

4.4 土木構造物の耐震性能照査への利用

4.4.1 はじめに

地震動予測技術の発展をベースに、地盤や構造物の2段階設計の枠組みが各分野の設計法として体系化されてきている。性能照査型設計法とあいまって、新技術の導入が促進され、従来よりも安全性が高く、かつ経済的な設計や維持管理が可能になるように期待される。ここでは、土木耐震分野で議論されている地震動予測技術の適用についてその動向を述べる。

4.4.2 耐震安全性照査に用いる地震動

本節では、土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会（委員長 西村昭彦氏、(株) テス（当時））が2001年9月に発行した「土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）－耐震基準作成のための手引き－」¹⁾（以下、ガイドラインと称する）におけるレベル2地震動について述べる。レベル2地震動は、構造物の耐震安全性照査に用いる地震動である。一方、地震後の使用性に係わる要求を経済的に満たすことを目的とした経済性照査（仮称）に用いる地震動は、これとは別に定める必要があり、それについては4.4.3で同・小委員会の試案を紹介する。

(1) 要求性能と設計入力地震動

土木学会では1995年兵庫県南部地震による阪神淡路大震災の後、同年5月と翌年1月の2回にわたって耐震基準等に関する「提言」を行った²⁾。その中で、今後、土木構造物の耐震性能の照査では、レベル1およびレベル2の2段階の地震動強さをを用いるべきことが述べられ、レベル1地震動は原則としてそれが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準を示す、レベル2地震動はきわめて希であるが非常に強い地震動を定式化したもので構造物が損傷を受けることを考慮してその損傷過程にまで立ち入って構造物の耐震性能を照査する水準を示す、としている。

このうち、レベル2地震動の考え方については、土木構造物の耐震設計に関する特別委員会作業グループ(WG1)が地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会とともに調査検討した内容は2000年6月に第3次提言³⁾の一部として公表されるとともに、同小委員会の調査報告もまとめられている⁴⁾。すなわち、レベル2対象地震を先に選定し、これによる当該地点の地震動を評価することを原則としている。

「提言」でレベル2地震動は「極めて稀であるが非常に強い地震動」と表現されているが、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震と主要な活断層による内陸直下の地震は、大きな地震動強度を示す点では共通性があるが、再来期間は前者が100年オーダー、後者が1000年オーダーと大幅に異なっている。しかも全般的に特定の地震の再現期間に

関する情報は現時点では極めて不足しているため両者を同列に扱いにくいことから、ガイドラインでは地震危険度の情報も参照してレベル 2 対象地震を選定することとしたものの、地震危険度をレベル 2 地震動の評価に直接用いていない。

現在の科学技術は、震源断層の破壊プロセスが確定すれば地震動はかなりの高精度で評価できる段階にある。しかし将来の地震に関しては震源断層の破壊プロセスに不確定要因が多く、予測にはばらつきが不可避である。とりわけ、大きな破壊力を示す強い地震動の発生メカニズムに関しては、未解明ないし不確定の部分が多い。そのため、耐震機能と経済性のバランスのもとで合理的と判断される地震動強度を選定することが必要であり、その場合にレベル 2 地震動は物理的に発生可能と考えられる極限としての最大地震動強さを下回ることもある。レベル 2 地震動を最大級の強さをもつ地震動としたのは、このためである。強震動下における構造物の非線形挙動が脆性的であるか塑性的であるかによって、強震動が構造物の耐震性能に及ぼす影響は、大幅に相異することが知られている。構造物のこのような応答特性を重視する立場から、レベル 2 地震動を対象構造物の耐震性能に対して、深刻な影響を及ぼす可能性が強い地震動と言い換えると、この用語の意味はより厳密になる。

(2) レベル 2 対象地震の選定

レベル 2 地震動の設定に際しては、まず当該地点において最大級の強さの地震動をもたらし得る地震を選定する。この地震のことをここでは「レベル 2 対象地震」と呼ぶ。レベル 2 対象地震は、原則として地震規模（気象庁マグニチュード）と震源もしくは震源断層の位置により表現される。次に、レベル 2 対象地震が発生した場合の当該地点における地震動を最も適切な方法により評価する。

一般に、耐震設計における地震外力の設定では、主として地震発生の問題に関する対処方法として、確率論的地震ハザード評価と想定地震（シナリオ地震）による地震動評価の 2 つの考え方が用いられてきた。ここでのレベル 2 地震動評価の考え方はこのうちの想定地震による地震動評価に当たる。昨今の強震動地震学の知見によれば、震源の特性（断層の形状や断層の破壊特性など）、地震動の伝播経路特性、地盤による増幅特性などをより詳細にモデル化して地震動を予測することが可能となってきており、こうした方法を駆使してレベル 2 地震動を評価するには地震の物理的イメージをあらかじめ想定しておくのが便利である。

土木学会の第二次提言の解説でも指摘されているように、地震荷重評価の観点からはできる限り共通の意思決定規範が用いられるべきであり、加えて性能照査型設計法への移行の趨勢を踏まえれば、今後は種々の構造物が保有する地震リスクを定量化しようとする方向にあると考えられる。こうした観点からは、レベル 2 地震動が確率論的な地震ハザードレベルと系統的に対応した形で設定できれば理想的である。しかしながら、わが国の多くの活断層の活動による地震発生確率は、例えば 30 年確率では数%以下のものが大半である

が、一方で宮城県沖地震や糸魚川・静岡構造線断層帯の活動による地震の30年間での発生確率はそれぞれ90%以上、約14%と公表されており、両者の値は大きく異なる。すなわち、最大級の強さの地震動が発生する確率は対象とする地点ごとにさまざまであり、これが発生確率の水準を揃えてレベル2地震動を設定することを困難にさせる最大の要因となっている。

ガイドラインでは、震源断層が特定できる非常に強い地震動は、その発生確率の高低にかかわらずレベル2地震動の候補として評価している。レベル2地震動と当該地点でのハザードレベルとの関係は地点ごとにさまざまであり、確率レベルを揃えてレベル2地震動を設定するという形にはならない。しかし、確率の情報が不要なのではなく、構造物の耐震性能照査の基礎情報としてレベル2対象地震の発生確率あるいはレベル2地震動の発生確率を明示しておくことが重要であるとしている。なお、この点に関しては、ガイドライン作成後の技術の進展（地震調査研究推進本部などの検討）を踏まえて、議論が進められている。

(3) レベル2地震動の評価

従来の耐震設計基準は、大きな地震災害が発生するたびに改訂され、設計地震動もそのつど引き上げられてきた歴史を持つ。従って設計地震動は、「既往最大」の地震動の性格を与えられてきた。最近でも1995年兵庫県南部地震を受けて多くの構造物の耐震設計基準が改定され、その設計地震動は例えば道路橋示方書などのように同地震において観測された地震動を参考に設定されている場合が多い。また、地震動は震源や伝播経路およびそれぞれの地点の地盤構造によって大きく影響されるが、従来の基準ではこれらの影響を言わば平均した形で地震動が評価されてきた。例えば地盤を3～4種類に分類した上で、それぞれに平均的な地盤の影響を考慮する方法などである。

このような方法で設定されてきた設計地震動は、多くの場合において構造物の地震被害の抑止に有効に働いてきた。1995年兵庫県南部地震においても幅数km、長さ20km程度の所謂「震災の帯」の地域以外では、重大な地震被害はそれほど発生しなかった。震災の帯の地域の被害は、震源断層に近かったこと、深層地盤および浅層地盤の影響で特に地震動が増幅されたため、従来の設計地震動を大きく超える地震動が作用したために発生したと考えられている。すなわち、この地震も含めて過去の地震被害を詳細に調査すると、震源断層に近い、地盤構造によって大きく地震動が増幅されたなど、構造物建設地点の特殊な地震環境、地盤環境が、過去の震災事例にない条件や、平均化された条件よりはるかに異なる条件の場合に、重大な地震被害が発生している。

1995年兵庫県南部地震で観測された地震動を参考に設定された新しい基準で構造物が設計されれば、今後もし神戸で同じような地震が発生した場合には、被害は遙かに少なくなることは間違いない。しかし、兵庫県南部地震で観測された地震動の大きさは大変大きいので、日本の殆どの地域では発生するはずもない大きな設計地震動で構造物が設計される

ことになり、大変な不経済となる。またごく一部の地域ではあるが、兵庫県南部地震時の神戸の場合より悪い条件となり、もっと大きな地震動が作用する危険性もある。また、兵庫県南部地震において震災の帯のなかで観測された地震動は存在しないので、これらを参考に設定された設計地震動は、神戸の震災の帯の中では十分ではないかもしれない。

以上の点を考えると、既往最大かつ代表的な地震動で、日本中の構造物を設計する従来の考え方が、経済的に地震災害を軽減するには、最早有効ではないことがわかる。今後新たに耐震設計基準の改定をおこなう場合には、建設地点の地震環境や地盤環境を個別に的確に評価して設計する体系に変える必要がある。このためには震源となる断層と構造物の建設地点を特定して、構造物ごとに個別に地震動を評価することが必要となる。すなわち、設計地震動が震源依存 (Source specific) かつ地点依存 (Site specific) であることを前提とすることである。

設計地震動を地盤種別ごとに応答スペクトルなどで明示してきた従来の設計基準に比べると、震源依存地点依存で、構造物ごとに地震動を推定するのは煩雑であることは間違いない。特に重要度のそれほど高くない構造物に対しては、大きな負担となることも考えられる。この点を解決する方法としては、地方自治体などが十分な活断層や地盤の調査をしたのち、震源となる断層を想定し、これらの断層からの距離が同程度で地盤構造がほぼ同じと見なせる大きくても数十平方km程度の地域ごとに、予め設計地震動を推計しておくことが考えられる⁵⁾。

(4) 不確定性の評価

1) 地震動評価における不確定性

対象地震の選定において過去の地震の再来を考える場合、規模や位置をそのままやみくもに用いるのではなく、そこに含まれる不確定性を考慮する必要がある。例えば、過去に発生したのと同じようなタイプの地震でも、規模がより大きな地震が発生する可能性や、当該地点により近い場所で発生する可能性についても検討しておくことが重要である。また活断層に起因する地震動を評価する場合、現状の活断層情報から 1 回の地震で活動する震源断層を推定する際にも、不確定な要因が少なくない。

震源断層の破壊過程を考慮してレベル 2 地震動を設定する通常の場合には、不確定性は対象地震の断層面の位置や地震の規模に、また想定する震源断層の破壊過程や地震動の評価方法などに内在している。

2) 確率論的地震危険度解析における不確定性の区分

レベル 2 地震動の評価の過程では種々の不確定性が含まれるため、それを考慮した上での判断が要求される。こうした不確定性は、レベル 2 対象地震の規模や断層破壊過程のばらつきのように、現実に存在しているが、現状では予測不可能と考えられる

もの（偶然的不確定性と呼ぶ）と、活断層であるかないかという問題や深部地下構造のように完全な調査をすれば確定できるが現状では予測不可能なもの（認識論的不確定性と呼ぶ）の二種類に分けて考えることが出来る。このような不確定性を組織的に処理するための有用な方法として確率論的地震危険度解析がある。確率論的地震危険度解析では、前者は地震動の発生確率を表す地震ハザード曲線として、後者は地震ハザード曲線のばらつきとして評価される。そして後者の不確定性は、専門家間の判断の幅を考慮したロジックツリー手法などによって、評価できると言われている。

3) 確率論的地震危険度解析と決定論的地震危険度解析

確率論的地震危険度解析は、地震発生に関する確率モデルと地震時に生じる地震動特性に関する確率モデルを統合して、特定の地点で特定の期間に特定の地震動特性が生じる確率を決定するための方法である。世界的には、1992年～1999年にかけて実施された GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Project) により全世界的な地震危険度マップ（50年間の超過確率が10%の最大地動加速度の分布図）が作成され、マップや資料がインターネット等で公開されている。また、米国では米国地質調査所 (USGS) によりアラスカ・ハワイを含む新しい全米の地震危険度マップが作成され、インターネット等で公開されている。USGSによるマップは「1997年版新しい建物及び他の構造物に対する地震規則に関する NEHRP 勧告条項」で用いられている設計マップの確率的な要素の基礎となっている。設計マップは、最大考慮地震 (MCE: Maximum Considered Earthquake) 地動マップと呼ばれ、USGS の確率論的地震危険度マップに基づいているが、一部の地域における決定論的地動の導入や工学的判断の適用により修正されている。

確率論的地震危険度解析によれば、個々の地震は発生領域やマグニチュード、発生頻度が異なるさまざまな地震集合のうちの1サンプルと見なして確率評価されるので、地震危険度解析の結果と比較することにより、確定的に設定されたレベル2地震動が確率論的にどのような位置にあるかを評価することができる。逆に、発生確率や再現期間などの地震危険度レベルを指標としてレベル2地震動の強さを設定することもできるが、その場合にはレベル2地震動の適切な地震危険度レベルについての技術的判断、あるいは社会的合意が不可欠である。現状では、技術者が適切な地震危険度レベルを判断するのに十分な社会的合意は形成されているとは言えず、この点は今後の重要課題である。

4) 確率論的地震危険度解析に基づく地震動の設定方法

確率論的地震危険度解析による設計用入力地震動の設定方法としては2つの方法が考えられる。どちらも最初に加速度応答スペクトルを設定し、次にそれに適合した模

擬地震動を作成するものである。

1 つは、一様ハザード応答スペクトル（対象とする全周期帯で一様な超過確率を持つスペクトル）を用いる方法であり、もう 1 つは特定の周期における加速度応答値を再現期間から設定し、それとスペクトル形状を組み合わせるものである。後者の方法でどの周期を選ぶかは対象構造物の特性から判断する。また、スペクトル形状は、設定した加速度応答値を与える可能性が大きい地震の分布（貢献度）を検討し、貢献度の大きな地震（確定的手法の想定地震に相当する）の諸元に基づいて設定する。いずれの方法を用いるにせよ、評価された応答スペクトルに対する模擬地震動作成時の位相についても、貢献度が大きい地震の諸元に基づいて設定することができる。なお、一般的に確率論的地震危険度解析では、そこで用いる種々の確率モデルの条件によって結果が変動すること、また地震動の評価を一般的には経験式（距離減衰式）により行うため断層の破壊過程の取り扱い等が確定的なレベル 2 地震動の算定手法と異なる場合があることに留意する必要がある。

5) 感度解析

一方、より簡便に不確定性を評価する手法として感度解析も有効である。レベル 2 地震動を算定する過程で必要となる種々のパラメータを現実的な範囲で変化させた解析を積み上げることにより、例えば応答スペクトルのレベルの幅を認識することができるので、レベル 2 地震動を設定する際の最終的な判断を行うための基礎資料になる。

4.4.3 経済性照査に用いる地震動－新しいレベル 1 地震動の考え方－

レベル 2 地震動対応の設計法が高度に整備されてきている一方で、レベル 1 地震動対応の設計法が依然として十分な議論のないまま震度法由来の弾性設計の範囲に留まっていることには問題がある。何が問題かという点、従来の震度法由来の弾性設計は、もともと安全性照査であったはずなのだが、2 段階設計に移行した時点で使用性照査にすりかわったことである。このことの弊害はまだあまり表面化してはいないが、後述するように技術の健全な進歩を阻害する可能性がある。

土木学会地震工学委員会（耐震基準小委員会）では、この点に鑑みて、新しい設計体系への移行を検討しており、平成 15 年 11 月には「土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル 1 の考え方（案）」（ワーキンググループ主査：澤田純男 京大助教授）をとりまとめた。以下に、その報告書⁶⁾に基づいて要点を紹介する。この新しい設計体系の中では、シナリオ型地震動評価と確率論的地震ハザード評価の両方が有効に利用できる。

(1) レベル 1 地震動に対する性能目標とは

現在では、終局限界状態を照査するレベル 2 設計法が整備され、ほとんどの構造物の断

面がレベル2 で決められるようになってきているが、レベル1 設計が不要であるという意見は土木技術者からあまり聞かれない。たとえレベル2 設計で構造物系全体が崩壊しないように設計されていたとしても、レベル1 設計で弾性限界を規定することによって中小の地震での被害をコントロールすることが必要であると考えられているからであろう。

しかしながら、現在のレベル1 設計法が、この命題に対して合理的であるという根拠はない。レベル1 設計に用いる入力地震動として、「供用期間に1 ～2 回発生する確率を持つ地震動」という定義に従って例えば50 年期待値に対応する地震動を用いたとすると、50 年間に弾性限界を超えない確率がポアソン過程なら約37%になるように構造物を設計することになる。しかしながら、この確率が37%でなければならない根拠は明らかでない。また、弾性限界を超える確率が残り63%となるが、それがどの程度の被害となるのか、ほとんど補修を必要としない程度となる確率がどれぐらいか、建設コストに比べて十分に大きな復旧コストとなる確率がどれぐらいか、等は一切考慮されない。

実際にメンテナンス計画を考える上で重要なのは、無被害の確率よりも、被害が出たときにどれぐらいの被害となって、その復旧にどれぐらいのコストと日数が掛かるか、である。

レベル1 設計で実現すべきは、頻繁に弾性限界を超えることによって、点検コストや復旧コスト、さらには点検や復旧のために供用を一時停止することによる「経済的被害」が過大にならないように構造物を設計することである。すなわち、修復に伴う経済性の照査を求められているものと考えることが妥当である。

そこで、レベル1 に対する性能目標として、「地震時および地震後に、構造物の機能が、経済的に維持できる」とすることが提案されている。

(2) 現在のレベル1 設計法が技術的進歩の障害となっている点

ここでは簡単のため、構造物の設計を、弾性限界と許容塑性率を決めることと単純化して解説する。

弾性限界をコントロールするのは主に断面形状や断面積であり、場合によっては材料の選択によって調整することもある。許容塑性率を制御するのは、主に鋼構造、鉄筋コンクリート構造、複合構造などの構造形式であり、場合によっては帯鉄筋量などの構造細目によって調整することも考えられる。現在の二段階設計法では、図4.4.1の太線で示されているように、レベル1 で弾性限界 (Y_1) を規定し、その断面でレベル2 地震動に対する最大応答 D_2 を求め、これによる塑性率 (D_2/E_1) が許容塑性率を超えないかを照査している。

ここで、図4.4.1の細線のように、弾性限界を Y_N に引き下げることを考える。弾性限界を引き下げれば小さな断面で済むので、剛性は小さくなり、弾性限界に対応する変形 E_N も E_1 より大きくなる。この断面のレベル2 地震動に対する最大応答はエネルギー一定則にほぼ従うと考えれば D_2 よりかなり大きくなり D_N となる。しかし、許容塑性率が十分大きくとれる構造形式を採用すれば、このときの塑性率 (D_N/E_N) を許容塑性率より小さくすること

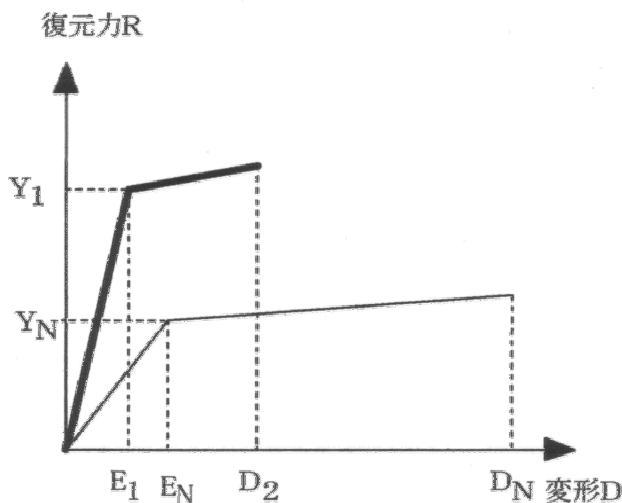


図 4.4.1 設計で決められる復元力-変形関係⁶⁾

が可能である。さらに変位一定則として良く知られているように、建設地点の地震動特性によっては、 D_N と D_2 はほぼ同じである場合も考えられる。この場合は特に構造形式を変更しなくても、断面を小さくすることによって何ら安全性を損なうことは無いどころか、反対に塑性率に余裕が生じることになる。

このように弾性限界を引き下げた設計をすることによって、建設コストを圧縮することができるが、これによって発生する問題は何か？ それは比較的小さな地震動に対しても弾性限界を簡単に超えて、損傷が発生する可能性があることである。それでは弾性限界を超えて損傷が発生すると、何が困るか？ それは損傷を補修する必要が生じるので補修するためのコストが発生することと、補修のために供用を一時停止すると周辺社会に与える間接被害がコストとして発生することである。このような概念を表したのが図 4.4.2 である。

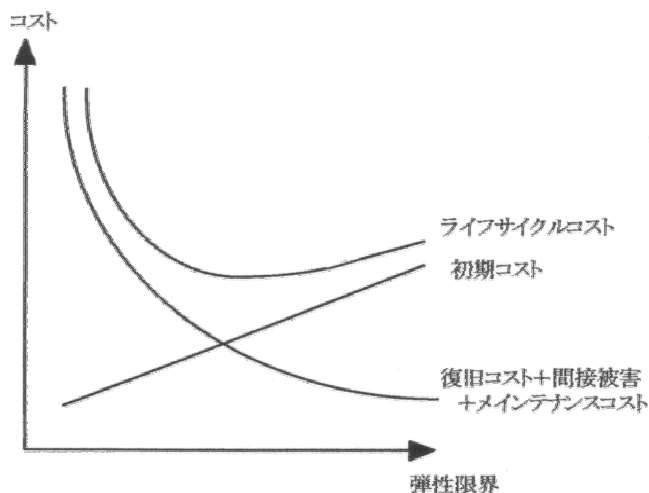


図 4.4.2 弾性限界を経済的理由から決める条件⁶⁾

図 4.4.2 の縦軸はコスト（金額）、横軸は弾性限界の大きさである。したがって、建設コスト（初期コスト）に加えて供用期間中に耐力を維持するためのメンテナンスコスト、供用期間中に発生するであろう地震被害に対する復旧コストと復旧期間中の供用停止による収入減（直接被害）と、供用停止が社会に与える経済的波及効果（間接被害）の総額（ライフサイクルコスト）が大きくなならないなら、断面を小さくして弾性範囲を引き下げることが可能であると考えられる。理想的にはライフサイクルコストが最小になるような断面設計をすればよい。

(3) 経済性照査の基本手順

現状のレベル2 設計をそのままにして、弾性限界をどこまで下げられるのかを、あるいは弾性限界をどこまで上げなければならないかを、経済的視点から決めるべきというのが主張である。すなわち、性能目標としての「地震時および地震後に、構造物の機能が、経済的に維持できる」を満足しているかどうかを、初期建設コストと、ライフサイクル全期間に対する地震時および地震後の復旧コストと間接被害の期待値の和、すなわちライフサイクルコストを最小化させるような設計となっているかで照査することが提案されている。

1) ハザード曲線とフラジリティ曲線による経済性照査法

ここでは、地震動強度としてある指標 A を用いて解説する。地震動強度の確率分布 $F_H(A)$ を表すグラフは、ハザード曲線としてよく知られている。これは縦軸に年超過確率、横軸に地震動強度をとったもので、その例を図 4.4.3(a) に示す。また、確率分布を表すハザード曲線から次式の確率密度、

$$f_H(A) = -dF_H(A)/dA \quad (4.4.1)$$

に変換したものを図 4.4.3(b) に示す。

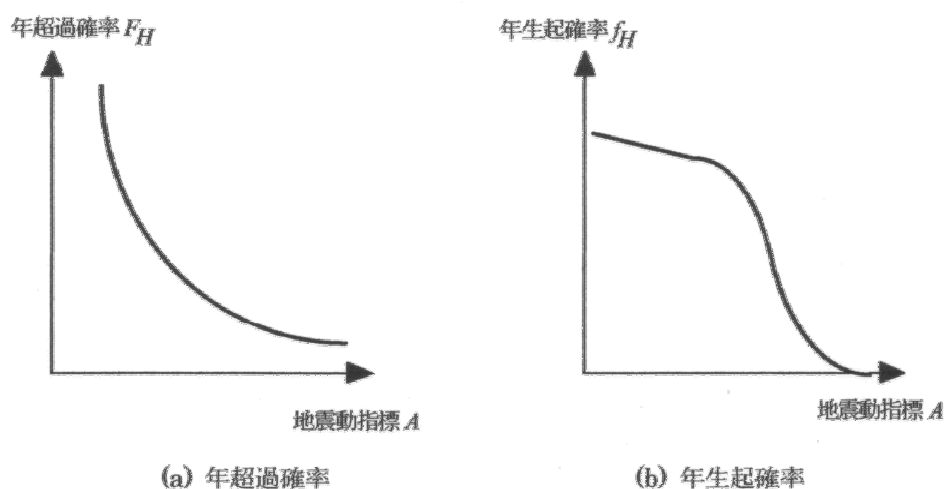


図 4.4.3 確率論的地震ハザード曲線⁶⁾

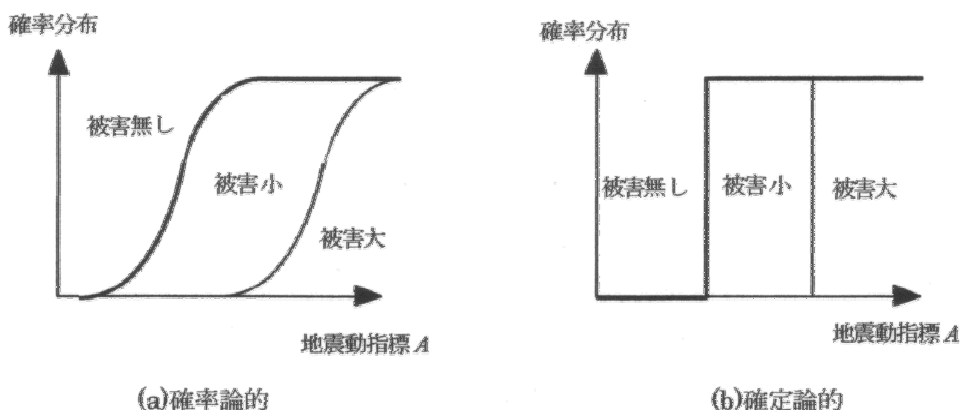


図 4.4.4 フラジリティ曲線⁶⁾

一方、ある構造物の諸元 S_i が与えられたときに、地震動強度と構造物の被害程度との関係は、フラジリティ曲線 $F_f(R_j, A; S_i)$ として表されることが多い。これは横軸に地震動強度、縦軸に確率分布をとり、それぞれの被害ランク以上になる曲線が、図 4.4.4(a) のように示される。もし確定的に被害ランクを評価するとすれば図 4.4.4(b) のようになる。

ハザード曲線による地震動強度の確率密度 $f_H(A)$ と、フラジリティ曲線によって求められる被害ランク j となる確率の積をとることによって、その構造物が、ある地震動強度に対して、それぞれの被害ランクになる年生起確率が求められる。これを地震動強度で積分することにより、その構造物がそれぞれの被害ランク以上になる年生起確率 $P_j(S_i)$ を求めることができる。

次に、ある被害ランクになった場合の直接被害額と間接被害額を考える。本来はこれらの値に対しても確率分布で表現すべきであるが、現状ではその確率分布を予測することが困難であるため、ここではそれぞれの被害ランク j に対する平均的な損失（直接被害額と間接被害額の和）が推定できるとする。最終的に、この構造物諸元 S_i に対するライフサイクルコストの期待値は、

- ① 初期コスト、
- ② 設計供用年間のメンテナンスコスト、
- ③ 被害ランク j に対する平均的な損失と年生起確率の積

の総和として求められる（推定方法、事例、課題などについては報告書¹⁾に詳述されている）。なお、③については1年あたりの額を設計供用年間に変換する。上式を構造物諸元 S_i を変えながら繰り返し計算し、ライフサイクルコストの期待値が最小になる構造物諸元 S_i を求めればよい。

2) モンテカルロ・シミュレーションによる経済性照査法

地震動強度を表すのに単一の指標を用いるハザード曲線やフラジリティ曲線は、その概念を理解するのに便利であるが、構造物の非線形応答を考慮しなければならない関係上、地震動を例えば最大加速度のような単一の指標で表現するのには無理がある。また、フラジリティ曲線を用いて設計を行うためには、事前にフラジリティ曲線が構造物諸元 S_i の関数としてモデル化されている必要がある。しかしながら実際には、このようなフラジリティ曲線のモデル化は大変困難であり、既往の研究成果も乏しい。そこで、ハザード曲線とフラジリティ曲線を用いずに、モンテカルロ・シミュレーションによる方法が望ましい。

この方法では、レベル1 に対する入力地震動として、年生起確率と地震動波形の組を大量に作成する。その構造物がそれぞれの被害ランク以上になる年生起確率 $P_j(S_i)$ は、抽出されたサンプル入力地震動の下で、材料などのばらつきを考慮した非線形応答解析を実施することによって計算する。このようにして、前記 1) の③に相当する結果を得ることができる。このためには膨大な計算を伴うが、計算機能力の向上がそれを現実的なものとする可能性がある。そうした設計費用や労力に見合うだけの経済性（これもライフサイクルという意味で）の見通しが得られるならば、この方法を積極的に適用していくべきである。

3) レベル2 設計と経済性照査のプロセス

レベル2 設計は従来通り実施することとする。これは、経済合理的な地震動設定とは切り離して、レベル2 地震動に対する人命安全性をまず確保する、という委員会の基本思想による。レベル2 地震動は、原則として対象となる地震（レベル2 対象地震）を選定した上で、そのような地震が発生した場合の地震動として設定する。これに加えて経済性照査を耐震設計に組み込むには、図 4.4.5 に示すように、次のプロセスに従えばよい。

- ① 構造形式と構造細目を仮定する。これらの条件から許容塑性率が設計条件として与えられる。
- ② 断面諸元を仮定する。これによって弾性限界や剛性が決められる。
- ③ レベル2 地震動に対する応答を計算する。
- ④ 最大応答塑性率が許容塑性率以下であるかを調べ、もし満たさないなら 2) に戻って断面諸元を変更して再び照査する。レベル2 条件を満たす断面諸元のうちで、最も断面の小さなものを見つけ出す。
- ⑤ 経済性照査のために、ライフサイクルコストを計算する。
- ⑥ ①に戻って別の構造形式、構造細目を仮定して、②～⑤のプロセスを繰り返す。
- ⑦ 仮定した構造形式、構造細目の中から、最もライフサイクルコストが小さなもの

を選択する。

以上の方法を用いれば、レベル 2 設計に関する性能（人命安全）を維持した上で、地震活動度と構造物の重要度（社会への影響度）に応じて、最も経済的な構造形式、構造細目や断面諸元を設計できる。

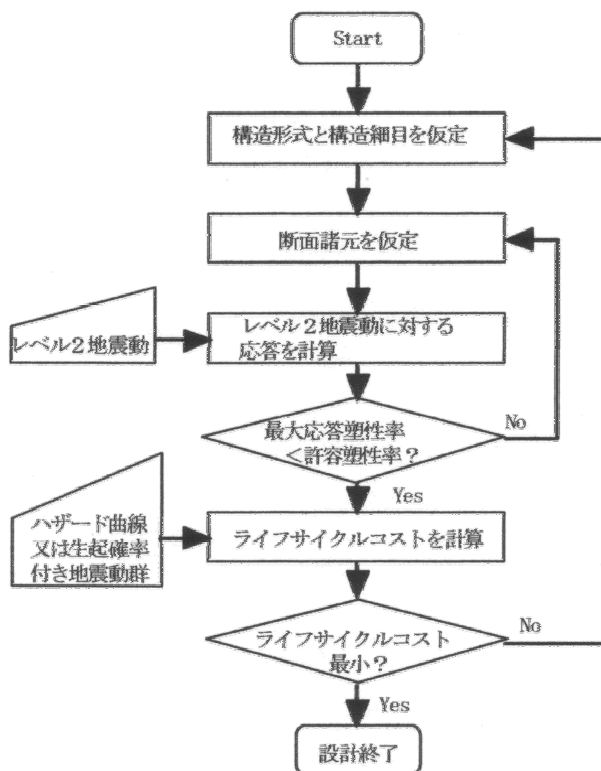


図 4.4.5 レベル 2 設計と経済性照査による耐震設計の流れ（案）⁶⁾

4.4.4 まとめ

- 土木構造物は公共性が高く、その耐震性確保には地震動予測技術の発展を反映した性能照査型設計法が適用されつつある。
- 土木構造物の耐震性能照査は、安全性に係わる照査と、経済性に係わる照査とに分けて、それぞれにもっとも適切な地震動を用いることが望ましい。
- 安全性に係わる照査に用いる地震動としては、震源断層と評価地点を特定した最大級の地震動を選ぶことが提案されている。推本の事業との関係では、「シナリオ型の地震動予測地図」の情報がこれに役立つ。また、対象とする震源断層を選定する際には、地震発生の長期評価結果が役立つ。
- 経済性に係わる照査に用いる地震動としては、対象構造物の供用期間におけるライフサイクルコストが重要になるため、地震動の発生頻度が重要になる。推本の事業との関係では、「確率論的地震動予測地図」の情報がこれに役立つ。

参考文献

- 1) 土木学会「土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)－耐震基準作成のための手引き－」,地震工学委員会耐震基準小委員会のホームページに報告書全文が掲載
<http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/index.html>
- 2) 土木学会:土木学会耐震基準等に関する提言集, 1996.5.
- 3) 土木学会:土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会:土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説, 2000.6.
- 4) 地震工学委員会:レベル2地震動研究小委員会:レベル2地震動の明確化に向けて, 土木学会論文集 No.675/I-55, pp.15～25, 2001.4.
- 5) 大阪府土木部:大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, 1997.
- 6) 土木学会「土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案)」,
地震工学委員会耐震基準小委員会のホームページに報告書全文が掲載
<http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/index.html>