

耐震解析技術 —耐震性能照査と動的解析技術—

渡辺 忠朋*

1. はじめに

昨今、耐震設計における解析技術は、他の荷重作用に対する解析技術に比べて著しく変化してきている。

とくに兵庫県南部地震の土木構造物の被害を契機として、耐震性能照査に用いる解析技術は構造物の地震動による動的な応答を直接表現できるように、土木学会¹⁾をはじめとして、鉄道構造物²⁾、道路構造物³⁾の耐震性能照査において動的解析法の適用が拡大されつつある。

本稿では、これまでの耐震性能照査における動的解析法の位置づけ、現状の耐震性能照査における動的解析法の適用法、および今後の検討課題等について示すこととする。なお、動的解析法そのもの、およびコンクリート部材等の構造要素の非線形性に関連する事項に関しては、種々の文献および専門書に譲ることとする。

2. 耐震性能照査と動的解析法の位置づけ

土木構造物を構築するための技術基準は、構造物に要求される性能を明確にして、その要求された性能の満足度を照査する、いわゆる性能照査型への移行が学協会や各機関で検討されている。性能照査型の概念に立てば、一般に設計者が構造物の構造形態、断面諸元および配筋状況を設定する作業は、構造物の性能の満足度を照査する作業とはおのずと異なる形態となり、異なる解析技術が必要となる。すなわち、動的解析技術を断面の設定や配筋の設定行為に使用することは極めて煩雑となり、設定行為には直接動的解析技術が必要となるわけではなく、異なる解析技術でもよいとも考えられる⁴⁾。

したがって、本稿では、耐震に対する性能の照査方法の一つの数値解析法として動的応答解析法を位置づけることとする。

地震時の構造物の応答を推定する方法自体を動的解析法と位置づければ、そのためには種々の方法がある(図-1)。これらの方法には、それぞれの特徴があり、構造物の特性や、要求される性能に応じて、適切な動的解析法が適用

されることとなる。

しかし、多くのエンジニアがいう動的解析とは、時刻歴非線形応答解析法を指していると考えられる。時刻歴非線形応答解析法は、構造物の動的な応答を、時々刻々と数値計算する手法であるため、地震動のもつイメージと極めてマッチする手法であることが、その最大の原因であると推測される。なお、動的解析法には、図-1に示すように種々の方法があることを認識しておく必要がある。

これまで、構造物の耐震性能を検討する場合には、動的解析技術を適用していなかったように、ある意味で誤解されている面もあると考えられる。

その理由は、これまでの多くの耐震設計法は、設計者が直接的なイメージをもたずに設計を行える手法であったことが影響していると考えられるが、耐震性能の照査における動的解析技術の位置づけが、大きく変化しただけであるとも解釈できる。

鉄道の技術基準の場合を例に説明する。鉄道の技術基準^{2), 5)}の近年の耐震に関する規定の変化を図-2に示す。

兵庫県南部地震以前と以降を比較すると、構造物の非線形挙動を考慮して、変形性能によって地震によるエネルギーを吸収するという理念のもとでは、まったく同一のものである。

兵庫県南部地震以前の技術基準では、地震動による構造物の非線形領域の応答を、ニューマークのエネルギー一定則を用いて推定し、地震動の影響を静的作用に置換して設計していたため、設計者は、他の限界状態における照査と

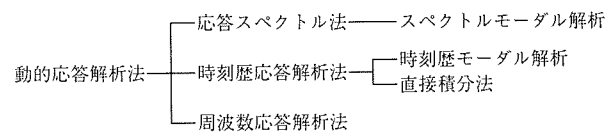


図-1 動的応答解析法の種類の例

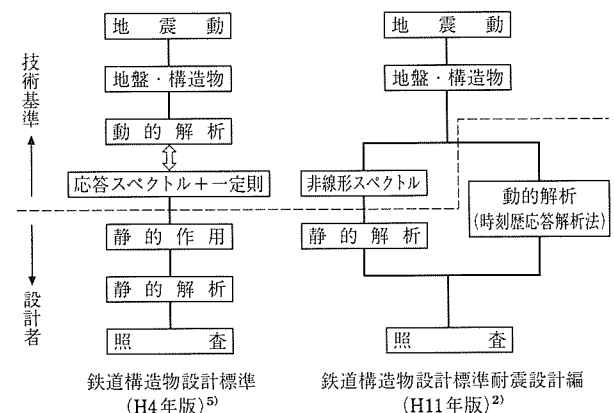


図-2 技術基準と動的解析の位置づけ



* Tadatomo WATANABE

北武コンサルタント(株)
専務取締役

同様に、静的作用に対する解析のみで、照査を行うことができた。しかし、このような設計手法に至る前には当然のことながら、事前に相当の動的解析法との比較検討がなされているわけである。すなわち、構造物の動的非線形挙動と、ニューマークのエネルギー一定則との適用性に関する種々の構造物の動的解析⁶⁾を技術基準作成側が行い、設計実務者側に提供していたと言える。

兵庫県南部地震以降の技術基準では、非線形スペクトルという概念を利用した照査法あるいは時刻歴応答解析法による照査法を適用することになった。

非線形スペクトル法は、技術基準作成側が構造物の動的な応答解析を事前に行っておき、設計者は静的なイメージで構造物の耐震性能の照査を行える手法という意味では、兵庫県南部地震以前の技術基準と大きな差はない。しかし、時刻歴応答解析法を適用することとなると、従来技術基準作成側が、事前を実施していた構造物の動的応答解析法が、設計者に委ねられることとなる。

このように、構造物の耐震性能の照査の体系自体は大きく変わらないが、一つの構造物の耐震性能の照査のために、動的解析を実施する箇所が変化しただけと考えることもできる。

なお、従来の構造物の耐震性能の照査は、静的な解析法を基本としているため、構造物の動的な応答結果に関しては、設計される構造物ごとに大きな差異は生じにくかった。しかし、動的解析法の適用が設計者へと変化したことにより、構造物の設計上の自由度は広がるものの、併せて動的解析法の手法、解析条件等によって、大きく解析結果が異なるなどの現象が生じることが容易に予想される。

3. 耐震性能照査技術における動的解析法の現状と課題

3.1 動的解析法と構造物のモデル化

構造物の動的応答を推定する手法を広義の意味で動的解析法として位置づければ、現状の耐震性能照査における解析技術との関係は、地震動の表現形式とも関連して、一般には、表-1に示すようになる。

構造物の応答に影響を与えるという意味で動的解析法に関係する事項として、構造物のモデル化の問題がある。構造物のモデル化に関しては、構造物のモデル化の範囲、構造要素のモデル化も種々の方法がある。構造物のモデル化の範囲に着目すれば図-3および図-4に示すように区分され、それぞれのモデルでの動的応答解析が求められることになる。

また、構造物自体のモデル化の問題は、材料または部材の非線形性の問題とも関連するが、現時点での構造物本体のモデル化の区分を図-5に示す。

表-1 照査用地震動の表現形式と応答解析法の関係の例

| 照査用地震動の表現形式 | 応答解析法 | 構造解析法 |
|-------------|----------|----------|
| 時刻歴波形 | 時刻歴応答解析法 | 動的非線形解析法 |
| 非線形応答スペクトル | 応答スペクトル法 | 静的非線形解析法 |
| 弾性応答スペクトル | 応答スペクトル法 | 静的非線形解析法 |

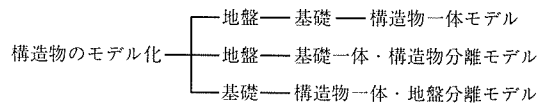


図-3 構造物のモデル化の例

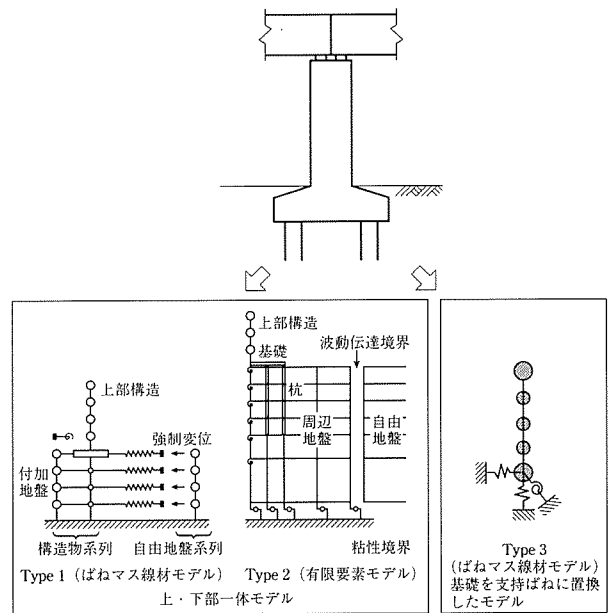


図-4 構造物のモデル化の範囲

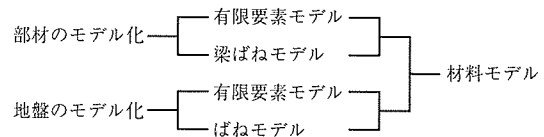


図-5 部材・地盤のモデル化

最近では、構造物本体のモデル化も、従来の棒部材にモデル化した集中質量モデルから、有限要素モデルへと変化しつつある。

このように、動的解析法は、構造物の特性、地震動の表現形式や照査項目に応じて、適切な応答解析法と構造物のモデル化の選定を行わなければならないことになる。

当然のことながら、同一の動的解析法を用いても構造物のモデル化によって応答値が異なることもあるため、構造物のモデル化の範囲と動的解析法との関係を整理検討することが重要な課題である。なお、一般に、種々の技術基準では、その適用範囲の構造物の動的特性を考慮して、標準的な手法やモデル化が提示されていると考えられる。

3.2 構造物の動的応答

動的応答解析は、構造物の動的な応答を推定する手法であることから、構造物を構成する材料または構造要素の性状は、動的な性状を用いる必要がある。また、動的解析においては、構造物の減衰等が応答に大きな影響を与えることになる。これらの要因は、時に構造物の照査結果を大きく左右することになる⁷⁾。

これまで行われてきた静的線形解析を主体として設計を実施してきた場合に、おおむね解析者や解析ツールによらず一定の解を得ることができたのとは対照的である。これ

は、解析ツールのロジック等の差異のみならず、解析者が設定する動的な影響を考慮するための数値に関して一定の見解が得られていない状況⁸⁾も影響していると考えられる。

たとえば、その一つとして減衰の問題がある。これまで、減衰は等価線形化法の場合に使用される等価粘性減衰定数等で代表されるように、主として非線形問題を線形問題として解析する場合の取扱いについて論じられてきた感がある。また、減衰はある意味では構造物の応答に対して大きな影響を与えるものであるが、時には応答値を減少させるための手段、または解の調整代的に取り扱われている場合も想像される。

動的解析には、速度効果や減衰特性等のRC部材の動的特性を考慮する必要がある。その場合、これまでの実験的または解析的検討を勘案すると、RC構造には速度効果がある⁹⁾、¹⁰⁾ため、速度項に比例する減衰の扱いは極めて重要ということになる。すなわち、RC部材に速度効果がある以上、速度に依存した減衰を設定する必要があることになる。

しかし、

- ① 静的復元力モデルを使用した実構造物の動的解析結果に示されるように、実構造物の応答は、材料の速度効果により加速度応答等が増加することから、初期減衰等で応答を低下させるような解析は、実際の応答を過小評価する方向へ解を誘導すること
- ② 部材または構造物の大変位領域までを対象にした解析においては、RC部材の復元力特性に考慮される履歴減衰が支配的と考えられること

などを勘案し、静的復元力モデルを使用した動的解析においては、安全側評価とすることを念頭に置き、むやみに構造減衰を考慮せず履歴による減衰を忠実にモデル化するのが現時点では肝要と考えることもできる。なお、減衰に関する詳細な検討や研究が、今後の重要な課題であると考えられる。

3.3 動的解析法と解析ツール

耐震性能の照査に動的解析法を適用する場合、解析ツ

ルを使用することになり、同様の目的で開発された種々の解析ツールがある。

これらの解析ツールは、ツールごとに非線形性の判定手法等、種々の特性を有している¹¹⁾。そのため、解析ツールの特性を十分認識して、解析に用いる必要がある。また、解析ツールの適用性を、相互にツール間で行うか、あるいは実験結果などをもとに検証するなど、いずれにしても、解析ツールの適用性の評価方法および適用範囲は、今後の重要な課題であると考えられる。

4. 今後の展望

耐震性能照査の照査技術としての動的解析法の課題と、今後の方向について以下に示す。

4.1 地盤・基礎・構造一体モデルの構築

耐震性能の照査は、言うまでもなく構造物全体系の性能を照査することである。したがって、一部の部材などの構造要素の応答を評価できても、構造物全体の性能を評価できなければならない。

図-6に示すように、構造物の地震による動的な応答には、種々の要因が影響を及ぼすことになる。それら影響因子の動的特性を、すべて明らかにしていくことが極めて重要な課題であるが、計算機の能力の向上とともに、すべての影響因子を考慮した解析が実現するものと考えられる。

一方、現状では必ずしもすべての影響因子の動的特性が明確にされているわけではないため、現時点の解析結果自体も、多くの不確定要素を含んだものであることを十分認識しておく必要があると考える。とくに、耐震性能の照査を目的とした動的応答解析では、使用する地震特性、構造物の剛性や構造物のモデルによって、その照査結果が大きく変化することになるため、個々の因子の影響度合いを十分に認識したうえで、照査結果を判断する必要がある。そのためには、解析条件などの共通したルールの上での動的解析の適用が望まれる。

4.2 照査指標と動的解析

土木学会をはじめとした種々の機関での耐震性能照査に

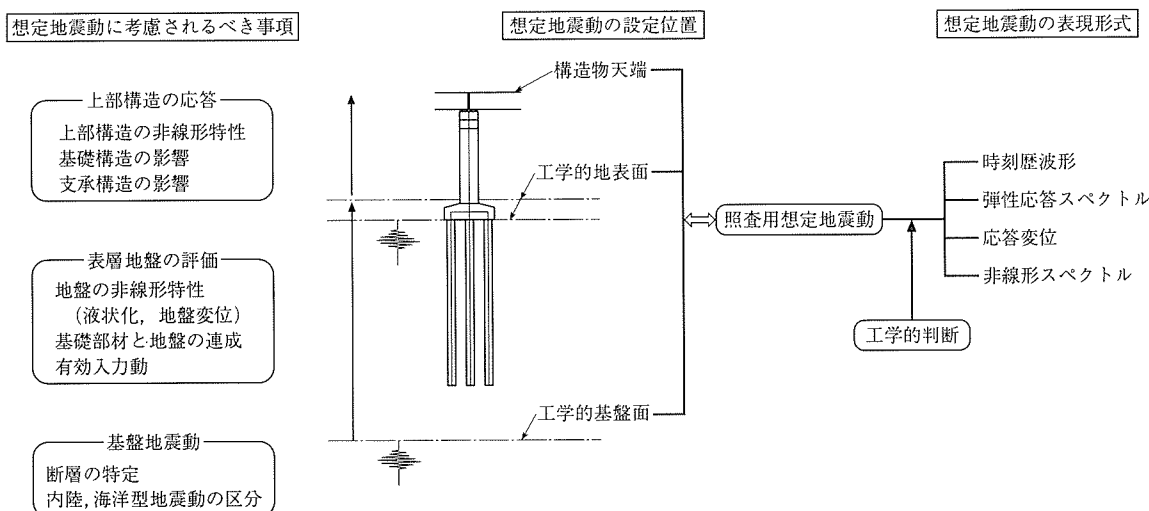


図-6 動的解析に考慮される要因

においては、構造物の復旧性に関する性能を重要な性能と位置づけている。部材の修復性を照査するためには、部材の損傷過程を直接表現しうる指標を用いて性能を照査するのが望ましい。これまで、動的解析から得られる解としては、多くの場合、変位や断面力などであった。しかし、部材の修復性等を照査することになれば、地震の影響によって、構造物または部材にどのような損傷が生じるかということ推定することが重要となる。したがって、これまでのように単に部材の変位を動的解析法によって推定するのではなく、部材の損傷状況を推定することを目的とした動的非線形解析技術が必要となると推測される。現時点で考える損傷状況の照査指標と解析法の関係、および復旧性へのプロセスを図-7¹²⁾に示す。

図-7に示すように、部材の損傷状況から修復性に関する情報を得るためには、損傷の範囲、部材を構成する材料の損傷状況が必要となる。たとえば、鉄筋コンクリート構造の場合は、軸方向鉄筋や帯鉄筋の変形の程度、かぶりコンクリートの剥離状況、コアコンクリートのひび割れ状況などが必要となる。これらの情報が得られれば、前述のように、部材を修復するために要する補修工法が選定され、構造物の復旧性を評価できることになる。

なお、有限要素解析等により、材料の損傷状況を推定する技術は一部で実現されており、このような解析技術を用いて照査を行うことは、解析技術の向上とともに近い将来実現されると考えられる。

4.3 解析条件設定のルール化

動的解析は、解析ツール、構造物のモデル化、質量配置、減衰条件、収束判定法および計算時間間隔等の解析条件によって、解析結果が大きく変化する。したがって、これらの解析条件に関しての一定のルール化は、精度の良い耐震性能照査法を構築するために緊急かつ重要な課題と考えられる。

5. おわりに

構造物の耐震性能照査の解析精度を向上させるためには、構造物を構成する地盤も含めた各構造要素の動的特性をできるだけ正確に考慮する必要がある。構造物は、地盤、基礎、部材および支承構造等の種々の構造要素で構成されているため、すべての動的特性を把握するには、相応の時間が必要と考えられる。構造物全体系での応答が、個々の構造要素の集合体であるからには、構造要素ごとの動的特性および各要素間の相互作用が把握されてこそ、解の信頼性が得られるものと考ええる。今後は、この種の調

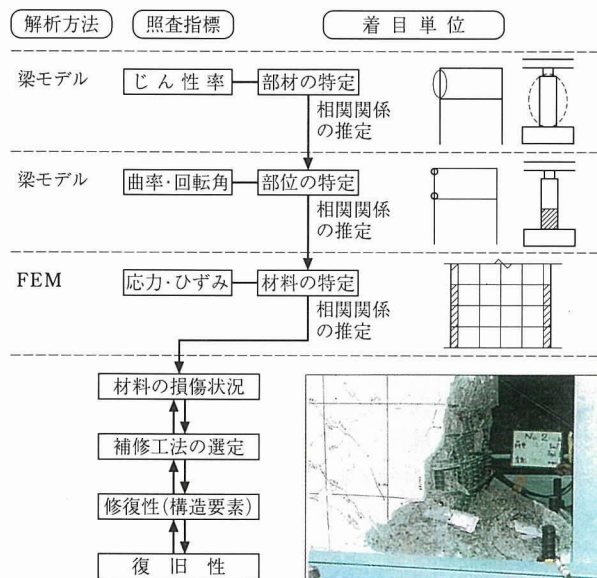


図-7 損傷状況の照査指標と解析法の関係および復旧性へのプロセス

査・研究が進み、個々の動的特性が把握されるとともに、現時点で最も合理的な耐震性能照査のための動的解析法および解析技術の確立が必要であると考えられる。本稿が、耐震性能の照査における動的解析法の適用の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(耐震設計編)，1996
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計編)，1999.10
- 3) 道路協会：道路橋示方書 V耐震設計編，1996.12
- 4) 杉本，渡辺，齊藤：RCラーメン高架橋の耐震補強最適化に関する研究，土木学会構造工学論文，Vol.46A，pp.385～394，2000.3
- 5) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物編)，1992
- 6) 松本，涌井：コンクリート構造物の耐震設計に用いる地震荷重，鉄道総研報告，Vol.6，No.1，p.33～42，1992.1
- 7) 下野，谷村，玉井，渡辺：PC橋脚の地震時応答に関する一考察，鉄道総研報告，Vol.13，No.4，pp.21～24，1999.4
- 8) 日本コンクリート工学協会：「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム—過大地震動入力による構造物の崩壊防止をめざして—，委員会報告書・論文集，1998.8
- 9) 睦好，町田，鶴田：ひずみ速度を考慮した鉄筋コンクリート部材の動的非線形地震応答解析，土木学会論文報告集，第366号/V-4，pp.113～122，1986.2
- 10) 睦好，町田：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性および破壊性状，土木学会論文報告集 第354号，pp.81～90，1985.2
- 11) 土木研究センター：平成9・10年度耐震設計ソフトウェアに関する研究報告書，1999.4
- 12) 土木学会：コンクリート構造物の耐震性能照査—検討課題と将来像—，コンクリート技術シリーズ34，2000.1

[2001年2月1日受付]