非線形有限要素法による コンクリート構造物の挙動シミュレーション技術

福浦 尚之*1·小野 英雄*2·加納 宏一*1

Keywords: non-linear FEM analysis, performance based designs, seismic designs 非線形有限要素解析,性能設計,耐震設計

1. はじめに

性能照査型設計法(性能規定型設計法)が、実際の設計 実務に取り入れられてきつつある中、非線形有限要素法 によりコンクリート構造物の挙動をシミュレートする技 術は、設計技術を構成する要素の一つとして有用である と考えられる。本報では、構造設計に非線形有限要素解析 を適用する際の留意点及び非線形解析による検討の例を 示すこととする。

2. 性能照查型設計法^{1),2)}

コンクリート構造物の設計法の基本的枠組みとして、 構造物の供用期間中に求められる性能を規定し、それを 満たしている事を照査する性能照査型設計法(性能規定 型設計法)が、主流となりつつある。

この流れを加速させる要因としては、有数の地震国で ある日本において地震に対する安全性の確保をより確実 なものとしていかなくてはいけないとともに、それを構 造物の計画・建設から供用期間中を通じて関係するすべ ての国民に極力、具体的かつ分かりやすく説明する責任 が求められている事が上げられる。また、経済性に優れた 構造物の建設が厳しく求められている中、過度の性能を 有しない適切な性能を有する構造物の設計技術は、施工 技術及び材料の高度化と並んで重要なポイントである。

構造物に求められる性能(要求性能)は多種多様であ り、実際の設計作業を行うためには性能・照査の具体化が 必要である。その例として、土木学会「コンクリート標準 示方書 構造性能照査編」では、照査の原則として、構造 物の要求性能に応じた限界状態(終局限界状態、使用限界 状態、疲労限界状態)を設定し、構造物の応答値がこれに

*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

*2 設計本部特殊構造グループ

至らない事を確認することで性能照査を行うことを原則 とすると記されている。すなわち、基本的には以下の判定 を行うこととなる。

S(応答値) < R(限界値)

限界値は、構造物の機能・利用形態等により異なり、これを具体的な指標と数値として如何に定めるかは非常に 重要である。

応答値は、構造物が想定される外的作用を受けた場合 の挙動から得られるものである。構造物を比較的忠実に モデル化する有限要素法は、その結果として構造物各部 での変形、応力、ひずみなどの各種応答値が得られる事か ら、多様な限界値に対応する事ができる手法である。しか しながら、一般に応答値として必要となってくるのはコ ンクリートがひび割れて非線形な挙動をしている状態で のものである。設計用応答値として非線形有限要素解析 による結果を利用する事に関しては様々な意見があり³¹、 その精度・適用範囲に関しては、今後さらに設計的な議論 がなされて行く必要があると考えられる。

3. 非線形有限要素解析による応答値の算定

構造物の設計に用いる応答値を非線形有限要素法によ り求める場合、その精度を左右する要因は、図-1に例示 したように、構造物への作用力はもとより、ひび割れ下で のコンクリート・鉄筋などの個々の材料挙動モデル、これ らの材料挙動モデルを組み合わせたひび割れ下での有限 要素内の挙動を表現する構成モデルである。これにより、 有限要素分割されたコンクリート構造物の挙動が求めら れる事になる。さらに、コンクリート構造物部を構成する 基礎構造と地盤との相互作用を適切にモデル化する必要 がある。

応答値の精度は高いほうがよいが、その不確かさに応



図-1 構造物の挙動のモデル化^{4),5)} Modeling of structural responses

じた安全係数を設定することで、構造物の性能を照査す ることのできる枠組みは前述の通り構築されている。し かし、安全係数を具体的かつ適切に設定する為には、適 用範囲を含めた不確かさの程度が把握される必要がある が、安全係数設定のルール化は現時点において明確に規 定されているわけではなく、各方面で具体化に向けた努 力がなされている最中である³⁾。

非線形有限要素解析により設計を行う際には、設計の 手順がルール化されている必要がある事とは別に、実務 設計者にどの程度の負荷がかかるのか、スムーズな設計 作業を行う事ができるのか、という非常に重要な問題が ある。

有限要素解析作業の流れを以下にしめす。

- 1)入力:設計用材料物性値・作用力の設定、対象構造 物の解析モデル化
- 2) 計算: (計算時間)
- 3)出力:設計用応答値(耐荷力・変形・応力・ひずみ 等など)の決定

非線形有限要素解析では非常に膨大なデータを扱う事 になるため、効率的な設計・解析システムの構築が必要 となってくるように思われる。有限要素解析は土木建築 構造をはじめ、広く工業製品一般の設計に用いられる中 で発展してきたシミュレーション手法である。広く産業 全般で培われたノウハウ・成果が集約されている汎用F EM解析プログラム及びプリポスト処理の支援システム を利用することは、土木建築構造物の設計実務の効率化 に有用であると考えられる。

具体的なメリットは、プリポスト処理の効率化、構造 物のモデル化に際して多様な要素ライブラリーが使用で きる事及び非線形解析の計算時間の短縮である。

デメリットとして挙げられるのは、コンクリート構造 の材料モデルに関する最新の成果がすぐさま反映させら れているわけでは無いことである。但し、一般に汎用解 析プログラムにはユーザーサブルーチンとして個々の材 料挙動モデルに関する成果を利用者が直接プログラミン グすることで解析プログラムに取りいれるプラット フォームが設けられているので、それを用いることでデ メリットを解消していく事が可能となるものと考えられ る。

以下に、コンクリート構造の非線形解析による検討の 例を示すこととする。



図-2 独立4方向ひび割れモデルの概要 Non-orthogonal and 4-way crack modeling

4. 多方向ひび割れモデルによる解析シミュ レーション

4.1 アクチブラック法に基づく独立4方向ひび割れモデ ルの概要

コンクリート構造物の挙動を表現する構成則では、材料損傷状況をできる限り物理現象に忠実に再現した形で 表現することが求められる。これらの背景から、前川、筆 者らは構造要素内に独立な4方向のひび割れ群を有する RC挙動に対し、従来のアクチブクラックの概念⁴⁾を適用 し、異なる方向を有するひび割れ群間の相互作用(内的釣 り合いと適合条件)を考慮した鉄筋コンクリートの構成 則を構築した⁵⁾。

アクチブクラックの概念は、岡村・前川らがRCパネル の正負交番載荷モデルを構築に際して初めて適用したも のである。図-2に示すように2方向にまで擬似直交ひび 割れ軸を許し、主たる非線形性を担う局所軸にひび割れ 直交方向のひび割れ幅が大きい方を採用するものである。

4.2 5層耐震壁の動的破壊実験との比較6)

振動台を用いた5層耐震壁の動的破壊実験との比較解 析を示す。この解析は、blindベンチマークとして実験供 試体の諸元・入力地震波のみがベンチマーク解析参加者 に提示され、実験結果が公表される前に行われたもので ある。1998年9月にフランスで開かれた国際 workshop



図-3 5 層耐震壁の動的破壊実験の概要 Experiment set-up of 5-stories shear wall

にて正式にデータが公表され、各解析結果が実験結果と どのように適合したか否かの判定が公開された。前川、福 浦らはこの国際blindベンチマークに参加しており、本 解析結果は後に公開された実験結果と良好に一致し、22 機関のエントリー、最終応募8機関の中で最も高い適合性 を発揮したものであったことが示された。

図-3に試験体を示す。2枚の耐震壁が各階の床版とボルトにて接合されており、床版にはカウンターウエイトが付加されている。加振方向は、壁の面内水平方向のみであり、入力地震波に抵抗する構造部材は2枚の耐震壁のみである。また耐震壁面外方向の2次的な振動を防止するために、床版に鋼製ブレースが設置されている。

この耐震壁は以下のような構造的な特徴を持っている。 1)鉄筋は壁の両側と中央のみに配筋されており、低鉄筋 比部材である。2)コンクリート打設は各層毎に行われて おり、各層間には明らかな施工打継ぎ目が存在する。FEM モデルの作成においては、以上の点を考慮することとし た。

3種類の入力地震波が提示された。それぞれ最大加速 度は0.24G、0.4G、0.7Gである。動的解析は、直接積分 による時刻歴応答解析によった。図-4に構造物に大きな 非線形性をもたらす事を目的とした入力地震波CAMUS19 (最大入力加速度0.7G)に対する応答結果を示す。鉄筋は 塑性状態に至り、斜め方向のせん断ひび割れも発生して いるので、多方向ひび割れを考慮できる本構成モデルの 検証に相応しい対象である。最大応答値およびそれ以後 の振動特性と残留変位は、ほぼ実験と一致していること が分かる。最大応答以後の振動特性は復元力特性の内部



図-4 解析と実験の比較(CAMUS19) comparison between test and analysis -CAMUS19-

履歴曲線の精度に大きく依存することから、構成モデル の除荷・再載荷時の履歴特性も適切に反映されているも のと判断される。図-5に、CAMUS19での最大応答変位時 の解析での最大主引張ひずみ分布と実験のひび割れ分布 図を比較する。これより、コンクリート損傷部位に関して も良好に予測できていたことがわかる。

4.3 地下タンクの3次元非線形解析7)

地下タンクの耐震設計は、レベル1耐震設計において 躯体全体をモデル化した3次元シェルモデルによる等価 線形解析を行い、レベル2耐震設計においては同様の等 価線形解析あるいは材料非線形解析を行うものと規定さ れている。鉄筋コンクリートの非線形挙動を直接に取り 込む解析においては個々の荷重に対する断面力の重ね合 わせではできず、検討ケースに対応する全荷重を同時に 作用し、さらにその荷重の載荷順序を忠実に再現する事 が必要である。RCの非線形性は発生するひび割れに大き く依存するものであり、ひび割れ発生の過程を忠実に表 現する事が構造物の非線形挙動の予測に対して重要なポ イントとなるからである。また、地下タンクではRCの非 線形性のみならず、地盤の非線形性、底版と側壁の接合





部の非線形性をバランス良く取り込むことが重要であ る。

図-6に示す20万k1LNG地下タンクと周辺地盤を想定 し、構造物に厳しい応力状態となる地震時のケースの1 つを選定した。表-1に検討ケースの荷重の組み合わせを 示す。このケースは、構造物をモデル化したシェル要素 に結合された地盤バネ端に地震時の地盤変形を与える応 答変位法によるものである。解析により検討する地震動 レベルは地表面で300ga1相当である。図-7に解析モデル を表-2に解析ケースを示す。線形解析と非線形解析を比 較することとした。図-8に解析手順を示す。荷重の載荷 順序、地盤バネの非線形性(地震時主働、受動土圧を限 界土圧とする)を考慮している。

解析結果を図-9、10に示す。これらの結果より以下の 事がわかる。

表-1 検討ケース Loading case

検討ケース:地震時,空液時	
常時荷重	地震荷重
躯体自重,屋根荷重	地盤変形
水圧	(応答変位)
土圧	躯体慣性力
ガス圧	
温度荷重(LNG)	

表-2 解析ケース

Analysis case

ケースA	ケースB	
RC部非線形	RC部線形弾性	
コンクリート :		
屋根部f'ck=30MPa		
(E=2.8E4MPa *1)		
側壁部f'ck=27MPa		
(E=2.7E4MPa *1)		
鉄筋 *2:		
屋根部p =ps=2.4%		
側壁部p =0.6%(EL13.2~-48.0m		
側壁部pz =0.6%(EL13.2~-19.1m		
側壁部pz =0.9%(EL-19.0~-48.7m		
規格引張降伏強度fy=345MPa		
注>*1:ケースBで使用		
*2: ケースBの結果に基づき設定		



1) RCの非線形性を考慮したケースAの方が鉛直方向の曲 げモーメントは小さく、設計の合理化が図れる可能性が ある。

2) 地盤応答変位により0°側ではEL-30m以浅は主働状 態にあり、180°側ではEL-10m以浅は受動状態、EL-30m 以深は主働状態にある。ちなみに、地震動による地表面 地盤変位8cmに対して、地下タンクの変位増分は最大で 2.5cmであった。



4.4 水平2方向同時加力を受けるRC造立体耐震壁⁸⁾

小野らは、RC造の立体耐震壁(ボックス型、円筒型) を対象として、水平2方向から同時に加力を受けた場合 の弾塑性性状を明らかにし、復元力特性を評価すること を目的として、ボックス型及び円筒型の耐震壁に対する 水平2方向加力試験の解析を行っている。また、2方向加



図-11 RC造立体耐震壁試験体形状と加力パターン Test set-up and loading diagrams

カ時の特性を包括的に評価する有力な手段としての非線 形解析の適用性について検討を行っている。検討の概要 を図-11、12に示す。

これより、独立4方向ひび割れを考慮する構成モデルに より、水平2方向から同時加力を受けるRC立体耐震壁 の挙動を概ね模擬できること、水平2方向加力において、 直交方向加力による損傷が、全体変形角でコンクリート の圧壊が生じない4×10⁻³程度であれば、最大耐力及び 耐力時の剛性に与える影響はごく小さいことを明らかに した。

5. 汎用 FEM 解析 プログラムとユーザーサブ ルーチンの組合せ例

汎用有限要素解析プログラムとユーザーサブルーチン を組み合わせて梁のせん断破壊解析を行った。コンク リート及び鉄筋の材料モデルは岡村・前川⁴⁾によるもの を用いている。ひび割れに関する構成モデルは基本的に 固定ひび割れモデルを採用しているが、アクチブク ラックの概念を取り入れ、第1ひび割れの発生以後に新 たなひび割れが発生した場合にはその都度、ひび割れに 関する応力を算定する局所座標系を新たなひび割れに移 動している。従来より固定ひび割れモデルは梁のせん断 解析において荷重-変位関係の傾き(剛性)を高く算定す る傾向にあることが言われている。これは、荷重載荷初期 に発生する曲げひび割れが、荷重が増加して斜めせん断 ひび割れに移行していく挙動を十分にモデル化できてい ないことが一つの要因である。本検討では、この点につき 実際の挙動に忠実にモデル化したものである。



Results of analyses

解析対象は図-13、14に示すように、せん断補強筋の 有無をパラメータとした載荷実験⁹⁾とした。図-13、14、 15に示した実験結果との比較より、解析は最大耐力及び 変形性状を概ね良好にシュミュレートできている。また、 せん断補強筋が有ることで、斜めひび割れが梁支持点側 に順次広がっていく挙動、せん断補強筋の無いケースで もせん断スパン比が3.8程度であることから、斜めひび 割れ発生後もコンクリートの圧縮アーチの効果により荷 重が僅かに増加する挙動なども表現できているものと考 えられる。



図-13 せん断補強筋の無い梁 Case of non-transverse reinforcement beam

6. おわりに

構造設計に非線形有限要素解析を適用する際の留意点 及び非線形解析による検討の例を示した。解析適用例が 実設計物件の適用ではなく、部材挙動レベルでの検証例、 実構造物を対象とした検討例にとどまった事をご容赦願 えれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] 編, 2002年制定
- 2) 土木学会:コンクリート構造物の耐震技術-現状と将来展望 -,コンクリート技術シリーズ20,平成9年7月
- 3) 土木学会:コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員 会成果報告書,コンクリート技術シリーズ50,平成15年1月
- 4) 岡村甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析と構成 則,技報堂出版,1991.



b) 最大耐力時(C点)の最大王引張ひすみ(解析) Principal tensile strain distribution at maximum load (analysis)

図-14 せん断補強筋の有る梁 Case of transverse reinforcement beam



- 5) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : NONLINEAR MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE, Spon Press, London, 2003.
- 6) 前川宏一, 福浦尚之: 多方向ひび割れを考慮したRC構成則 の部材・構造挙動からの検証, 土木学会論文集, No. 634/V-45, pp. 209-225, 1999.11
- 7)福浦,高木,津田,田中:3次元FEM解析による地下タンクの地震時挙動,大成建設技術研究所報,pp.103-106,Vol. 31,1998.
- 8)小野,新谷,草間,前川:水平2方向同時加力を受けるRC
 立体耐震壁の解析的検討,コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, 2003.
- 9)山谷,中村,檜貝:回転ひび割れモデルによるRC梁のせん 断挙動解析,土木学会論文集,No.620/V-43, pp.187-199, 1999.5