

鉄筋コンクリートの非線形 地震応答解析法の開発

Development of Nonlinear Seismic Response Analysis for Reinforced Concrete

前川 宏一 | Koichi MAEKAWA¹⁾ 岡村 甫 | Hajime OKAMURA²⁾

はじめに

任意の鉄筋コンクリート構造（以下 RC）のあらゆる挙動を適用範囲とする、高い一般性を持つ解析法の確立に向けて、筆者らは 1980 年に基礎研究を開始した。静的 2 次元版については、1991 年に著書¹⁾およびプログラム WCOMR²⁾で技術公開するに至っている。その後の改良と詳細な検証³⁾を経て、動的 2 次元版を近々追加リリースする予定である。本文では、RC 壁構造と柱・はり部材を対象とする、動的非線形有限要素解析法—WCOMD—について概要を報告したい。

この技術の最大の特徴は、交番繰り返しを受けるコンクリートの力学特性、ひび割れ面での応力伝達、鉄筋とコンクリートとの付着特性、鉄筋の力学的挙動のすべてを考慮した RC 構成則を搭載していることにある。RC 構造中に発生する様々な応力履歴に対応可能な、一般性の高い材料構成モデルを解析の基礎に据えているので、部材レベルでの動的復元力特性や断面耐力等を事前に仮定する必要が一切なく、単に構造形状、鉄筋配置と構成材料強度を解析入力値として設定するだけでよい。動的応答のみならず、動的作用以後に構成材料に残存する損傷や残留変形、残存機能性等も詳細に評価が可能である。すなわち、震後限界状態と地震時構造性能を直接照査できる点が、本技術の工学上の特色となっている。

交番载荷に適用可能な RC 構成則

本技術の根幹をなす RC 構成則は、ひび割れの分散する領域と、部材間の局所変形の卓越する領

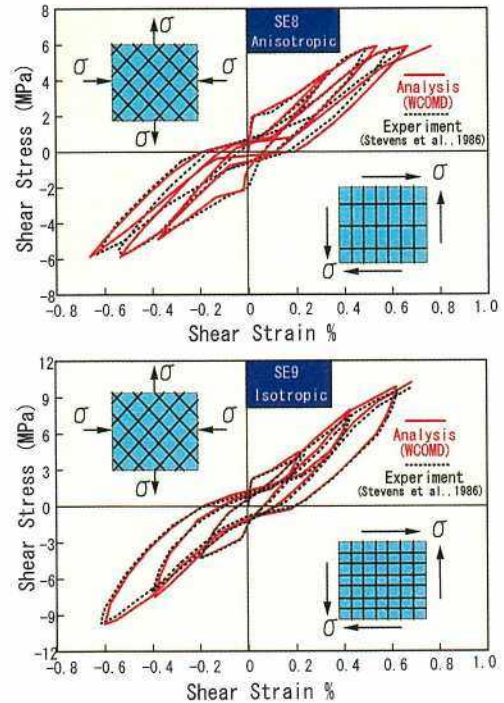


図-1 交番面内せん断を受ける RC 板要素

域の両者を包含する。動的解析で避けて通れない技術的難関として、2 方向ひび割れの考慮、交番载荷におけるひび割れの開閉とひび割れ面での応力伝達、ひび割れ位置での鉄筋塑性の局所化と塑性領域の拡大、付着と鉄筋の引き抜け、ひび割れに囲まれるコンクリートの変形と破壊等がある。これらの挙動を明らかにし、構成則にまとめる努力が払われ、これに 10 年余の歳月を要した。詳細は別著¹⁾に詳しいので、ここでは割愛する。

適用範囲と検証・応用

外的作用は、節点での力・変位・加速度のいずれかを時間ステップで入力する。出力は各要素内

1) 正会員 工博 東京大学助教授 工学部総合試験所
2) フェロー 工博 東京大学教授 工学系研究科

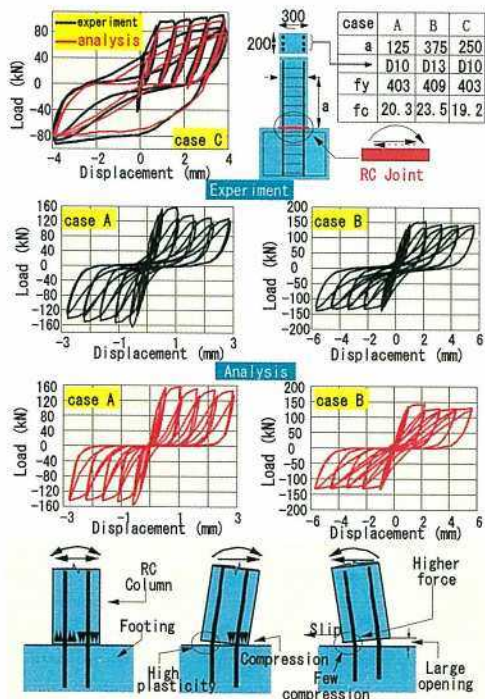


図-2 交番水平力を受ける RC 極短柱の応答

の応力・全ひずみ・塑性ひずみ・コンクリートの損傷度・ひび割れ間隔および各節点での変位・反力・速度・加速度，並びに設定された面での断面力である。これによって，実 RC 構造の挙動と解析による予測との比較を以下に示したい。

図-1 は RC 板に交番せん断繰り返し荷重が作用した時の応答である。耐力と変形能を含めて精度良く予測が可能である。内部曲線の予測精度は，構造物のエネルギー吸収能に深く関わっているので，動的解析では特に重要である。

図-2 は小型極短柱の交番繰り返し挙動を示す。この場合，フーチングからの鉄筋の抜け出しと躯体一柱間のせん断変形が，躯体自体の変形と比較して顕著となる。鉄筋付着の構成モデルと，部材接合面でのコンクリートの応力伝達モデル両者の精度がものをいう例である。片振り载荷のケース C では，繰り返しによる耐力の低下は見られない。しかし，交番両振り载荷のケース A, B では，第 2 ループ以降の水平耐力が低下することが，解析においても正しく再現されている。

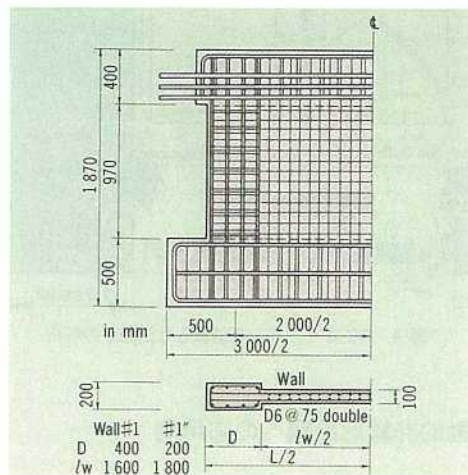
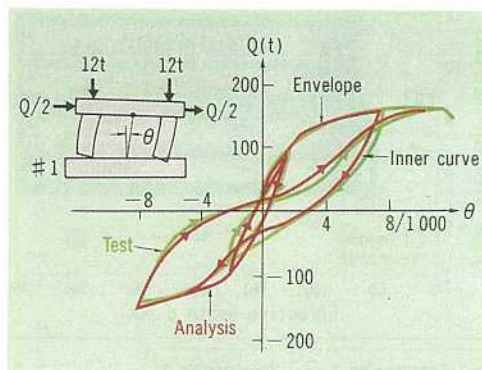


図-3 交番水平力を受ける RC 耐震壁の挙動

図-3 は壁および柱・はりの組合せである耐震壁の繰り返し挙動である。壁構造に関しては集中的に検証を実施しており，特に RC 板要素の構成則の精度を部材レベルでチェックする際に，単層・連層耐震壁の実験結果を活用した¹⁾。

図-4 は種々の寸法の RC はり（桁高さ 10 cm から 3 m）のせん断破壊を解析したものである。部材断面で平均化された見かけのせん断強度は，寸法によって異なることが実験的に知られている。寸法の大きな土木構造物の動的挙動を解析する場合，この寸法効果が正しく解析できる能力を有することが不可欠である。せん断耐力の寸法効果および変形能が精度良く予測されていることがわかる。これは，コンクリートのひび割れに直交方向および平行方向のひび割れ後の応力伝達モデルが，大きく解析精度に関わっているケースである。

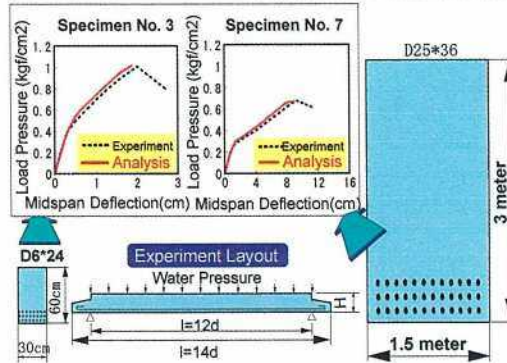
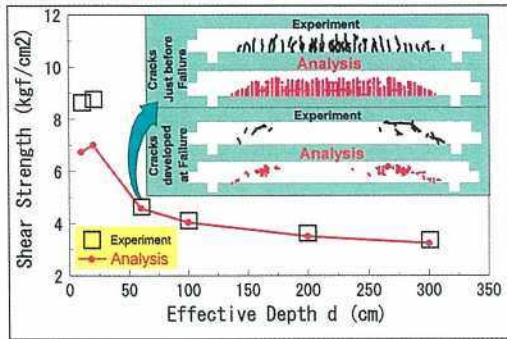


図-4 RC はりのせん断破壊と寸法効果の解析

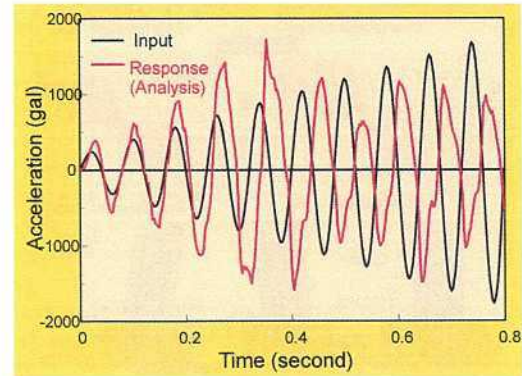
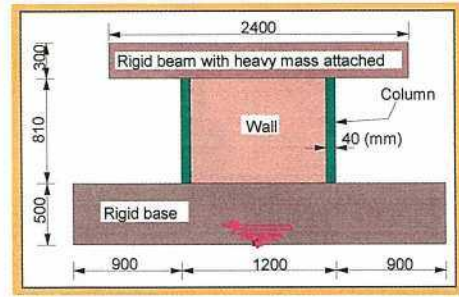


図-5 RC 耐震壁の動的応答解析

動的非線形問題への応用例

動的な問題への応用例として、耐震壁の動的応答解析を取り上げる。耐震壁に水平加速度が作用すると水平慣性力のみならず、鉛直・回転慣性力も励起される。鉄筋コンクリートの力学挙動が強い非線形性を呈するがゆえに、鉛直・回転慣性力が水平復元力特性に跳ね返って影響を及ぼす複雑な連成系をなす。図-5に耐震壁の時刻歴応答の一例を示す。

図-6は解析から逆算された耐震壁部分の水平方向の動的復元力特性の一部を抜き出したものである。このように、静的作用と動的作用では両者の見かけの復元力特性は異なることがわかる。静的作用では耐震壁に鉛直荷重は発生しないが、動的荷重では励起された上下動による慣性力が耐震壁に作用する。そのために、主たるせん断抵抗機構を受け持つ壁の応力状態が変化し、ひいては水平方向の復元力特性に影響をもたらすことになる。このような連成の問題は、以前は動的載荷実

験をしなければわからなかった事項であるが、解析によってこれを予測することが可能となった。

図-6はせん断方向について、見かけの動的・静的等価粘性減衰定数を、復元力特性の解析結果から逆算したものである。これを用いて、壁部材で構成される構造系の動的挙動を解析することも可能である。しかし、繰り返し応力履歴に対応するRC構成則に基づく動的解析では、部材毎の復元力特性を仮定する必要はなく、構造全体系を直接解析すればよい。構成部材の履歴減衰特性は、自然な形で考慮されるのである。

現在、阪神大震災で被災したRC橋脚の分析に本技術を応用しており、1995年土木学会誌4月号の緊急報告でその一部を紹介した。橋脚の場合、かぶりの剥落が少なからず動的応答に影響を及ぼす。これを考慮するための、剥落の自由度を有するかぶりコンクリート要素も合わせて開発されている。図-7は柱の交番繰り返し載荷時の挙動を予測したものである。なお、横補強鉄筋による曲げ圧縮部コンクリートの3次元拘束効果および主

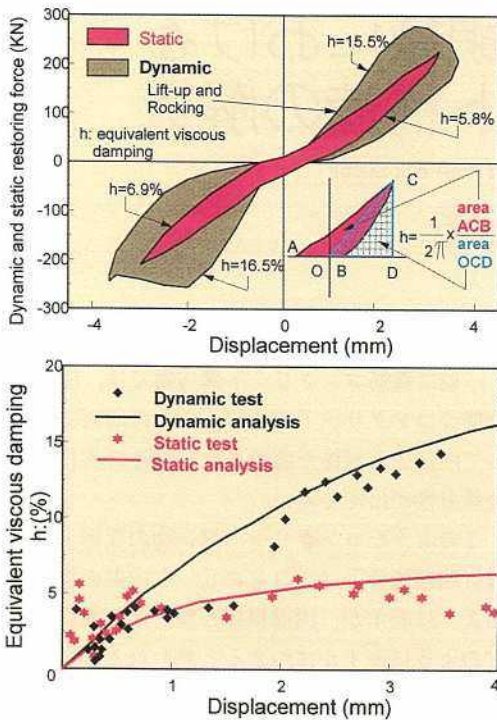


図-6 RC耐震壁の復元力特性の解析

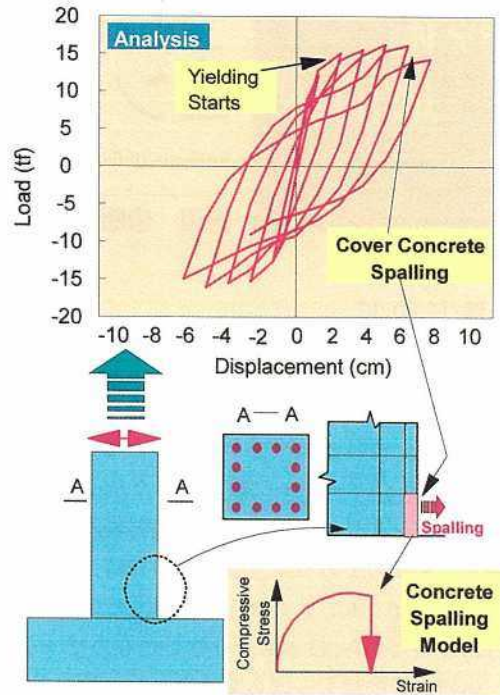


図-7 RC単柱の復元力特性の解析

鉄筋の座屈は、動的2次元版では考慮されず、せん断補強筋としての役割のみが考慮される。3軸拘束下でのコンクリート部材の解析については、弾塑性破壊型の構成モデルを取り入れた3次元解析によって考慮する方向を取っている。

まとめ

現在、この解析技術を更に進めて、地盤—RC構造の2次元動的版(WCOMD-SJ)および動的3次元版(COM3)の開発に入っており、一部、研究的な側面から阪神大震災における被災構造物の崩壊原因の究明、地中構造物の耐震診断法、拘束を受けるコンクリート部材の靱性等に応用しているところである。今後の開発項目として、任意の応力履歴を受ける鉄筋コンクリートの3次元構

成則の開発が望まれる。また、3方向、4方向に導入されるひび割れを扱う必要性もRC構造の多様化とともに高まってくるものと予想される。多くの研究開発項目が残されている。更に多角的な検証と改良・増強を経て、RC構造技術者の夢、『あらゆる鉄筋コンクリートがあるがままに解析する』技術の実現に向けて努力していきたい。

参考文献

- 1) 岡村, 前川: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991年
- 2) FORUM-8, WCOMR User's manual, 1990年5月
- 3) Song, C. and Maekawa, K.: Dynamic nonlinear finite element analysis of reinforced concrete, Journal of the Faculty of Engineering, the University of Tokyo (B), Vol.XLI, No.1, 1991年