

論文
 [2038] せん断破壊する鉄筋コンクリート柱の力学的性状に及ぼす
 載荷速度の影響

正会員 中西 三和 (日本大学理工学部)
 同 ○高梨 成次 (戸田建設)
 同 安達 洋 (日本大学理工学部)
 同 小野 新 (日本大学理工学部)

1. はじめに

せん断破壊や、付着割裂破壊のようにぜい性的な破壊をする鉄筋コンクリート (以後、RC) 柱の力学的挙動は静的な実験によりかなり明らかにされている。さらに、実地震時における挙動を把握するために脆性破壊にいたる応答の過程を詳細に調べる必要がある。動的挙動を調べる実験的な方法としては振動台実験やオンライン応答実験がある。振動台実験は実時間で応答が得られる反面、装置上の制約から試験体が縮小模型にならざるを得ない場合が多い、一方、オンライン応答実験は加力が準静的であるが、実物大に近い模型によって直接実験的に得られた復元力を用いて応答計算が実行され、時々刻々の破壊性状の確認ができる。従ってオンライン応答実験はぜい性的な破壊をする部材のように負の塑性勾配を持ち復元力特性が複雑な構造物の応答解析には非常に有効である。

表1 試験体諸元

試験体	実験方法	B×D (cm)	L (cm) (M/QD)	主筋量 (Pg%)	帯筋量 (Pw%)	軸力 (ton)
T-S	静的	8×8	32	8-D6 (4.00)	2φ-φ40 (0.20)	2.20
T-D	振動台		(2.0)			
O-D	オンライン	24×24	96 (2.0)	8-D19 (3.99)	6φ-φ120 (0.19)	19.80

B×D: 幅×高、L: 材長、M/QD: シアスパン比

本論はせん断破壊を意図して設計された比較的縮尺の小さな試験体に対し、振動台実験及びその変位時刻歴と同経路の変位履歴をたどった静的実験、さらに縮尺の大きな試験体を用いたオンライン応答実験を行い、その力学的挙動に及ぼす載荷速度の影響とこれら二つの動的実験法によって得られる応答結果の相関性について検討することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体及び使用材料

振動台実験とオンライン応答実験という異なる特徴を持つ二つの動的実験法によって得られる結果を共通の尺度で評価するために実大の部材 (以後、プロトタイプと呼ぶ) に対する模型の縮尺を、振動台実験では 1/9、オンライン応答実験では 1/3 として試験体の設計を行った。また、両試験体に対する他の物理量に関しては応力度と加速度の相似比が1.0となる相似則[1]を適用した。各試験体記号並びに構造諸元を表1に、試験体配筋詳細を図1に示した。

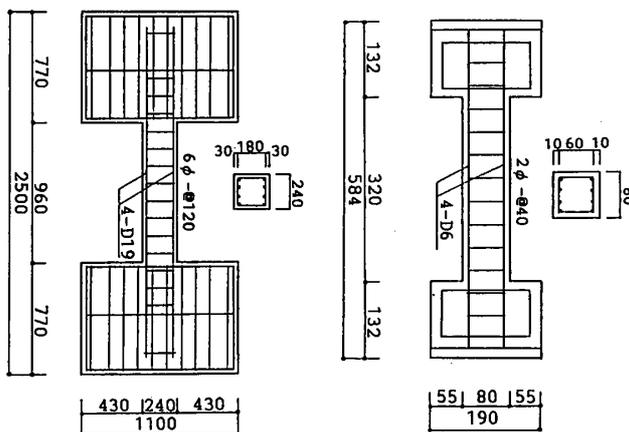


図1 試験体配筋詳細

表2 材料試験結果

コンクリート		鉄筋降伏強度			
圧縮強度	割裂強度	D19	D6	6φ	2φ
199	22	3874	4280	5090	2212*

* 引張強度

単位 (kg/cm²)

コンクリートは最大粒径が10mmの豆砂利を使用し、試験体の大小にかかわらず同一とした。また鉄筋は市販されている種類のものを用いて相似比を合わせた。使用したコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を表2に示した。

2. 2 実験方法

実験は、振動台実験、その時刻歴応答変位と同経路の変位履歴をたどった静的実験、オンライン応答実験の順で行った。各実験方法について以下に述べる。

1) 振動台実験 (T-D)

実験装置を図2に示した。質点とした重りは2.2tonであり、重りの回転を拘束するために前後を4本のピンサポートにより支えた。従って部材の材軸方向の変位を拘束した装置である。なお、部材応力(曲げモーメント、軸力)を計測するために荷重変換器を柱頭、柱脚に設置した。

入力地震波は、El-Centro 1940 NS成分波形($\dot{y}_{max}=341.7$ gal、継続時間30秒)を相似則に従い時間軸を1/3に圧縮し、プロトタイプでその最大速度が70kineとなるよう補正し入力した。

2) 静的加力実験 (T-S)

振動台上に設置された装置をそのままテストフロアに固定し、反力壁に取付けたオイルジャッキにより加力を行い、振動台実験で得られた変位履歴に対応する部材の復元力を測定した。

3) オンライン応答実験 (O-D)

実験装置を図3に示した。振動台実験によるピンサポートと同じ効果を持つ装置とするために、試験体の両側に20ton押し引き両用の油圧ジャッキを設置し部材の伸縮量を制御したが、耐力低下後の試験体の崩壊にともなう落下量に対しては特に制御しなかった。計算機内では振動台で負荷した質量を持つ一質点系モデルを想定した。また、試験体に対しては固定荷重としてこの重量にみあう軸力(振動台質点重量×相似比; $2.2 \times 9 = 19.8$ ton)を絶えず一定となるように負荷し、軸変位の拘束にともなう軸力の変動をロードセルにより測定した。応答計算に使用する地震入力加速度は振動台実験で得られたテーブルの実測加速度であり、減衰定数は5節に述べる振動台実験結果のパラメータ同定によって求めた値を用いている。

3. 実験結果概要

3. 1 破壊状況

図4に各実験の最終破壊状況を示し比較した。T-Dにおいてもビデオ録画による破壊経過の確認を行ったが試験体の大小にかかわらず同様に、曲げひび割れ→せん断ひび割れ→柱主筋に沿った割裂状のひび割れが発生し最大耐力→耐力低下という付着割裂破壊を示した。加力が静的なT-SとO-Dの破壊状況は試験体の大小、骨材寸法と

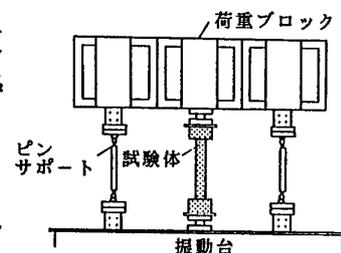


図2 振動台実験装置

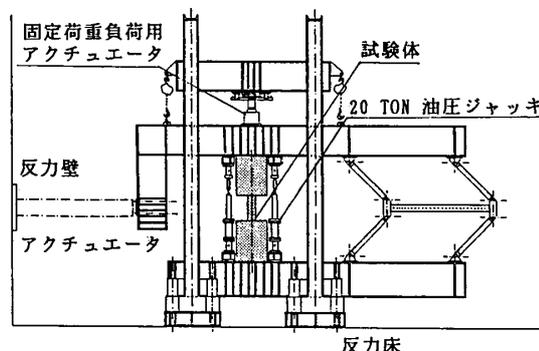


図3 オンライン応答実験装置

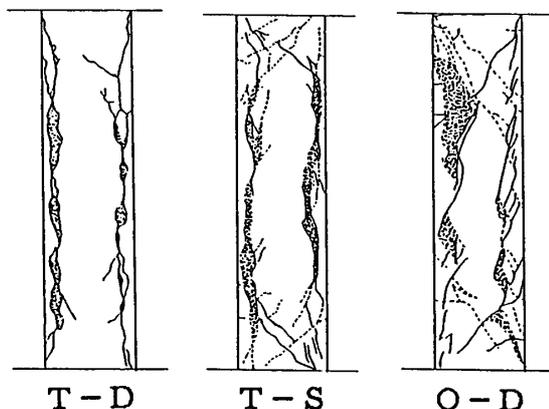


図4 最終破壊状況

鉄筋のふし形状等にみられる相似性の欠如にかかわらず良く一致している。これは主筋の配列本数が柱幅に対し比較的多かったことが今回の破壊の要因となり共通の破壊モードを示したと考える。一方、T-Dでは全般的にひびわれ本数が少なく損傷の度合いはやや軽微であった。

3.2 諸強度及び最大応答値

表3にT-SとO-Dによって得られた諸強度及び変形を比較し示した。各強度については既往の推定式による計算値を併せて示した。また、表4にはT-Dの最大応答値と5節に述べる弾塑性応答解析結果、及びO-Dによる最大応答値との比較を行った。なお、以後の検討における振動台実験結果の復元力(P)は柱頭・柱脚のモーメント測定値より求めた値である。

せん断ひび割れ強度及び最大耐力は相似比を満足する結果であるがO-Dの各強度時の変形はいずれも小さめで、剛性が全般的に高めであることがわかる。T-DとT-Sの最大せん断力を比較するとT-Dでは約20%耐力が上昇しているがこれは載荷速度の影響と思われる。また、T-DとO-Dの比較ではいずれの応答値にも差が生じた。これら原因については後に詳細な検討を行なう。

表3に示した諸強度の計算値は軸変位を拘束することによって生ずる軸力の影響を考慮し算定しているが、各試験体のこの軸力変動とせん断力の関係を比較して図5に示した。振動台実験

表3 諸強度及び変形・実験結果一覧

試験体	曲げひび割れ		せん断ひび割れ			最大耐力					
	実験値		計算値		計算値 **	実験値		計算値			
	P	δ	P	δ		P	δ	①	②	③	
T-S	600	1.19	373	1390	2.75	1080	1560	4.24	2817	1740	1179
O-D	6800	1.54	3415	11100	2.96	9718	14096	4.69	20830	16824	10107
O-D/T-S	11.33	1.29	9.06	7.99	1.08	9.00	9.04	1.11	8.75	9.67	8.57

P: 水平荷重 Kg δ: 水平変位 mm * 曲げひび割れモーメント式 [2]
** 広沢式 [3]

表4 最大応答値

試験体	加速度 (gal)	速度 (kine)	変位 (cm)	復元力 (kg)	
T-D	実験値	1458.6	23.5	0.93	1867
	解析値	903.6	22.2	0.89	1371
O-D	851.3	29.1	4.99	14096	
O-D/T-D	0.60	1.23	5.30	7.55	
相似比	1.00	1.73	3.00	9.00	

- ① $Q_u = 2 \{ 0.8 a_t \sigma_y d + 0.5 N D (1 - N / B D F_c) \} / l$
文献 [2]
- ② $Q_{mean} = \{ 0.115 k u k p (180 + F_c) / (M / Q D + 0.12) + 2.7 \sqrt{P w \sigma_s y} + 0.1 \sigma_o \} B j$
文献 [3]
- ③ $\tau_u = \{ 0.307 h i + 0.427 \} \sqrt{F_c} + 24.9 (A_{st} / S) (1 / n d h) \sqrt{F_c}$
文献 [4]

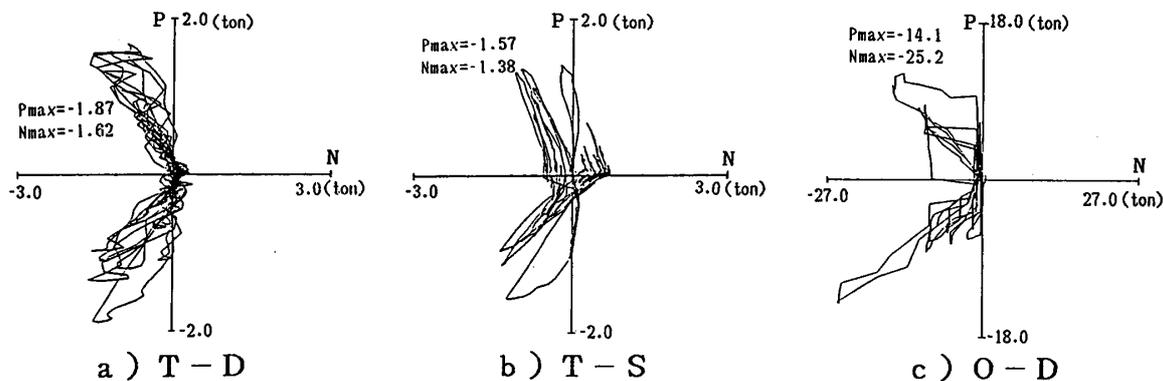


図5 せん断力 (P) - 変動軸力 (N) 関係

では、ピンサポートを用いているため、部材の鉛直方向変位はその長さによって拘束される。したがってT-Sの結果に見られるように部材の伸びる方向に対しては圧縮の軸力、耐力低下以後のように部材が縮む方向に対しては引張りの軸力によって試験体の落下を支える傾向が生ずる。しかし、T-Dの結果は部材の耐力低下に伴う引張り軸力の変動が非常に少ない結果となっており、静的実験結果よりもその損傷の度合いが少なかったことが伺える。また、O-Dにおいては軸力変動の傾向は同様であるが、負側最大耐力時に他と比較して約2倍の変動軸力が作用している。T-D、T-Sに対しこの軸力変動が部材挙動におよぼす影響を、表3に示した計算式のうち軸力の効果を含む1式（曲げ終局強度）、2式（せん断終局強度）によって検討すれば、いずれもほぼ6%程度の強度上昇率につながる。

4. ひずみ速度の検討

振動台実験とその変位履歴に従った静的実験結果の比較から、振動台実験では約20%耐力が上昇した。文献[1]では曲げ破壊型の柱にたいする同様の比較から振動台実験の耐力の上昇は主筋の受けるひずみ速度を要因とする素材の降伏点強度の上昇によるものであることを指摘した。本実験では付着割裂破壊を起こしたが、3式の推定式から推察されるように主筋の降伏強度が最大耐力に直接影響を及ぼすことは少ないと考えられるが、本実験結果に対しても同様の検討を行なった。図6に主筋の荷重-ひずみ曲線を、また図7にはこのひずみ測定値より求めた荷重-ひずみ速度関係を、図8にはひずみ速度の頻度分布を示した。また、この頻度分布の図中に正規確率密度関数から求めた頻度を折線として表し比較した。ひずみ速度の分布は最大値によって標準化されればその分布状態は同心円的な広がりを持つ傾向を示す。この分布に対する平均値 (μ) はほぼ0で標準偏差 (σ) は $\pm 0.01 \text{ sec}^{-1}$ である。この標準偏差の ± 1 倍の範囲に全体の80%強のデータが含まれることになる。この結果は、文献[1]に示した曲げ破壊型の柱主筋が経験するひずみ速度の分布と同傾向を示している。また、荷重-ひずみ曲線にみられるように最大耐力を経験するまでの主筋のひずみは弾性に近い挙動を示しているから、付着の劣化がそれほど激しいものでなければ周辺のコンクリートも同程度のひずみ速度を経験しているものと思われる。素材レベルでコンクリートの圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響を検討した研究は幾つかあるが、文献[5]に提案されている4式を適用すればこのひずみ速度 (約 0.05 sec^{-1}) に対するコンクリートの圧縮強度の上昇率は約20%である。この上昇率を②式や③式にあてはめれば約10%の耐力上昇となる。さらに、付着やせん断の破壊メカニズムを考慮した検討が必要である。

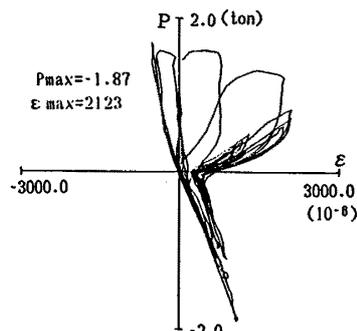


図6 せん断力-ひずみ曲線

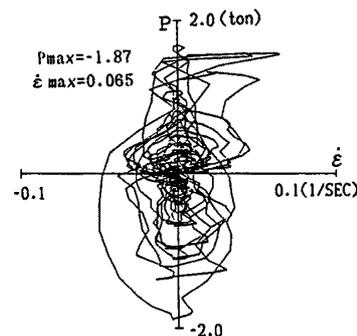


図7 せん断力-ひずみ速度曲線

$$F_c / F_{c0} = 1.3699 + 0.1417 \log_{10}(\dot{\epsilon}) + 0.0135 \{ \log(\dot{\epsilon}) \}^2 \quad \dots 4$$

F_{c0} ; 静的なコンクリート圧縮強度

5. パラメータ同定と応答履歴曲線の比較

オンライン応答実験や各実験結果の評価を行なう前提として数学モデルの妥当性をまず検討する。解析モデルは一質点系のせん断ばね系モデルとし、復元力特性は鉄筋コンクリートの履歴挙動の性質

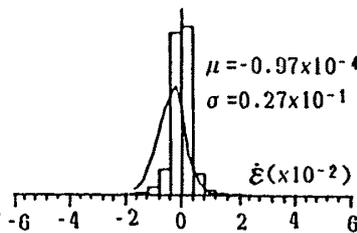


図8 ひずみ速度頻度分布

を表わす図9に示す複数のモデルの組合わせとして表現した。非線形最小二乗法を用いて、これら各モデルのパラメータと初期剛性比例型とした内部粘性減衰定数を同定した[1]。

同定結果を表5に示した。このパラメータを用いた弾塑性応答解析と実験結果の時刻歴応答変位並びに応答履歴曲線を比較し、それぞれ図10、図11に示した。解析結果は、実験で観測された最大耐力後の急激な耐力低下と、顕著なスリップ現象を示す履歴性状を時刻歴全体にわたりよく表現していることがわかる。

この振動台実験 (T-D) における応答履歴曲線と比較するために静的実験 (T-S) の荷重-変形曲線とオンライン応答実験 (O-D) の応答履歴曲線を図12、13に示した。T-DとT-Sの結果は最大耐力に約20%の差があるもののその履歴性状は良く近似した結果といえる。一方、O-Dは最大耐力以後の急激な耐力低下とともに図14の時刻歴応答変位にみられるように、その応答が一方方向へ流れる進行性の破壊を起こし振動台実験とは異なる応答性状を示した。

加力の動的・静的あるいは、試験体の大小によって異なる履歴性状が応答結果にどのような影響を及ぼすかを調べるためにT-Sを基準として検討を行った。まず、部材の復元力特性を振動台実験結果の場合と同様に図9に示した三つのモデルの組合わせとしてパラメータ同定を行い、復元力特性モデルを設定した。

このモデルを用いて応答解析した時刻歴応答変位および応答履歴曲線を図15、16に示した。このシミュレーション結果は先に示したオンライン応答実験結果と同様進行性の破壊をする応答性状を示している。T-DとT-Sではその耐力に約20%の差がある

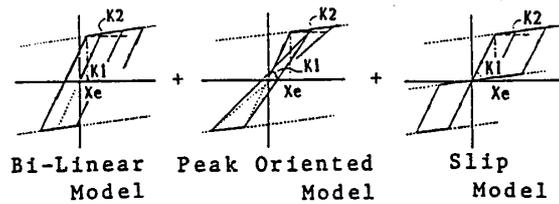


図9 復元力特性モデル

表5 同定結果

数学モデル	初期剛性(K1)	第二勾配(K2)	弾性限変形	減衰係数
バイリニア	6191.4	0.001	0.0071	1.004 h=0.26%
最大点指向	8490.2	-267.2	0.1077	
スリップ	1734.3	-471.5	0.2612	

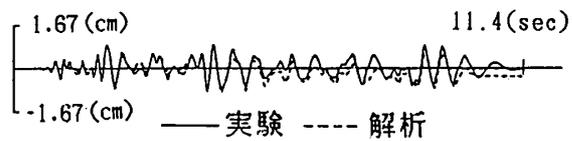


図10 時刻歴応答変位 (T-D)

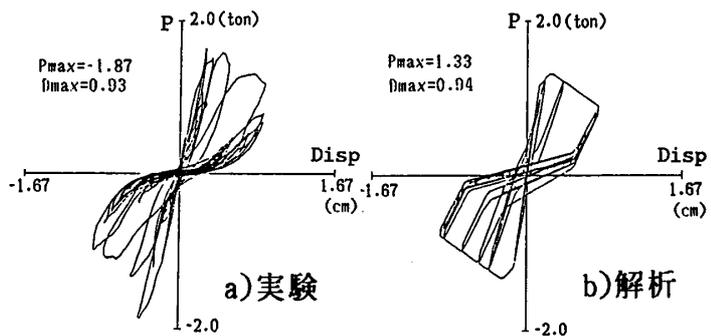


図11 応答履歴曲線 (T-D)

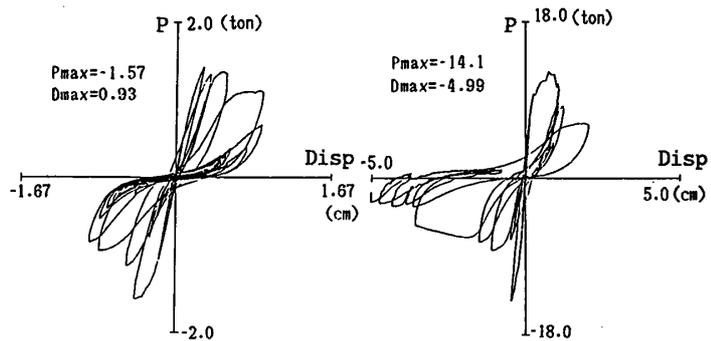


図12 荷重-変形曲線 図13 応答履歴曲線 (T-S) (O-D)

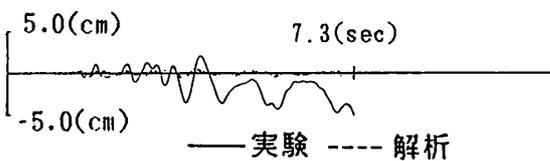


図14 時刻歴応答変位 (O-D)

ことやT-Dの履歴曲線のふくらみが若干おおいことが、応答性状の差となって表われたものと思われる。すなわち、静的実験結果から忠実に部材の復元力特性モデルを表現し、解析したこの数値シミュレーションは擬似的なオンライン

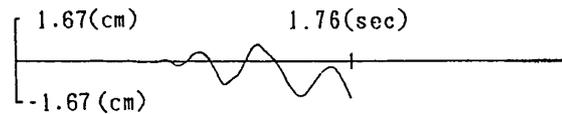


図15 時刻歴応答変位 (T-S、解析)

イン応答実験と考えられる。試験体の大小による部材性能の違いをここでは一応小さいものと考え、履歴不安定な系では静的及び動的な実験結果から得られた部材性能の若干の差が応答値に非常に大きな影響を及ぼすことを表わしている。次に、T-Sの荷重-変形曲線の描く履歴面積の時間的変化をT-D、O-Dの結果と比較して図17に示した。振動台実験における履歴面積の総和は他の実験値にくらべ大きいことがわかる。また、O-Dでは最大応答変位が大きいにもかかわらずその履歴面積の総和はT-Sと同等である。これらは上述した応答性状の違いに符合する。

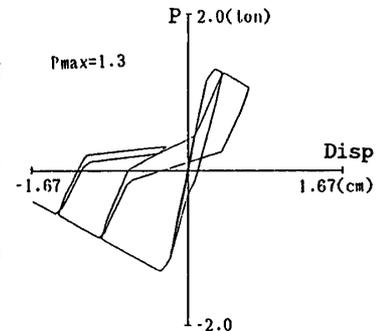


図16 応答履歴曲線 (T-S、解析)

6. まとめ

以上、付着割裂破壊するRC柱の振動台実験及びその静的実験、オンライン応答実験結果の比較から以下の知見を得た。

- 1) 試験体の大小にかかわらずその破壊経過は同様で付着割裂破壊である。また、振動台実験では静的実験結果に比べひび割れ本数が少なく、損傷の度合いはやや軽微であった。
- 2) 振動台実験では、その静的実験に比較して最大耐力が約20%上昇した。
- 3) 振動台実験のパラメータ同定結果は最大耐力以後急激な耐力低下を起こす応答全体にわたり適合し数学モデルの妥当性を検証した。
- 4) 静的実験をパラメータ同定した結果とオンライン応答実験結果は振動台実験とは異なり、いずれも耐力低下後進行性破壊する履歴不安定な応答性状を示した。

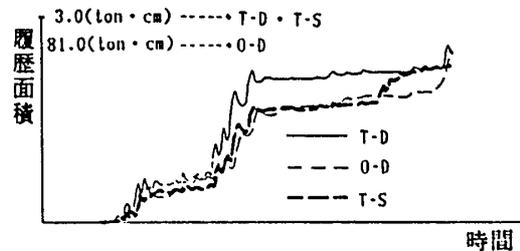


図17 履歴面積の時間的変化

謝辞 本論文は昭和62年度文部省科学研究費補助金(海外学術研究)『繰り返し荷重に対する鉄筋コンクリート構造物の応答性状に関する研究』(代表者:日本大学教授 色部 誠)によるものである。

参考文献

- 1) 小野新、安達洋、中西三和、高梨成次 : 動の実験における相似則の検証と載荷速度の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, 10-3, 1988, PP.473-478
- 2) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1988
- 3) 広沢雅也 : 鉄筋コンクリート部材の強度と靱性, 建設省建築研究所建築研究報告 No.76, March, 1977
- 4) 森田司郎、藤井栄 : 異径鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第2報付着割裂強度算定式の提案-, 論報58年2月, 第324号, PP.45-52
- 5) 藤本盛久他 : 高速荷重を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その5), 日本建築学会大会学術講演概要集, 昭和63年10月, PP.753-754