

論文 主筋抜け出しを考慮した応答解析に基づく RC 建物の地震損傷解析

田島 徹也 *1 · 白井 伸明 *2 · 森泉 和人 *3

要旨：本論では、まず、ファイバー要素および主筋の抜け出しファイバー要素を用いた RC 骨組建物の地震応答解析法を定式化し、本応答計算モデルを実大 3 層 RC 骨組の振動台実験の解析に適用した。計算結果は試験体の応答性状を高精度に追跡し、モデル化の妥当性が確認された。次に、応答計算結果に対して最大応答変形による損傷と繰返し劣化を考慮した地震損傷解析法を適用した。最大応答変形と繰返し劣化の両者を考慮した地震損傷解析は、前者のみ考慮した RC 骨組建物の損傷評価に比べ、試験体が受けた損傷を実際的に捉えていることが分かった。

キーワード：損傷解析, 構造解析, RC 骨組建物, 性能評価

1. はじめに

兵庫県南部地震では多くの建築・土木構造物が被災したことから、これまでの仕様規定型設計手法の反省を踏まえ、より明確に構造物の目標性能を規定する設計法を検討する動きが活発になっている。RC 建物についても幾つかの提案がなされているが、その多くは単純な応答解析モデルによる計算結果に基づいて定式化された構造的な性能評価法であるため、実現象との対応はまだ不透明な部分が多いと思われる。本研究では、まず、接合部からの主筋の抜け出しを考慮した比較的精緻な骨組応答解析モデルを定式化し、梁降伏先行型実大 3 層 RC 骨組の振動台試験¹⁾の解析を通じて応答解析モデルの妥当性を確認する。次に、応答計算結果に基づいて、最大応答変形による損傷および繰返し劣化による損傷に注目した損傷解析を行い、部材および材料レベルの損傷について詳細な検討を試みる。

2. 損傷解析手法

2.1 応答解析モデル

本研究では、RC 骨組建物の応答計算に動的弾塑性平面骨組解析プログラム“DRAIN-2DX”²⁾を用

用する。RC 骨組の離散化および材料モデルの定式化は次のように行った。

- 1) 梁および柱部材は全てファイバーモデルにより離散化し、材軸方向には両端のみを細かくした 6 つのスライス分割、各断面は 12 のファイバー分割を行う。図-1 に、コンクリートファイバーに仮定される応力(σ) - ひずみ(ϵ) 関係を示す。なお、鉄筋ファイバーには、バイリニア型の応力 - ひずみ関係を付与する。
- 2) 接合部からの主筋の抜け出しを考慮するため、ファイバーモデルによる梁端部および 1 層柱脚部分に抜け出しファイバーとギャップファイバーから成る接合部ヒンジファイバーを設ける(図-2)。鉄筋位置に設けられる抜け出しファイバーには接合部からの主筋の抜け出し特性を与

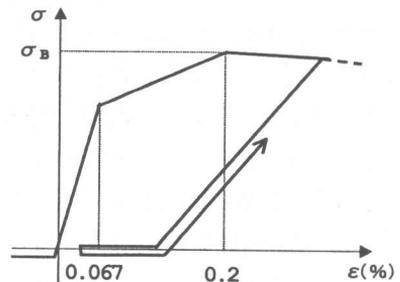


図-1 コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係

*1 東洋エンジニアリング(株) 工修(正会員)

*2 日本大学教授 理工学部建築学科 工博(正会員)

*3 日本大学助手 理工学部建築学科 工修(正会員)

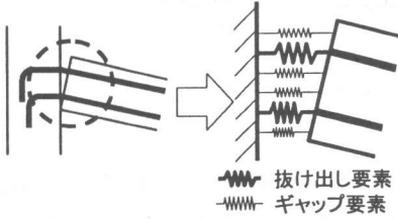


図-2 接合部ヒンジファイバーモデル

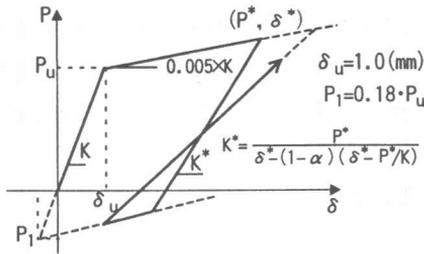


図-3 抜け出しファイバーの履歴ルール

え、その他の断面は、引張力を負担せず、圧縮時のみコンクリートの弾性剛性が与えられるギャップファイバーによって離散化する。図-3に、抜け出しファイバーに仮定した履歴ルールを示す。抜け出しファイバーの剛性は、Filippouらの付着すべりに関する解析的研究³⁾を参照し、簡略化した主筋の抜け出しカーブ関係に改め、内部履歴ルールに剛性低下係数($\alpha=0.25$)を与えて再載荷時の剛性低下を表現する。定着耐力(P_u)は、森田らの定着耐力式⁴⁾を用いて算定した。

3) スラブ協力幅はRC規準⁵⁾に従うが、剛域は柱および梁部材ともフェイス位置まで有効とする。

2.2 損傷解析モデル

本研究の地震損傷解析は、最大応答変形による損傷と繰返し劣化による損傷との線形和でRC骨組の損傷を表現するParkの損傷解析モデル⁶⁾に基づいたものである。ここで、質点系の応答計算に基づくParkの損傷解析法を本検討のファイバーモデルによる応答計算結果に適合するように再定義する。まず、各部材端部の損傷指標(D_i)は、Parkの提案に従い、最大応答による損傷指標(D_δ)と繰返し劣化による損傷指標(D_H)の線形和として算出される。

$$D_i = D_\delta + D_H \quad (1)$$

本検討の D_δ は、ファイバーモデルにより計算される曲げ変形による損傷指標($D_{\delta f}$)と接合部ヒンジファイバーにより計算される主筋の抜け出し変形による損傷指標($D_{\delta p}$)との和と定義される(式(2))。 $D_{\delta f}$ および $D_{\delta p}$ は次のように定義される損傷指標である。

・ 曲げ変形による損傷指標($D_{\delta f}$)

まず、部材単体のファイバーモデルを作成して一方向載荷を行い、断面のモーメント(M)—曲率(ϕ)関係のピーク値から10%程度耐力低下を生じた点の曲率を終局曲率(ϕ_{uf})として定義する。 $D_{\delta f}$ は、RC骨組の応答計算から得られる各ファイバー要素の最大曲率(ϕ_{max})を ϕ_{uf} で除して計算される。

・ 主筋の抜け出し変形による損傷指標($D_{\delta p}$)

終局の主筋の抜け出し変形量に関する明確な定義を行った既往の研究が見当たらないため、本検討では図-3に示される $\delta_u=1.0\text{mm}$ の10倍を終局抜け出し量とし、それを接合部ヒンジファイバーの回転角に置き換えて終局回転角(θ_{up})を定義した。 $D_{\delta p}$ は、 $D_{\delta f}$ と同様に、応答計算から得られる最大回転角(θ_{max})を θ_{up} で除して求められる。つまり、各部材の D_δ は次のように計算される。

$$\begin{aligned} D_\delta &= D_{\delta f} + D_{\delta p} \\ &= \frac{\phi_{max}}{\phi_{uf}} + \frac{\theta_{max}}{\theta_{up}} \quad (2) \end{aligned}$$

次に、 D_H は D_δ と同様に、ファイバーモデルにより計算される曲げ変形の繰返し劣化指標(D_{Hf})と接合部ヒンジファイバーにより計算される主筋の抜け出しの繰返し劣化指標(D_{Hp})との和として定義する(式(3))。 D_{Hf} および D_{Hp} は、応答計算の履歴エネルギー(図-4の E_f および E_p)を用いて評価されるため、 D_H は次のように計算される。

$$\begin{aligned} D_H &= D_{Hf} + D_{Hp} \\ &= \left(\frac{E_f}{\phi_{uf} \cdot M_{yf}} + \frac{E_p}{\theta_{up} \cdot M_{yp}} \right) \beta \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 β は Park の提案による繰返し劣化損傷に関する実験定数である。

3. 損傷解析結果および考察

AIJ終局強度型設計指針⁷⁾に従って設計された梁降伏先行型実大 3 層 RC 骨組の振動台試験結果¹⁾に対して前述した地震応答解析および損傷解析を適用し、部材および材料レベルの詳細な損傷評価を試みる。

3.1 振動台実験の概要

図-5 に試験体の略図を、表-1 に試験体から採取された各層のコンクリートコアおよび鉄筋の材料試験結果を示す。各層の重量は、付加重量により 3.74×10^5 N となる。小振幅弾性加振結果による試験体の 1 次固有周期は 0.33 秒を示した(表-2)。入力波形には八戸 E-W 成分を拡幅したものが使用され、振動台中央位置で計測された加速度記録およびその速度応答スペクトルを図-6 および 7 に示す。

3.2 応答解析結果

平面骨組解析モデルは、試験体基礎スラブを除く、1 層柱部材から上部がファイバーモデルにより離散化され、各ファイバー要素には表-1 に基づく材料物性が与えられる。応答計算には初期剛性比例型の減衰を仮定し、減衰定数 (h) は弾性範囲の衝撃波加振実験結果を参照して弾性時の 1 次振動に対して $h=1.3\%$ を与えた。なお、図-6 の加振開始後 20 秒から 70 秒までを解析対象区間としている。

図-8 に、1 層の慣性力 (Q) - 層間変形 (δ) 関係を示す。図中の CASE-A は試験体をファイバーモデルだけで離散化した解析結果であり、CASE-B はファイバーモデルと接合部ヒンジファイバーを用いた解析結果である。なお、応答計算結果を解析区間全体で示した場合(左図)と最大入力後の応答計算結果(39 秒以降)のみ示した場合(右図)が併せて示してある。CASE-A は実験値に比べて全体的に変形が小さく、最大入力以降の剛性を過大評価する傾向にある。一方、CASE-B は履歴性状およびピーク値とも実験値を良好にシミュレートしている。1 層の応答変位時刻歴を図-9 に、その

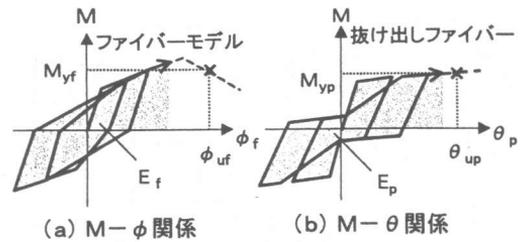


図-4 損傷評価モデル

表-1 材料試験結果

部位	コンクリート		鉄筋	
	σ_B (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)	鉄筋径	σ_y (N/mm ²)
1 層柱, 梁	32.5	2.70×10^4	D22	376
2 層柱, 梁	40.1	2.66×10^4	D19	371
3 層柱, 梁	30.4	2.49×10^4	D16 D10	338 338
				E_s (N/mm ²)
				2.05×10^5
				2.02×10^5
				2.07×10^5
				2.05×10^5

表-2 弾性固有周期の比較

	1 次	2 次	3 次
実験値 (s)	0.333	0.103	0.050
計算値 (s)	0.331	0.102	0.048

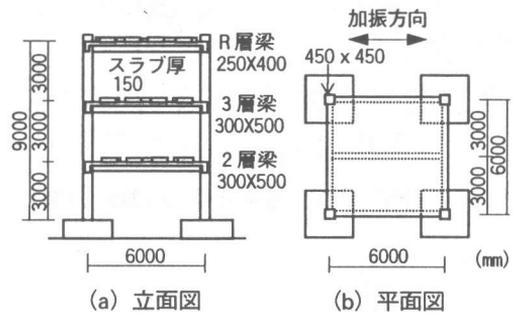


図-5 振動台実験試験体

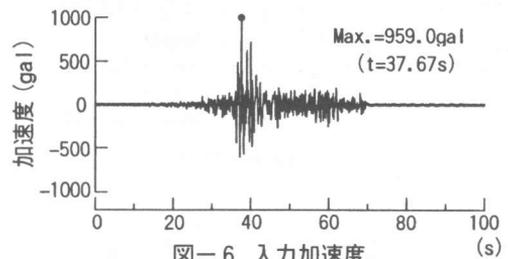


図-6 入力加速度

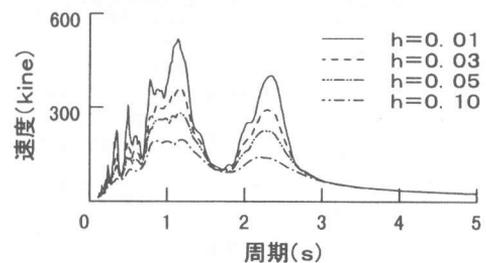
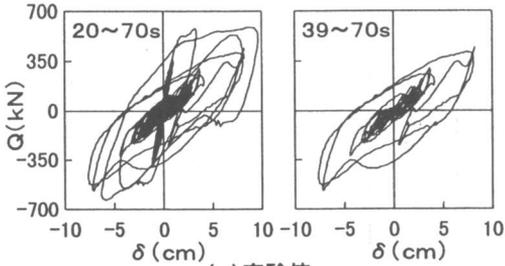
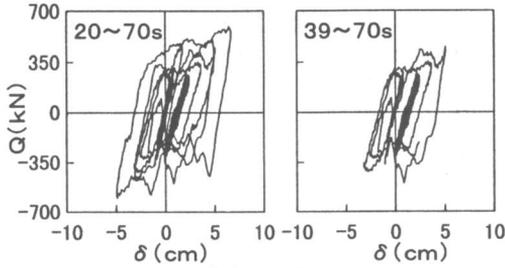


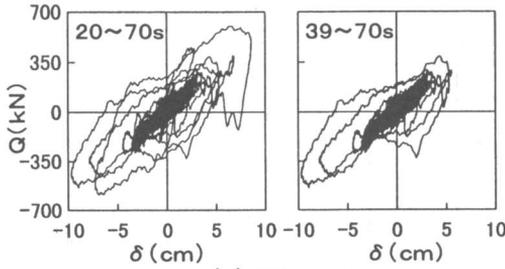
図-7 速度応答スペクトル



(a)実験値

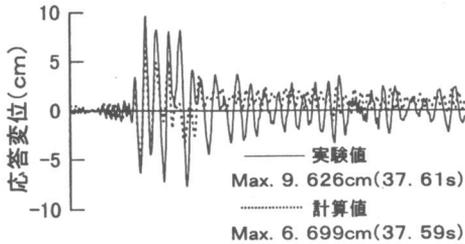


(b)CASE-A

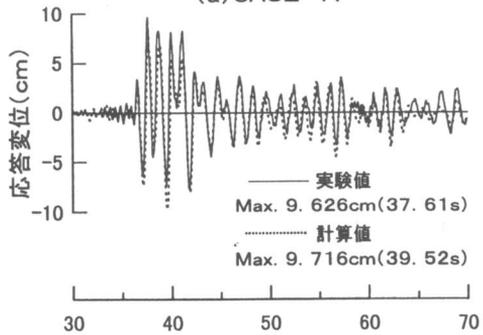


(c)CASE-B

図-8 慣性力(Q)-層間変位(δ)関係(1層)

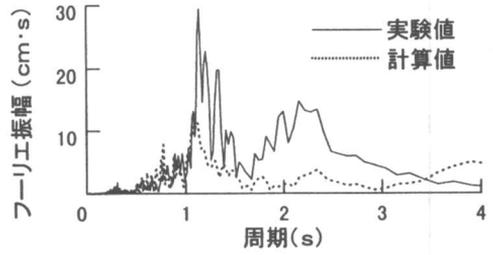


(a)CASE-A

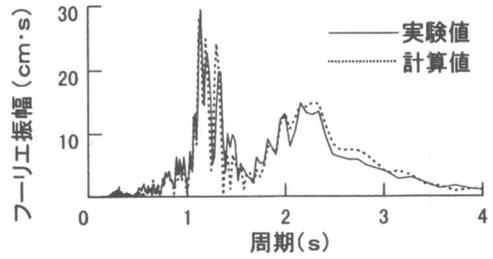


(b)CASE-B

図-9 応答変位時刻歴(1層)



(a)CASE-A



(b)CASE-B

図-10 フーリエ振幅スペクトル(1層)

フーリエ振幅スペクトルを図-10にそれぞれ示す。CASE-Bの計算結果は実験値の応答変位を高精度で追跡していたことが両図よりうかがえ、本研究のファイバーモデルに基づく応答計算手法の妥当性が確認された。これらの応答計算結果より、梁降伏先行型RC骨組建物に接合部からの梁主筋の抜け出しが発生すると、層レベルの応答性状は、主筋の抜け出し力-変形関係によって支配されるものと考えられる。

3.3 損傷解析結果

ここでは、骨組解析モデルCASE-Bによる応答計算結果を用いて損傷解析を行い、部材および材料レベルの詳細な損傷評価を試みる。

まず、図-11に実験終了後のひび割れ状況を、図-12(a),(b)にファイバー要素の圧縮および引張ひずみ分布、(c)に接合部ヒンジファイバーの抜け出し変形分布を示す。試験体の損傷程度は3層およびR層梁が著しいという報告¹⁾の通り、計算値の引張ひずみ分布(b)および接合部ヒンジファイバーの抜け出し変形分布(c)も実験と同様の傾向を示した。一方、圧縮ひずみ分布(a)は、柱および梁とも、それほど大きなひずみレベルには達していない。これは、試験体が低層RC骨組であったため、加振中の柱軸力の軸力は小さかったこと、さ

らに、梁部材においても接合部からの主筋の抜け出しが生じたために、圧縮縁コンクリートが負担する応力も小さかったことによる。

次に、本研究の損傷解析による梁および柱材端の損傷指標 D 値を示す(図-13)。なお、各図中の D 値は、各種損傷指標を累加して示していることに注意する。ファイバー要素の引張りひずみ分布は、R層および3層のひずみレベルが大きな値を示したが、 D 値の分布は、3層のみが著しく大きい値を示し、2層、R層、1層柱脚が続くという結果を示した。また、得られた D 値の大きさは、Park が崩壊と定義する $D=1.0$ を大きく超える結果となっているが、これは、 D_{δ} および D_H といった各損傷指標の算定に大きな影響を及ぼす終局変形量の定義が不十分であること、さらに、 D 値はそれらの累加により算定されることによる。そのため、以降の検討では、各材端位置の D 値に占める D_{δ} および D_H の割合やその推移といった点に限定していく。まず、2およびR層の D 値の推移は、 D_{δ} や D_H が最大値を示した後、ほぼ一定の値で推移する

のに対し、3層の D 値は、曲げ変形の繰返し劣化指標 D_{HF} が大きく成長している点が注目される。また、全体崩壊形を形成後、試験体に入力されたエネルギーは、主に、3層梁部材によって集中して消費されたことが D 値の推移から明瞭となった。別途同部材のファイバー要素の応力-ひずみ関係を精査したところ、コンクリートファイバーよりも、むしろ、鉄筋ファイバーの応力-ひずみ曲線が履歴エネルギーを大きく消費したことが分かり、構造物全体の靱性を保証するには付着性能の評価が鍵となることが改めて確認された。一方、最大応答変形から算定される損傷指標 D_{δ} は、最大層間変位を経験した後、どの材端においても変化が認められない。つまり、最大層間変位を示した時点において RC 骨組の損傷評価を行うと、その後の部材および材料レベルの劣化挙動は反映されず、危険側の損傷評価を与える可能性があることを示唆しているものと考えられる。

4. まとめ

以上、主筋の抜け出しを考慮したファイバーモ

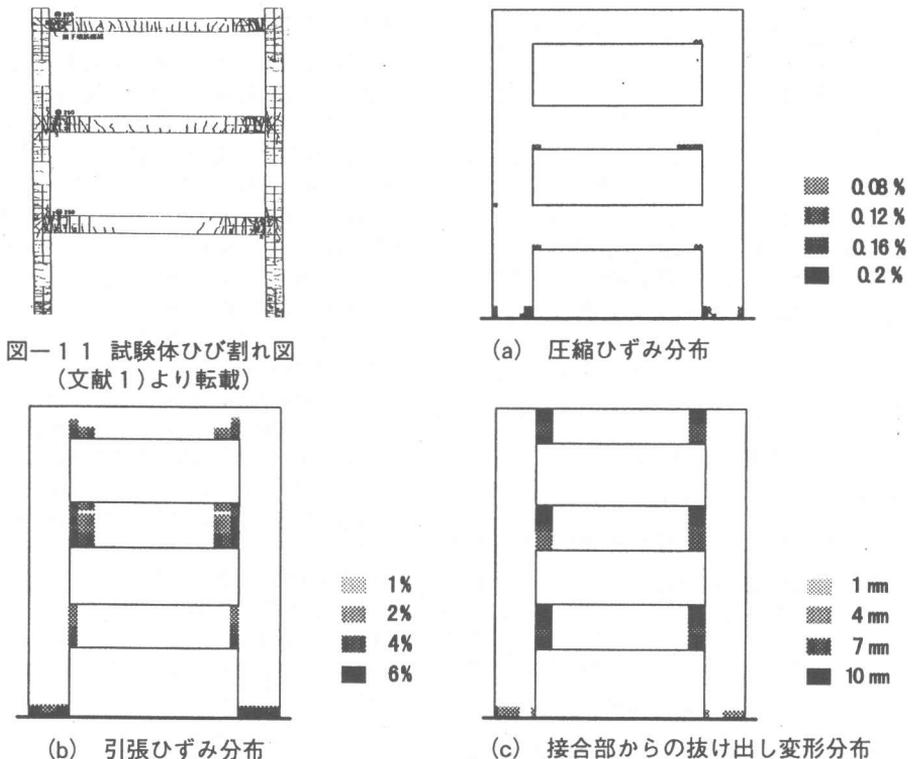
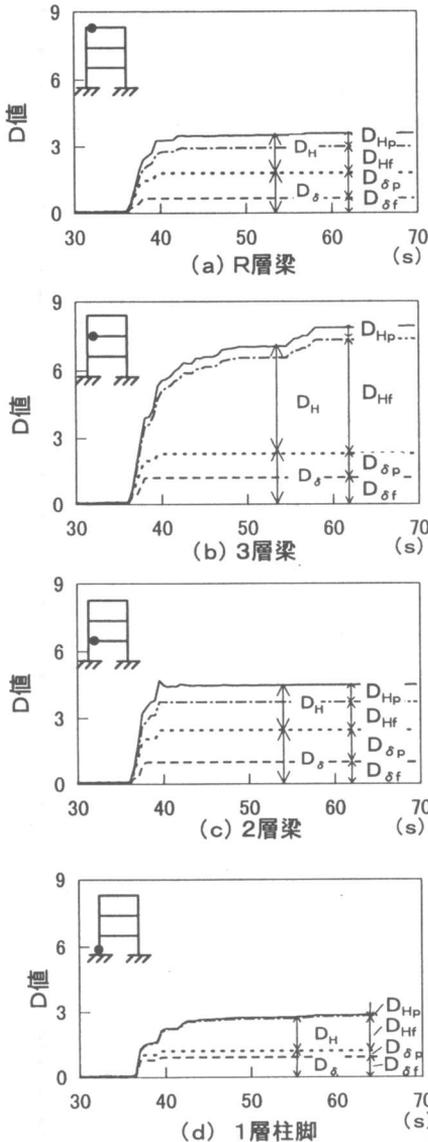


図-11 試験体ひび割れ図 (文献1)より転載)

図-12 各要素の変形分布



図一 1 3 D 値の時刻歴

デルに基づく骨組応答解析モデルを用いて実大 3 層 RC 骨組の振動台試験の応答計算を行い、その結果に基づく損傷解析を試みた。その結果、次のような事柄が明らかになった。

- 1) DRAIN-2DX による RC 骨組建物の地震応答計算は振動台試験結果を高精度にシミュレートできる。しかし、ファイバーモデルおよび接合部ヒンジファイバーに用いる一般的な解析パラメータについては、さらに検討が必要である。
- 2) ファイバーモデルの曲率および接合部ヒンジファイバーの回転角に基づく損傷解析は、終局

曲率および回転角の定義に課題が残されているが、実験の被害傾向とほぼ符合した。

- 3) RC 骨組の地震時挙動は、最大応答変位を経験した後も材料レベルの損傷が進行することが解析的に確認された。今後、最大応答量のみならず、繰返し劣化損傷を考慮した構造性能評価法の確立が望まれる。

謝辞

本研究で引用した実大 3 層 RC 建物の振動台試験結果は、科学技術庁防災科学技術研究所官民特定共同研究「強振動による鉄筋コンクリート構造物の破壊に関する研究」として行われたものであり、実験データを提供いただいた委員会関係各位に感謝いたします。特に、(株)青木建設技術本部研究所 北嶋圭二氏には実験に関する数多くの助言を賜りました。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金による総合研究 (B)(課題番号: 08455265, 研究代表: 安達 洋) による。ここに記して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 小野口雅美・宮下真一・楠浩一・中埜良昭：実大 3 層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験 (その 1~4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.707-714, 1995.8
- 2) Prakash, V. and Powell, G. H. : DRAIN-2DX, DRAIN-3DX and DRAIN-BUILDING Base Program Design Documentation, Department of Civil Engineering University of California Berkeley, California, Dec.1993
- 3) Monti, G. and Filippou, F. C. and Spacone, E. : Finite Element for Anchored Bars Under Cyclic Load Reversals, Journal of Structural Engineering, Vol.123, No.5, pp.614-623, May.1997
- 4) 藤井栄・森田司郎・川上修司・山田稔明：90° 折り曲げ鉄筋の定着耐力の再評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.429, pp.65-75, 1991.11
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1988.7
- 6) Park, Y. J. and Ang, A. H. S. and Wen, Y. K. : Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp.740-757, Apr.1985
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990.11