張鉄筋比 (%)	補強鉄筋比 (%)	軸力比 (N/bDF _c)	大振幅後の小振幅
抽出条件	1.0	3.9	0.57	—	0.115	○
文献3)	#51	1.0	3.0	0.61	0.38	0.119
	#52					○
	#53					○

*1 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 大学院生 (学生会員)

*2 大阪大学 大学院工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 助教 博士(工学) (正会員)

*4 Professor, Ph. D., College of Civil Engineering, Tongji University

2.2 対象実験の概要

図-1 に、上記の通り抽出した対象実験における試験体の形状および配筋を示す。試験体の形状および配筋は共通であり、内法高さが 1500mm、断面寸法が 250×250mm である。配筋は主筋が 9-D13、補強筋が φ5.5@50 である。表-2 に、対象実験における試験体の材料強度を示す。

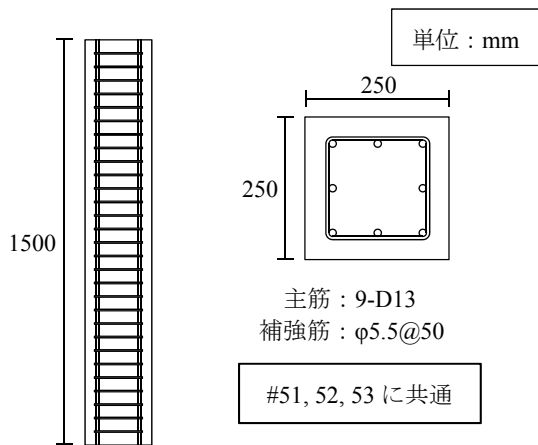


図-1 対象実験における試験体の形状および配筋

表-2 対象実験における試験体の材料強度

対象実験		コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	主筋 降伏強度 (N/mm ²)	補強筋 降伏強度 (N/mm ²)
文献 3)	#51	24.8	374	352
	#52	27.9	374	506
	#53	27.9	374	506

図-2 に荷重方法を示す。荷重方法は全実験に共通である。柱の反曲点高さは試験区間の中央であり、逆対称曲げを受けるように水平荷重された。鉛直方向には一定の軸力が与えられ、軸力レベルは表-1 に示した通りである。

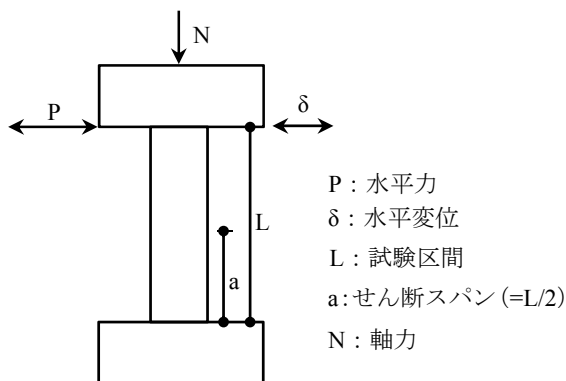


図-2 対象実験の荷重方法

図-3 に対象実験の水平変位の荷重履歴を示す。荷重履歴は、地震応答の様相を呈しており、大振幅後の小振幅を含んでいることがわかる。

図-4 に対象実験の荷重変形関係を示す。対象実験の柱は大きな耐力低下を生じておらず、被災度区分判定基準⁴⁾における損傷度 V 未満であると考えられ、以下の議論の適用範囲を意味する。

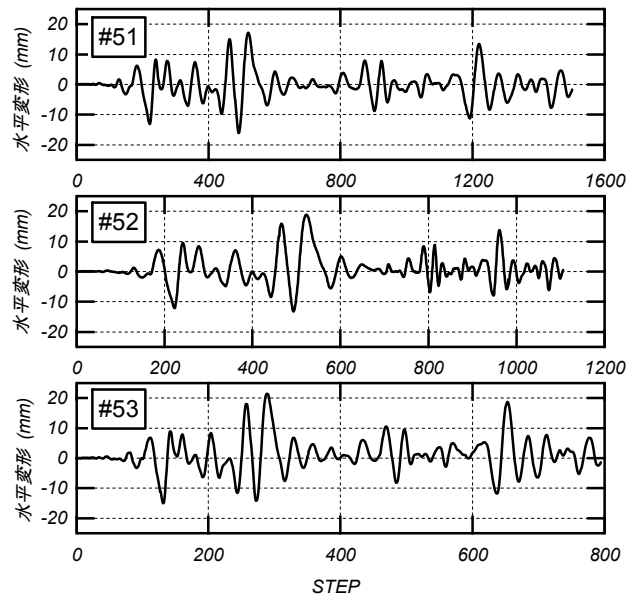


図-3 対象実験の荷重履歴

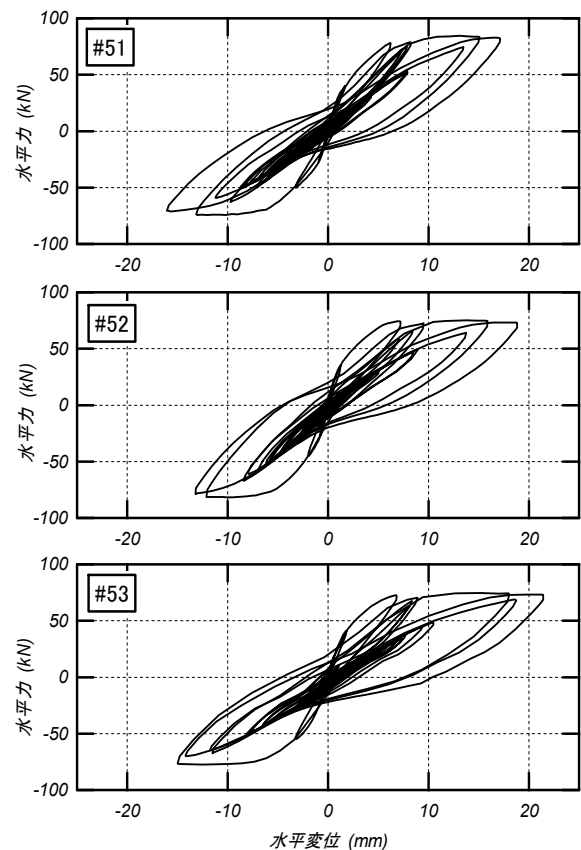


図-4 対象実験の荷重変形関係

2.3 除荷剛性に関する分析

本項では、大振幅時（最大経験変形を更新した時）の除荷剛性と小振幅時（その後の最大経験変形を超過しない載荷サイクル時）の除荷剛性について比較検討する。ここでは両除荷剛性を以下の4通りの組み合わせで定義し（図-5）、比較する。

- (a) 大小振幅時ともに除荷終了時の接線剛性を用いる。これは除荷点での瞬間剛性に相当する。
- (b) 大小振幅時ともに最大変形点と除荷点を結ぶ割線剛性を用いる。この剛性は例えば Takeda Model⁵⁾などの部材履歴モデルの除荷剛性におよそ相当すると思われる。
- (c) 大振幅時においては最大変形点と除荷点を結ぶ割線剛性を、小振幅時には接線剛性を用いる。
- (d) 大振幅時においては最大変形点と除荷点を結ぶ割線剛性を、小振幅時には正負の最大変形点を結ぶ割線剛性を用いる。とくに後者は振幅が漸減した場合に最終的に収束する剛性となることを想定した。

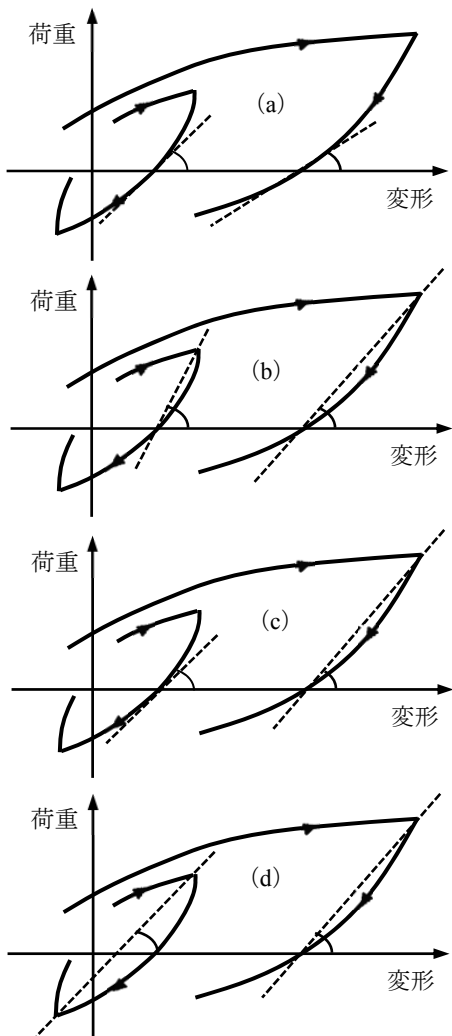


図-5 比較検討を行う除荷剛性の組合せ

図-6 に上記のケース (a)～(d)の除荷剛性を比較した結果を示す。同図の横軸は大振幅時の除荷剛性を、縦軸は小振幅時の除荷剛性を示す。ケース (a), (b)においては小振幅時の除荷剛性が大振幅時を総じて上回る結果となった。一方、ケース (c), (d)においては大振幅時と小振幅時が平均的に対応し、ケース (d) はケース (c) よりばらつきが小さく、誤差 20%程度で両者がおよそ対応する結果であった。この性質の一般性については今後の議論を要するが、本実験の範囲内ではケース (d) が RC 部材の履歴モデルに相当するケース (b) よりも相関が強い傾向が得られた。

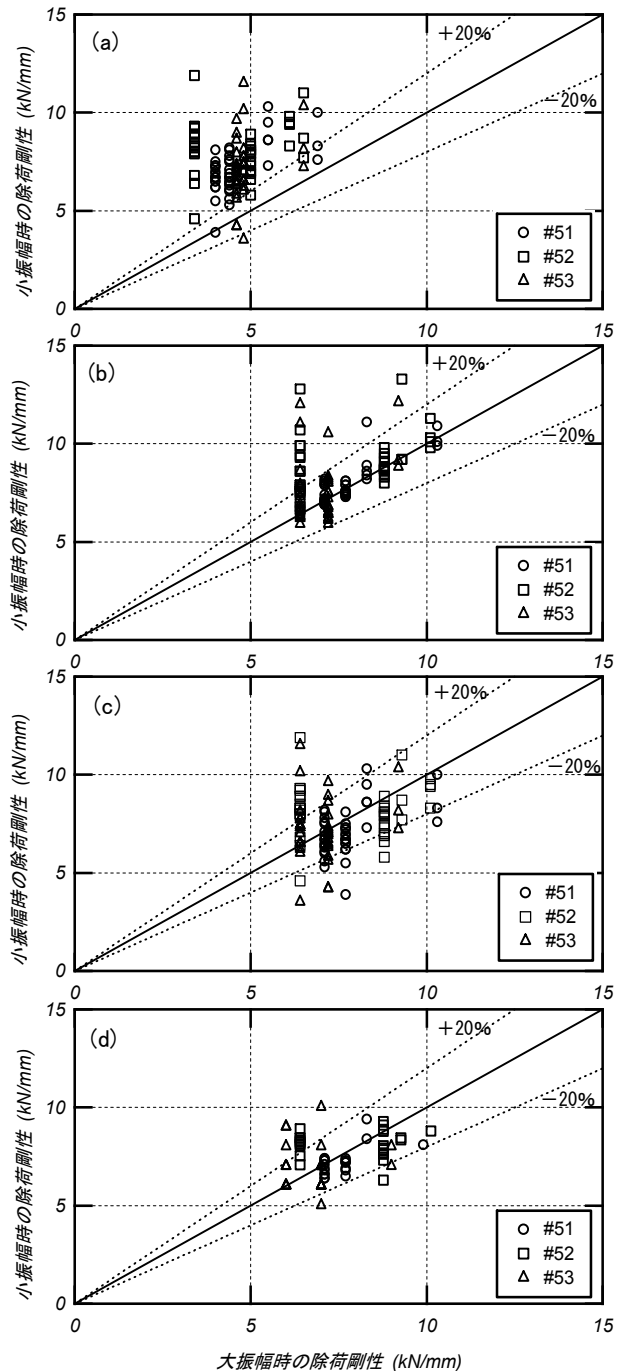


図-6 除荷剛性の比較

2.4 除荷剛性に基づく最大応答変形の推定

前節のケース(d)の組み合わせを用いた場合に、小振幅時の除荷剛性が大振幅時の除荷剛性と最も対応した。

そこで本節では、Takeda model⁵⁾を例として、最大応答変形後の小振幅時の除荷剛性を用いて、部材が経験した最大応答変形を推定する手法を整理する。

(1) 推定手法

図-7に推定手法の概念図を示す。

RC部材の履歴特性モデルであるTakeda model⁵⁾において、部材降伏後の除荷剛性は式(1)で定義されている。

$$K_u^+ = \frac{f_y^+ - f_c^-}{d_y^+ - d_c^-} \left(\frac{d_m^+}{d_y^+} \right)^{-\gamma} \quad (1)$$

ここに、 K_u ：除荷剛性、 f_y ：降伏強度、 d_y ：降伏変形、 f_c ：ひび割れ強度、 d_c ：ひび割れ変形、 d_m ：最大経験変形、 γ ：除荷時指数である。また、添字の±は正側負側いずれの値であるかを示しており、符号を逆転することで、負側についても同様に定義される。

ここで、式(1)を最大経験変形 d_m^+ について解くと式(2)が得られる。

$$d_m^+ = \sqrt[\gamma]{\frac{f_y^+ - f_c^-}{(d_y^+ - d_c^-) K_u^+}} d_y^+ \quad (2)$$

式(2)の右辺は除荷剛性 K_u^+ のみが未知数である。ここで、大振幅後の小振幅時の除荷剛性から大振幅時の除荷剛性 K_u^+ を評価することで、大振幅後の小振幅時の除荷剛性から最大経験変形を推定し得る。

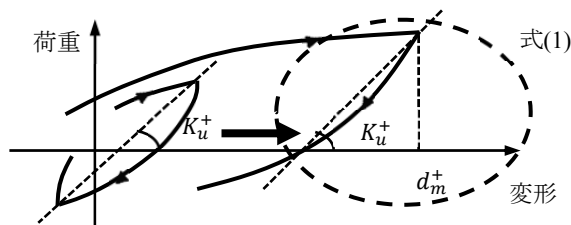


図-7 最大応答変形の推定手法

(2) ケーススタディ

前項の式(2)を用いて最大経験変形の推定を行う。推定対象は2.1節で抽出した3試験体である。推定に必要な試験体の構造特性は文献3)を参考に表-3に示す。ただし、降伏変形は図-4の荷重-変形関係の包絡形状を考慮して10.0mm(部材角1/150rad.)とした。なお、同表の除荷時指数は上記の仮定の下に各試験体について同定した最大経験変形更新時の除荷時指数の平均値である。ただし、平均値の算出では0.0~1.0の範囲にない一部の数値は除外した。これは、負の除荷時指数は、降伏後の除荷剛性が降伏時の除荷剛性を上回り、1.0を超える除荷時指数は降伏後の除荷点が降伏時の除荷点よりも小さくなる場合があるためである。上記の通り仮定した性能曲線を#53試験体の実験結果と比較して図-8に例示する。

表-3 推定に用いた諸性能

ひび割れ荷重 f_c (kN)	降伏荷重 f_y (kN)	ひび割れ変形 d_c (mm)	降伏変形 d_y (mm)	除荷時指数 γ (-)
36.3	77.3	2.7	10.0	0.70(#51)
				0.50(#52)
				0.67(#53)

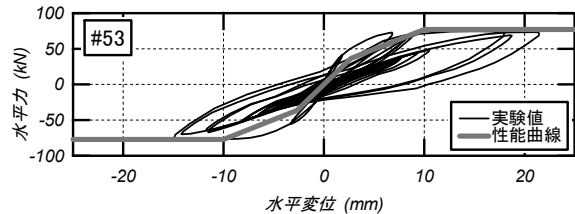
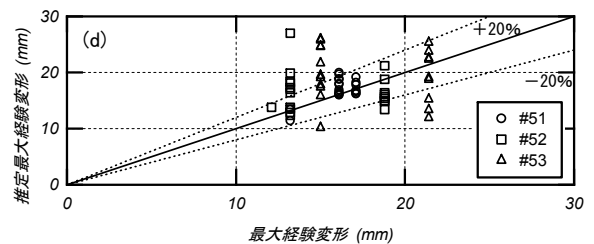


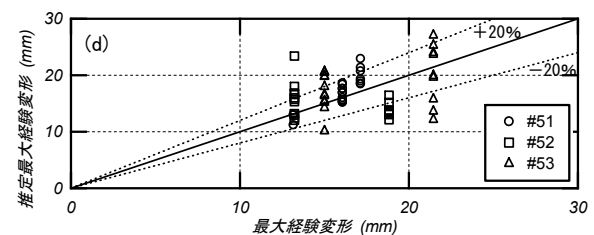
図-8 性能曲線の検討

推定は大振幅時と小振幅時の除荷剛性が最もよい対応を示したケース(d)を対象として行った。入力データとして式(2)の K_u^+ に図-6の縦軸の小振幅時除荷剛性を与え、最大経験変形の推定値 d_m^+ を得た。

図-9(a)に推定した最大経験変形を実験値と比較した結果を示す。実験では最大経験変形の更新(大振幅)後に複数の小振幅変形(小振幅時除荷剛性)が存在するため、同図の推定値は複数評価されている。表-3に示したように試験体ごとに一定の除荷時指数を用いた結果、図-6よりやや推定精度が低下した。参考として図-9(b)に大振幅後の真の除荷時指数を用いた場合の結果を示す。真の除荷時指数は、式(1)の d_m^+ に最大経験変形、 K_u^+ に最大経験変形時の除荷剛性を与えることで算出した。この場合、推定精度が図-6程度に改善されるため、図-9(a)で見られたより大きなばらつきの原因は、最大経験変形時の除荷剛性を表-3の除荷時指数によって精度よく評価できなかったためと判断される。



(a) 表-3の除荷時指数を用いた場合



(b) 真の除荷時指数を用いた場合

図-9 最大経験変形の推定値と実験値の比較

3. 数値解析による実験結果の再現性の検証

2.1 節で抽出した 3 実験を対象としてシミュレーション解析を行い、実験結果より得られた除荷剛性に関する相関を数値解析によっても再現できることを確認する。

3.1 解析方法

(1) 部材のモデル化

各試験体のマルチスプリングバネを用いたモデル化の方法を図-10 に示す。

部材の長さ方向のモデル化を材端と中央部に分けて行った。材端については、試験体断面をコンクリート要素と鉄筋要素に分割し、各要素を弾塑性軸バネとすることで塑性化を考慮できるようにモデル化した。塑性ヒンジ長 L_p は断面せいの半分とした。中央部は弾性の線材要素とした。下端の境界条件を固定とし、図-2, 3 に示した荷重方法、荷重履歴の下に、変位制御による静的解析を行った。

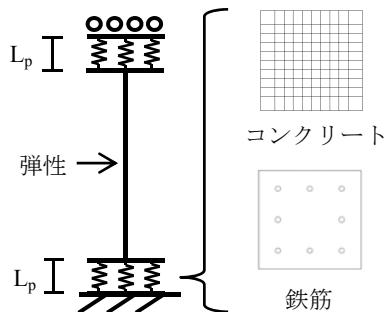


図-10 試験体のモデル化

(2) 材料モデル

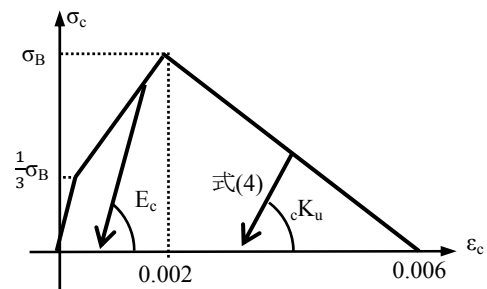
解析には、汎用構造解析ソフト SNAP⁶⁾を用いた。解析で用いた材料の応力歪関係モデルを図-11 に示す。コンクリートについては、圧縮強度の 1/3 の強度までを弾性剛性とし、その後圧縮強度を指向し、強度到達後は強度低下するトリリニアモデルを仮定した。ここで、コアコンクリートでは、補強筋の拘束効果を式(3)⁷⁾により考慮して圧縮強度を評価し、圧縮強度時歪度 0.002 と仮定した。また、強度到達後の負勾配は圧縮歪度 0.006 を指向するように設定したが、圧縮強度時歪度を大きく超過した (0.004 程度) コンクリート要素はかぶり部分のみであった。さらに、コンクリートの除荷勾配については、最大強度前は弾性剛性とし、最大強度後は式(4)に従って定めた。一方、鉄筋にはバイリニアモデルを仮定した。鉄筋の除荷勾配は弾性剛性とした。材料強度は表-2 に示したとおりである。

$${}_c\sigma_{cB} = {}_c\sigma_B + \kappa\rho_h\sigma_{hy} \quad (3)$$

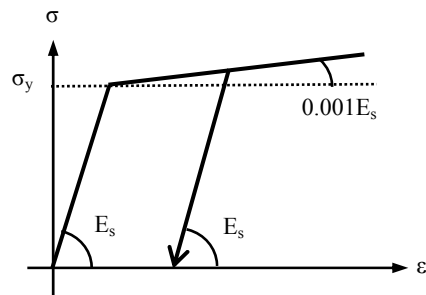
$${}_cK_u = E_c \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_B} \right)^{-c\gamma} \quad (4)$$

ここに、 ${}_c\sigma_{cB}$: コンファインドコンクリートの圧縮

強度 (N/mm^2)、 ${}_c\sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度 (N/mm^2)、 κ : 補強筋の拘束効果に関する係数で文献 7) を参照、 ρ_h : 補強筋比、 σ_{hy} : 補強筋の降伏強度 (N/mm^2)、 ${}_cK_u$: コンクリートの強度到達後の除荷剛性、 ε_B : コンクリート強度到達時の歪 ($=0.002$)、 ε_m : 最大経験歪度、 ${}_c\gamma$: コンクリートの除荷時指数 (本解析では 0.4 と仮定した) である。



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-11 材料モデル

3.2 荷重変形関係の再現性

図-12 に #53 試験体を例に荷重-変形関係について解析結果を実験結果と比較して示す。骨格曲線および履歴形状を比較的精度よく再現することができた。

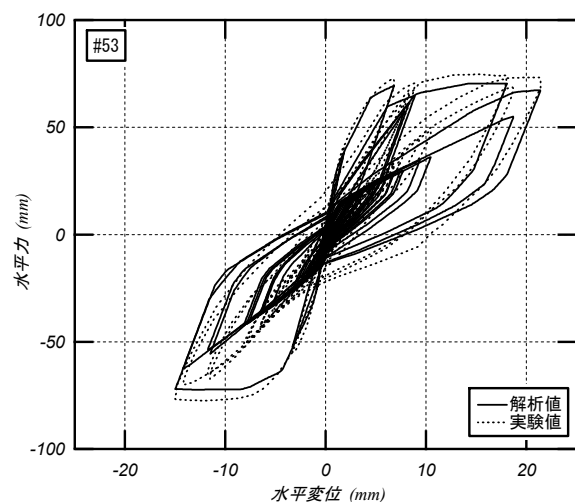


図-12 #53 試験体の荷重変形関係の再現性

3.3 除荷剛性に関する分析

上記の解析結果を用いて、2章と同様に除荷剛性について比較検討を行った。

図-13に除荷剛性を比較した結果を示す。図-6と比較すると、解析結果は大振幅時の除荷剛性を総じてやや低く評価しており、解析モデルの改善の余地がある。しかし、2.3節のケース(a)～(d)の大振幅時と小振幅時の除荷剛性の相関については、解析結果は実験結果と同様の傾向を示し、ケース(d)が両者の相関が最もよかった。ただし、解析結果は実験結果よりもばらつきが大きい。以上より、今後解析的に大振幅後の小振幅変形を再現し除荷剛性の評価を行うには、付着劣化を考慮する、コンクリートの引張側の材料特性をモデル化するなど、解析モデルの修正が必要と判断される。

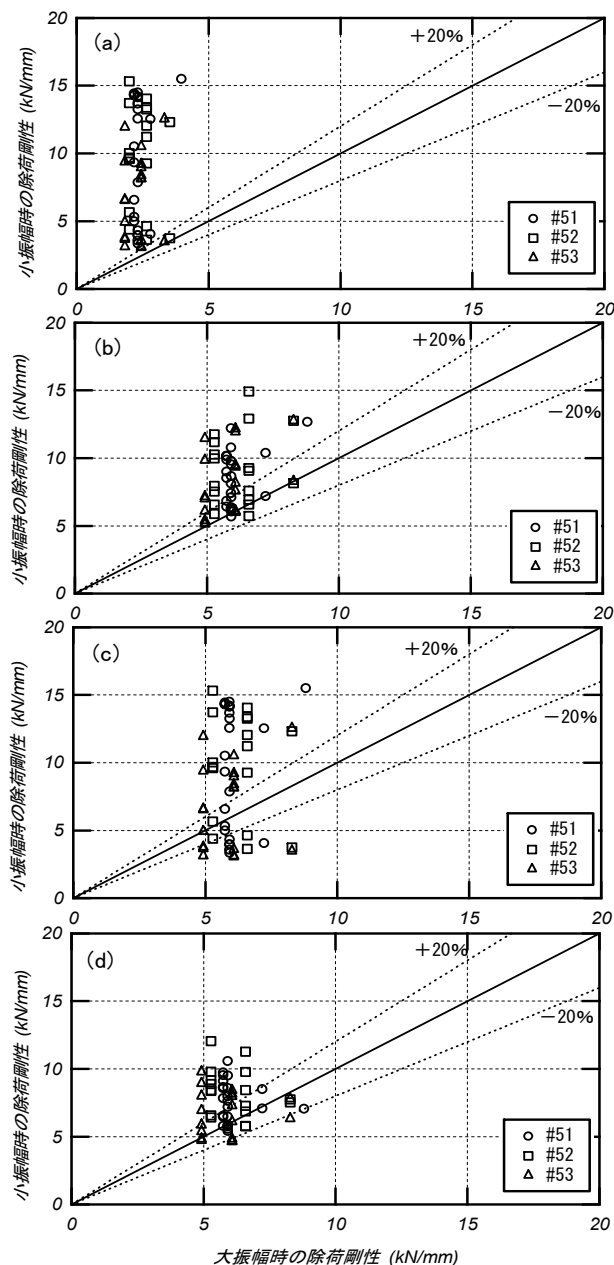


図-13 解析結果の除荷剛性の比較

4. まとめ

本稿の検討により得られた知見を以下に示す。

- 実験データベースより抽出した大振幅後の小振幅変形を受ける柱試験体の実験データを用いて、最大変形を更新した大振幅時の最大変形点と除荷点を結ぶ割線剛性が、その後の小振幅載荷における正負最大変形点を結ぶ割線剛性と相関があることを示した。
- 上記の特性を利用して、大振幅後の小振幅時の除荷剛性から最大経験変形を推定する手法を示し、上記の実験を対象に推定手法を適用した結果を例示した。
- 上記の柱試験体を、マルチスプリングバネを用いてモデル化したシミュレーション解析を行い、実験結果をおよそ再現できることを確認した。とくに大振幅時と小振幅時の除荷剛性の関係は、実験結果と同様に、大振幅後の割線剛性と小振幅時の正負最大変形点を結ぶ割線剛性の対応がよい結果が得られた。

以上の検討結果は、本稿で採用した構造特性を有する柱に限定した結果であるが、微動計測等から得られる剛性から最大経験変形を評価し得る可能性を示した。今後引き続き、構造特性が異なる場合についての検討や、普遍的な除荷特性の分析が必要である。

参考文献

- 1) 倉本洋, 真田靖士, 崔琰, 坂下雅信, 日比野陽, 壁谷澤寿一, 秋田知芳: 2009年インドネシア・スマトラ島西部地震の調査速報, 建築雑誌, Vol.125, No.1601, 日本建築学会, pp.55-62, 2010.3
- 2) PEER Structural Performance Database (SPD, <http://nisee.berkeley.edu/spd/>)
- 3) 小野新, 石丸辰治, 安達洋, 白井伸明, 中西三和, 神田亮: オンラインシステムによる擬似動の実験の誤差評価に関する研究—その5・鉄筋コンクリート造柱の弾塑性実験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.197-198, 1985.10
- 4) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2002.8
- 5) T. Takeda, M. A. Sozen and N. M. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, 1970.12
- 6) 株式会社 構造システム: 任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム, SNAP Ver. 6, 2012.3
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004.1