

3．新しいレベル1設計としての経済性照査

3.1 レベル1で照査すべきもの

再度、視点を現時点の耐震設計体系に戻す。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、殆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殆ど聞かれない。その中には、レベル1設計を震度法による弾性設計と短絡的に考え、手軽に断面が決定できる震度法を残すべきという本質的でない議論も含まれているが、例えばレベル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ことを意味している。

しかしながら、従来のレベル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、第2次提言の「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63%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63%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34%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、であると考えられる。

2章で述べたように、「土木建築にかかる設計の基本」では、使用限界（弾性限界）、終局限界に加えて、これらの間に新たに修復限界を設け、これに対する照査を行うことを提案している。これは明らかに従来のレベル1設計法だけでは、中小地震に対する被害をコントロールするのに十分ではないために、復旧に多大なコストを要する被害に達する確率を制御しようという考え方である。しかしながら、修復限界に対する入力地震動を設定しようとした時に、従来のレベル1と同様に、どの確率レベルにすれば合理的かという問題に直面する。さらに、このような修復限界照査を実施した場合、従来のレベル1設計（弾性限界照査）の位置づけがあいまいになる。

このような考察から、結局レベル1設計に期待されているのは、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り、基本的に修復性すなわち経済性の照査を求められているものと考えることができる。そこで、レベル1に対する要求性能として、「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」と定義することとする。このような性能は、ISO2394の分類上は、使用性の一部と考えられる。

3.2 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ある。従来の二段階設計法では、図 3.2-1 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) が構造細目から決められた許容塑性率を超えないかを照査していた。

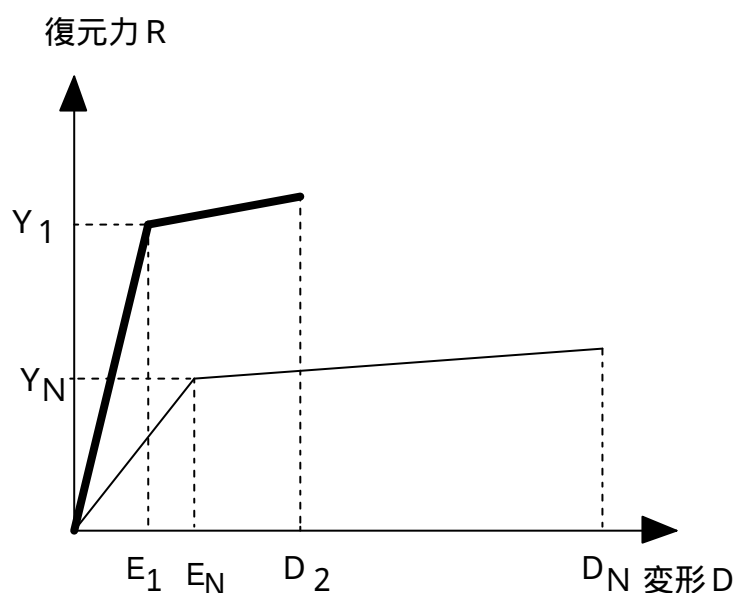


図 3.2-1 設計で決められる復元力 - 変形関係

ここで、図 3.2-1 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。なぜこのような観点からの設計が行われてこなかったのか？ それは歴史的に経験則から決められたレベル1による断面設計が前提にあったので、それで決められた断面で構造細目から決められる許容塑性率を超えれば、断面を大きくする、すなわち強度と剛性を大きくすることによってこれクリアするという方法しか採りようがなかったからであろう。

つまり、現在の設計体系ではこのような柔構造の設計を行うことはできない。なぜなら弾性限界 Y_1 がレベル1の規定で厳格に決められているからで、これを下回る設計は規定上できないからである。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 3.2-2 である。図の縦軸はコスト（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）が大きくなりないうなら、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。

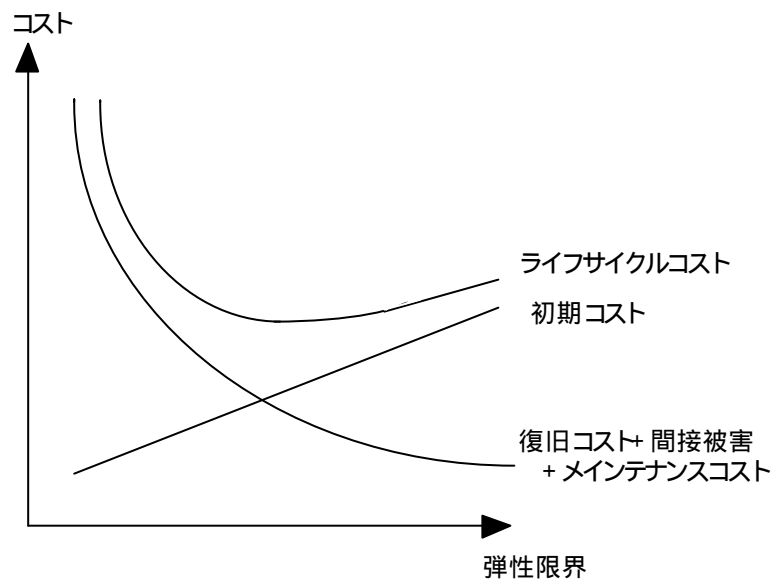


図 3.2-2 弾性限界を経済的理由から決める条件

ここで、一般的な費用便益分析と、ライフサイクルコスト最小の考え方との関係について、簡単に解説しておく。構造物が健全に機能する場合の便益を所与として考える場合には、ライフサイクルコストの最小を規範として設計を考えることは便益から費用を差し引いた純便益を最大とする方向と一致している。ただし、便益や費用の中身については、構造物の管理者の立場に応じて注意深く検討しておく必要がある。鉄道会社のように私的企業が管理者である場合には、事業者の立場として支出する費用、すなわち、財務的な費用でライフサイクルコストを考え、その立場から最適な設計を考えることになる。しかし、管理者が公的主体である場合は社会の中の多様な利害関係者がそれぞれ負担する費用を全て考慮した社会的費用でライフサイクルコストを捉える必要がある。無論、私的な管理者である場合も、構造物の破損の影響が社会的に広く波及する場合には、ライフサイクルコストを社会的費用で捉えることが必要であり、構造物の強化に要する費用を私的な管理者が十分に負担できないような場合には公共主体がそのための財政的支援措置などを講ずる必要がある。

3.3 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，本報告書の主張である．すなわち，要求性能としての「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を提案する．同様な考え方は，「コンクリート構造物の耐震性能照査技術－現状と将来展望－」にも，ライフサイクルコストを考慮した最適なレベル1地震動の設定として述べられている．しかしながら，レベル1地震動などの設計入力地震動は，設計条件として与えられなければならないものであって，設計の結果として得られるパラメータと考える体系には無理がある．本節では，設計実務の流れを考慮して，経済性の評価手順を体系化する．

(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 3.3-1(a) に示す．また，確率分布を表すハザード曲線から確率密度 $f_H(A) = -dF_H(A)/dA$ に変換したものを図 3.3-1(b) に示す．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の程度の関係は，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，縦軸に確率分布を取り，それぞれの被害ランク以上になる曲線が，図 3.3-2(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 3.3-2(b) のようになる．なお，ハザード曲線やフラジリティ曲線に時間依存性を考えることができるが，ここでは簡単のため，時間依存性はないものとして説明する．

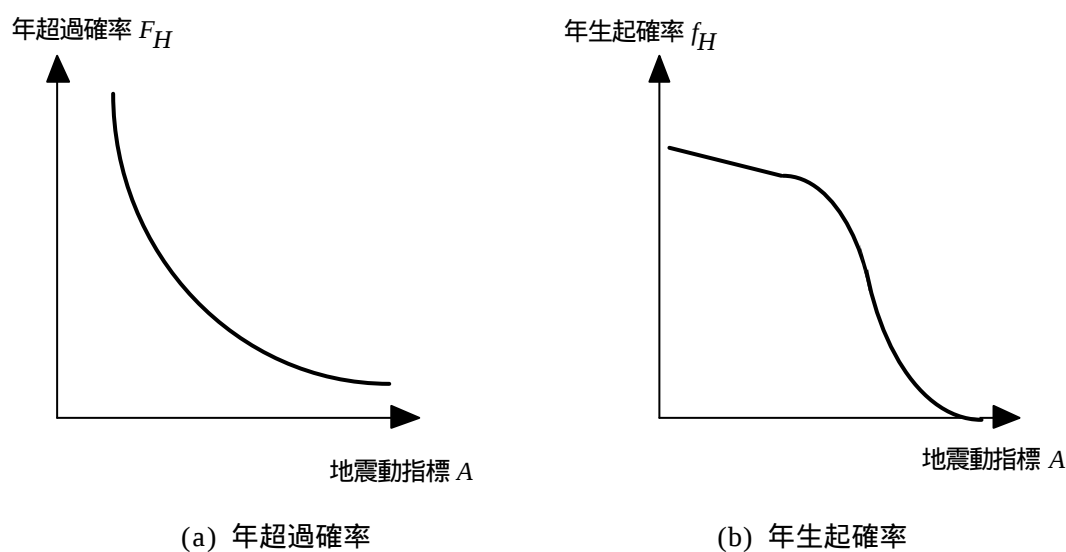


図 3.3-1 ハザード曲線

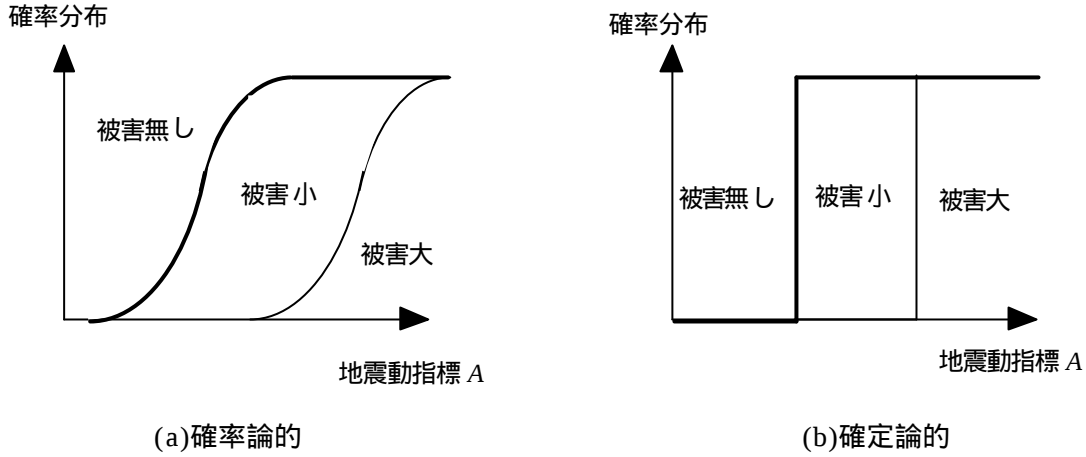


図 3.3-2 フラジリティ曲線

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 $\{F_F(R_{j+1}, A; S_i) - F_F(R_j, A; S_i)\}$ 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を求めることができる。すなわち、その構造物 i が 1 年間にそれぞれの被害ランク j を経験する確率 $P_j(S_i)$ は、次式で表わされる。

$$P_j(S_i) = \int_0^{\infty} f_H(A) \{F_F(R_{j+1}, A; S_i) - F_F(R_j, A; S_i)\} dA \quad (3.3-1)$$

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について考察する。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 に対する平均的な直接被害額 $DC_j(S_i)$ と間接被害額 EC_j が推定できるとする。最終的に、設計供用期間を T_D として、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 $LCC(S_i)$ は、初期コストを $IC(S_i)$ 、 T_D 年間のメンテナンスコストを $MC_{TD}(S_i)$ として、

$$\begin{aligned} LCC(S_i) &= IC(S_i) + MC_{TD}(S_i) + g_{TD} \sum_j \{EC_j + DC_j(S_i)\} P_j(S_i) \\ &= IC(S_i) + MC_{TD}(S_i) + g_{TD} \sum_j \left[\{EC_j + DC_j(S_i)\} \int_0^{\infty} f_H(A) \{F_F(R_{j+1}, A; S_i) - F_F(R_j, A; S_i)\} dA \right] \end{aligned} \quad (3.3-2)$$

として求められる。ただし、簡単のため定常過程を仮定している。ここに、 g_{TD} は 1 年間あたりの額を T_D 年間の額に変換する係数で、5.5 節で定義される。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 $LCC(S_i)$ が最小になる構造物諸元 S_i を求めればよい。なお、間接被害額 EC_j が構造物諸元によらないとしたのは、供用が制限される期間が被害ランクのみによって決まると仮定したからで、これが構造物諸元によって変化する場合には、間接被害は構造物諸元の関数 $EC_j(S_i)$ としなければならない。また、場合によっては撤去費用を加算することもある。

なお、式(3.3-2)では被害ランクについて総和をとるように定義したが、地震動指標 A で積分する形や、年生起確率で積分する形で定義することもできる。これらは 6 章で説明しているリスクカーブやリスクカーブに対応する概念であるが、本報告書で提案する経済性照査だけに注目した場合にかえって煩雑な表

現になることから，本報告書ではライフサイクルコストを式(3.3-2)の形で定義することにした．

(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 fragility 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，fragility 曲線を用いて設計を行うためには，事前に fragility 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 fragility 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 fragility 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を提案する．まず，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与える．すなわち，ある地震動波形 A_k の年生起確率を $f_H(A_k)$ として， $LCC(S_i)$ を，

$$LCC(S_i) = IC(S_i) + MC_{TD}(S_i) + g_{TD} \sum_j \left[\{EC_j + DC_j(S_i)\} \sum_k f_H(A_k) \{F_F(R_{j+1}, A_k; S_i) - F_F(R_j, A_k; S_i)\} \right] \quad (3.3-3)$$

によって計算する．fragility $F_F(R_j, A_k; S_i)$ は， A_k を入力地震動とし，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．

(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．これに加えて経済性照査を耐震設計に組み込むには，図 3.3-3 に示すように，次のプロセスに従えばよい．

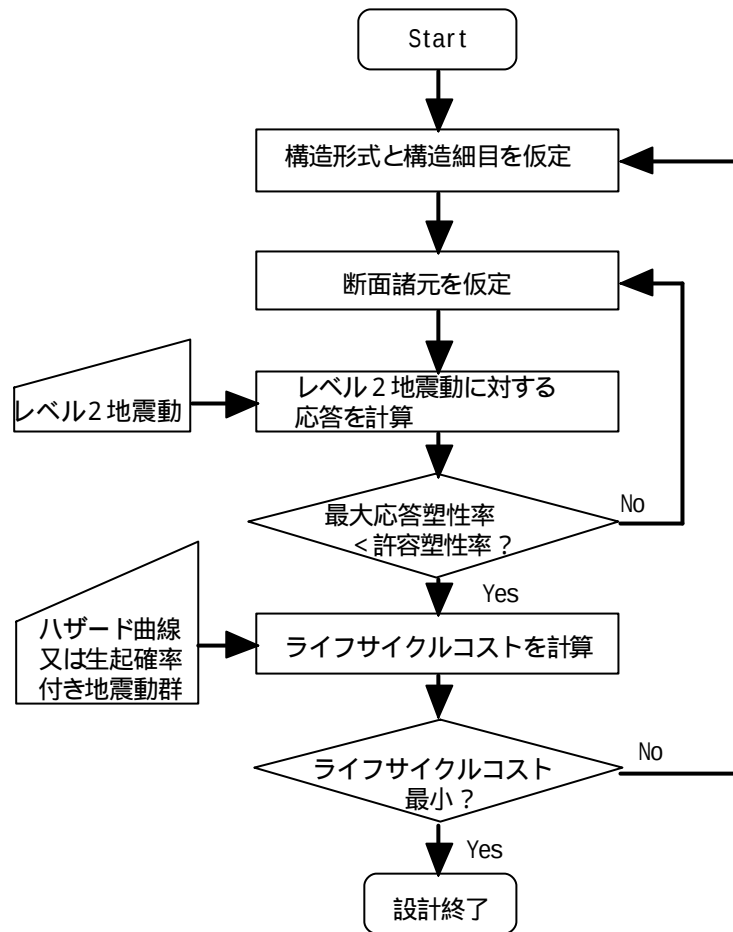


図 3.3-3 レベル2設計と経済性照査による耐震設計のプロセス

- 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、地震活動度と構造物の重要度（社会への影響度）に応じて、レベル2設計に関する性能を維持した上で、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。

3.4 経済性照査による耐震設計のメリット

新しいレベル1設計法として、3.3節で述べたような経済性照査を取り入れることは、様々なメリットがある。まず、レベル1地震動の大きさを決める根拠が明確ではないことを3.1節で述べたが、提案法によれば、入力地震動は年生起確率による分布で与えられるので、そもそもレベル1地震動の大きさを決める必要がなくなる。レベル1設計の目的は、その地点における地震活動度や地盤応答特性、初期建設コストに加えて地震被害復旧のためのコストや被害が社会に与えるインパクトを表す間接被害を考慮した上で、最も経済的な設計を行うことと明確に定義される。

さらにレベル2設計法に対しても、その目的を明確にする。すなわち、従来の設計基準の中に、レベル2に対する性能として、「短期間に機能を回復できること」を引き当てている場合がある。しかしながら、これは経済的な側面から要求されていることが考えられる。このような性能は、ここで提案する新しい経済性評価の中に自然に含まれるものである。従って、ここで提案する「安全性照査」は、「重大な人的被害が発生しないこと」あるいは「緊急活動に必要な最小限の機能を確保する」など、経済性に関わらない性能だけを対象にすれば良い。すなわち、レベル2設計法の意味付けが、人的被害など経済的に評価できない安全性だけとなり、非常に明確となる。構造物全体の崩壊が生じても人的被害等を与える恐れのない構造物に対しては、新しいレベル1設計法としての経済性照査だけを実施すれば十分である。この場合は、3.3節の(3)に示した設計プロセスの3)で、ライフサイクルコストを最小にする断面諸元を選択すれば良い。なお、非常に希な地震動に対する被害を限定的なものにする目的が、「緊急救命活動のために最小限の機能を維持する」のであれば、これは安全性照査の範疇となり、レベル2設計の受け持ちとなる。

人工稠密地域の施設など利用度が高い構造物で、かつその地域が地震活動度が高いところに位置する場合には、供用の一時停止による間接被害が膨大なものになるので、建設コストが上昇しても大きな断面を持たせて弾性限界を高くするのが合理的であり、経済性照査による設計法を導入することで自然にそのような設計となる。逆に人工密度が低い地域の施設など利用頻度が低い構造物で、かつその地域が地震活動度が低いところに位置する場合には、断面を小さくして弾性限界を低くするかわりに、許容塑性率が大きい粘り強い構造（高じん性構造）にして、レベル2設計条件をクリアする設計を行うことができるようになる。地盤条件によっては、単に断面を小さくすることだけで特にじん性を強化しなくても済む場合もある。このような設計が可能になれば、一部の地域では建設コストが上昇するかも知れないが、日本全体では大幅な建設コストの低減が実現されよう。ただし、断面を小さくしても十分なじん性を持つことが条件だから、できるだけ安い建設コストで十分なじん性を持つ新しい構造形式などの技術開発が必要である。また、建設コストが上昇する場合でも、これは将来の地震被害を考え合わせた上での合理的な建設コストであるから、結局はコストダウンとなっているはずである。

なお、本論で提案する経済性照査による設計法は、従来の二段階設計法の基本的な考え方とは大きく異なる。レベル1で断面設計を行い、レベル2で安全性を照査するプロセスではなく、先にレベル2で安全性を確保した後で、経済性を照査する手順となっている。あるいは、レベル1が弾性設計、レベル2が弾塑性設計という分類でもなく、経済性照査においても構造物の弾塑性挙動を対象にしている。従

って本論で提案する経済性照査による設計法を，レベル１と呼ばずに，「経済性照査」あるいは「使用性（または修復性）照査」と呼ぶのが良いと思われる．これに伴って，従来のレベル２設計法は，「安全性照査」と呼ぶのが適当である．新しい枠組みでの各照査における入力，設計変数，判断基準などを表－１にまとめた．また，従来の限界状態設計法の枠組みにも入らないことに注意が必要である．限界状態設計法は構造物の応答を，物理的に表現された「ある状態」以内に設計する設計法であるが，ライフサイクルコスト最小という条件は，構造物の応答を物理的な「ある状態」以内にするという制約を与えるものではないからである．

表 3.4-1 提案法における照査条件

照査種別	入力	クライテリア
経済性照査 (新レベル１)	生起確率付き地震動群	ライフサイクルコスト→最小
安全性照査 (レベル２)	最大級地震動	最大塑性率＜許容塑性率

3.5 ライフサイクルコストにおける各種要求性能のバランス

前節までに述べてきたように、地震時使用性が経済性の要求性能であるというのが本報告書の基本スタンスである。このことを議論するなら、そもそも構造物の経済性はどのような視点から見ればいいのか、その中で地震時使用性はどのように位置づけられるのか、という視点は重要である。

「構造物の価値評価概念図」というべきものを描いてみたものが図 3.5-1 である。会計学におけるストック（貸借対照表に相当）とフロー（収支決算書に相当）を併記したものである。もともとライフサイクルコスト（LCC）という概念は、メンテナンスの合理化を意図して紹介されることが多かった。初期コストが多少余計にかかっても、アフタケアコストを削減できるなら、全体では合理的であるとする考え方である。しかし、その後この概念は拡張され、地震リスクなども包括して論じられることも多くなった。この図は会計学的視点からの整理に、LCC の諸概念を当てはめたものである。構造サイドからの観点ではあるが、5 章のコストの議論とも整合するものと考えている。

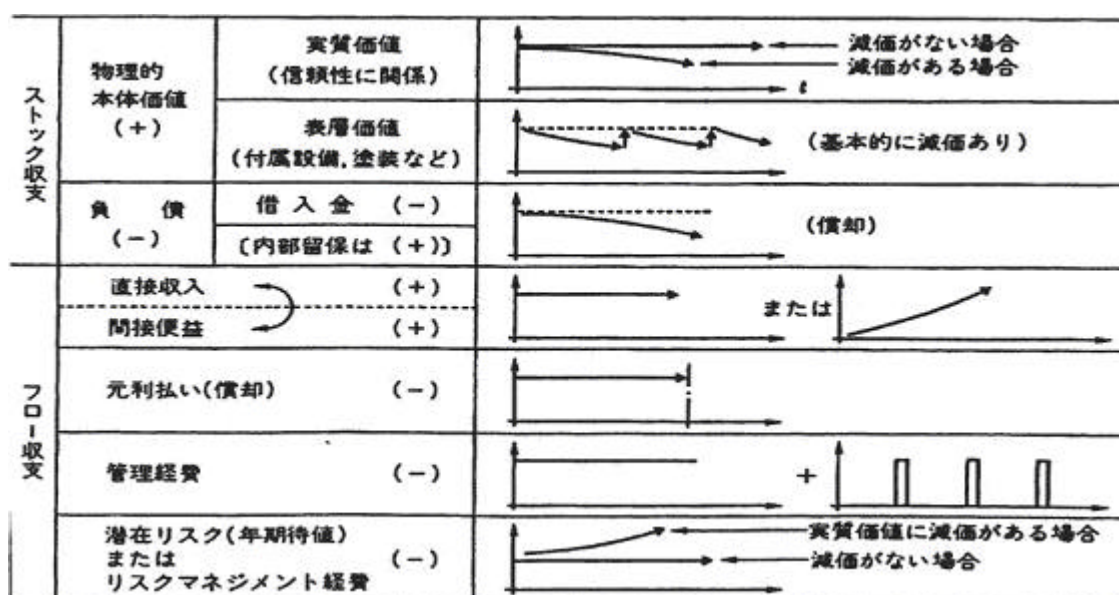


図 3.5-1 構造物の価値評価の概念

この表を詳細に論ずることは、本報告書の趣旨から逸脱するので避けるが、要求性能の話題と関係するところのみ簡単に説明する。土木構造物は社会的ストックであり、固定資産として減価するものであるが、自動車やコンピュータと異なり、規定の耐用年数がきたら買い替えをはかるような性質のものではない。メンテナンスコストはフローの面では支出(経費)だが、「価値」の回復があるなら、それは投資である（税法上も本来そう扱うのだが、運用は微妙な部分もあるようである）。表中、「物理的本体価値（会計学的には土地の価値も含まれるが、表からは省いた）」の中に、実質価値（構造物の力学的挙動を分担、保証する部分）が示されているが、この部分の実質的な減価をコントロールするのが「耐久性」の要求性能である。この減価は当然、耐震のみならず、各性能項目に対する信頼性の低下となって現れる。「信頼性」とは、会計処理の論理からいえば、保有物件（構造物）の不良資産の度合いを示す尺度であるが、表中の位置付けはまだ明確ではない。信頼性の度合いに応じて保険の支出があるなら、フローの支出項目に計上できるが、潜在リスクまでヴァーチャルな支出として経費計上する論理には、

無理がある可能性が高く、ストック側に損失引当金計上すべきかも知れない。

物理的本体価値の、減価を含めた、金銭としての「時価評価」は、現在極めて関心の高い課題である。例えば道路公団の財務評価で、構造物の資産評価を「取得価額に適宜減価償却を施したもの」とするか、「再調達価格」とするかで、意見が対立するところである。財務省通達では、適切な方法で時価評価することが容認されており、それは会計基準の国際化の流れにも合致し、かつ技術者のセンスにも合うと思われるが、株や土地資産を時価評価するのと違って、難しいところもある。中古マンションのような、取引の市場が存在しないので、再調達価格も「市場の実勢の反映」は容易でなく、ヴァーチャルな議論になってしまう。

フロー収支のところに、直接収入・間接便益を並べて書いた項目がある。「不動産の証券化」や「PFI」の議論では、ここに家賃や利用料収入が入るが、広い意味での利用便益全体を含めて考えてもよいであろう。費用便益分析で対象となるものはすべて含めてよく、本報告書で経済性ということを考えてときに対象とする「外部性コスト」も、ここに対するロスである。「初期投資＝ストックにおける負債の初期値」と「フローにおける元利払」が対応しているのは明らかであろう。仮に名目利子率と割引率が一致していれば、事前評価において前者と後者の総和はバランスする。

この議論では時間（というより期間）の概念が非常に重要である。「土木建築にかかる設計の基本」では、設計に際して「設計供用期間」を定めることを「1.2 設計の基本」の冒頭で求めている。これは、「これから設計する構造物は、少なくとも何年使うつもりで考えますよ」という、「計画の基本」となる期間である。当然、この期間は、表にある元利払いの償却期間より長くなければならない。また、構造物の物理的な寿命は（メンテナンスをすることも含めて）この設計供用期間より長くなければならない。一部示方書類では「設計耐用期間」という用語も用いられるが、利用計画と物理的寿命の概念の区別を明確にするため、「供用」という用語を用いた。

構造物の信頼性評価は、この設計供用期間全体に対してなされるべきものである。また、耐久性の水準、あるいはメンテナンス計画も、この期間を基本におくべきである。こうした配慮を関連づけることにより、各種要求性能のバランスが整合性のとれたものとなることが期待される。

3.6 耐久設計と耐震設計の一元化

環境条件，使用材料，構造諸元の詳細，施工の良否，検査の精粗などに依存するものの，総じて構造物の耐震性能は経年変化することは避けられない．すなわち，設計供用期間内での現実の耐震性能は厳密には一定ではなく，地震発生時期によって応答も損傷の程度も変化する．したがって，設計供用期間内に所定の耐震性能が満足されるように，耐震設計を行うのが基本である．性能設計の観点で述べると，具体的には次の2通りの方法が現在採用されている．

- (1) 環境条件のもとで材料の品質が変化することを考慮した上で構造物の耐震性能を算定し，設計供用期間内のいずれの時点においても，所定の耐震性能が確保されていることを確かめる．
- (2) 環境条件，常時の荷重条件と構造物の諸元等を考慮して，構成材料の品質が設計耐用期間内に問題ない範囲内の変化に留まるように材料設計，施工計画，品質検査を設定した上で，構造物の耐震性能を照査する．

前者は材料設計と構造設計ならびに施工計画を一元的に実行できるので，設計者のとり得る選択範囲は一般に広く，経済性も追求しやすい．メンテナンスのスケジュールを事前に策定した上で，設計供用期間内の耐震性を総合的に確保することも可能となる．事実，鋼材腐食環境の厳しい地域では，設計供用期間内にある程度の腐食を許容するか否か，メンテナンスを前提とするか否かで，構造諸元や材料の選定，コストに実質的な影響が出る．この場合，時間軸で材料の品質変化や構造物の耐震性能の変化を定量的に評価する技術が前提となる．栈橋や鋼管杭の腐食減量を考慮した設計(腐食代の設計)や，RC 長柱のクリープ座屈に関する安全設計は，この範疇に入るといえる．これら材料の経時変化と構造応答とを組み合わせた照査技術は現状では一部に留まっており，照査技術の研究開発途上にあるものが多い．そこで次善の策として，耐久性を一つの性能として設定し，設計供用期間内での構造性能が実質的に変化しないように材料，構造諸元，施工計画，検査を決定することが行われてきた．ここではメンテナンスを行うことを設計計画段階で想定していない．

コンクリート構造物では，これまで主に処方箋的方法(ルール)で耐久性を間接的に担保してきたが，平成 11 年土木学会コンクリート標準示方書施工編(耐久性性能照査型)では，構造物の寿命推定を明示的に行う枠組みに変更が加えられた．性能指標として構造物の寿命が与えられたことから，性能設計を耐久設計の代名詞と呼ばれる場合があるが，これは，あくまで性能設計の一部と認識するのがよい．前者の方法に比較すれば，経済性を追求する上では制約条件は自ずと多くなる．合理性の観点にたてば，明らかに(1)の直接的方法が合理的であり，性能を担保した上で，より経済的な設計が可能と

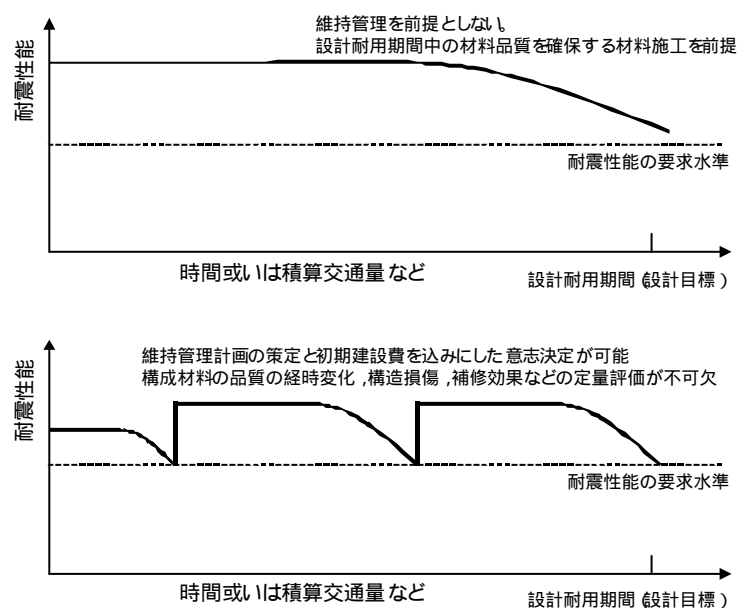


図 3.3-1 耐震性能の経時変化と設計

なる。ただし、一般的な環境におかれる構造物では、統合型の(1)よりも幾分、厳しい条件を付された(2)の設計でも経済性は殆ど変わらない場合が大多数なので、(1)を敢えて採用して僅かなコスト縮減を考えるまでもない、という認識は存在する。材料コストの設計施工の中に占める割合が小さくなってきたためである。また、構造設計と材料設計・施工計画がわが国では異なる組織体で分業化されている現実を鑑みれば、(2)の方法が現実的であるとの認識もまた妥当性を有する。よって、(1)の方法は耐震設計同様に、材料劣化に対して大変厳しい環境下において、あるいは構造設計・施工計画を一元的に行える企業体等で、より価値が高くなるといえる。換言すれば、発注形態がデザインビルド方式となる場合に、利点が大きくなる。

しかしながら、レベル 1 で照査する内容が、修復性と経済性に関するものと明確に位置づけられると、前者の照査方法(1)の実質的メリットが一般環境条件下においても、構造・材料設計に現れてくるものと思われる。特に地中 R C 構造物(腐食性環境としてはマイルド)の耐震設計に効用が高いと考えられる。地中構造物は総じて耐震的には有利な環境にあるため、相対的に常時荷重あるいは中程度の地震時の性能設定で、断面諸元寸法ならびに配筋量が大きく影響される構造物である。

一例として、常時土圧・水圧下での許容応力値の設定を取り上げてみる。東京湾横断道路建設で採用された川崎人工島の巨大ケーソンの壁厚を決定したクリティカル項目は、常時作用するコンクリート応力の制限(圧縮強度の 40%を上限とする)であった。常時に作用するコンクリート応力が 1 軸圧縮強度の 4 割を越えると、長期に渡って非線形クリープが発生することが懸念され、この条項が設定されている。これは非線形クリープ領域に至るとコンクリート構造の耐震性能や安全性が損なわれるというわけではなく、非線形クリープ領域に至るコンクリート構造物の長期耐震性能を評価する方法が、現時点では確立されておらず、規準類で提示できていないからである。常時荷重による非線形な応力配分と構造応答を評価した上で、レベル 1 地震動に対して修復性が保たれるか否かが算定できるようになれば、この耐久性条項を更新することができる。現在、過大な壁厚はレベル 1 地震時の性能設定が明確になることで、耐久性条項と複合して、より合理的に設定できるようになろう。この場合、長期クリープ変形した構造物の、レベル 1 地震に対する耐震性能(あるいは応答計算)を評価する技術が必要であることは論を待たない。なお、レベル 2 地震においては、構造物は相当の損傷を許容されるので、長期クリープ変形の影響は消散するので、温度応力同様に、クリープの影響は無視してよいとされている。

供用前に熱応力とひび割れが問題となるような大型コンクリート構造物の設計においても、同様のことが当てはまるものと思われる。一般に、耐震部材には、耐震性能に影響を及ぼすような温度ひび割れを許容しない設計が行われる。これも、初期欠陥温度ひび割れ存在下での耐震性能照査が可能となれば、必ずしも温度ひび割れを許容するのではなく、所定の幅等に制御することも選択として考えられる。レベル 2 地震に対しては、鋼材の降伏とコンクリートのひび割れが多数入り、応力が開放されるので、温度応力の影響は消散する。しかし、従来のレベル 1 地震動クラスでは、その影響は残存している。

ここで、コンクリート構造と対比させる意味で、鋼構造についても述べておく。鋼構造の場合、大部分は塗装によって腐食を防いでいることもあり、「定期点検の意味を含めた塗り替え」という、後者に属する戦略がとられている。疲労への対処もここに含まれる。近年、耐候性鋼材の利用可能範囲が拡

大し、メンテナンスコスト低減が図られているが、「思い切った放置」への割切りまでは、容易には進んでいない。一方、点検や補修そのものが困難な構造物の場合には、「腐食代（しろ）」と呼ばれる、断面板厚の割増によって、設計供用期間中の利用を担保する方法は古くから行われている。水圧鉄管や、長大橋のケーブルなどがその代表である。ケーブルの場合、設計応力の相当部分が変動性のない死荷重応力で占められており、安全率の役割は、健全時における極大荷重への信頼性の確保というより、腐食代の確保のためにあるという指摘もあるほどである。

本節で述べたように、耐久性の考え方には、設計上、2通りの方法があるが、レベル1の設計目標が明確化されることで、常時荷重と環境条件に関する条項も同時に合理化され、構造物の合理性(所定の品質が確保され、経済的)は高められる。レベル1耐震設計と、それに関連する耐久設計が一元的に組み上げられることを、技術的に進める価値は高いものと思われる。

参考文献（3.6）

- 1) 土木学会，2001 年制定コンクリート標準示方書維持管理編
- 2) 国土交通省/道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会,道路構造物の今後の管理・更新等の考え方 -提言-,2003 年 4 月

3.7 信頼性設計と経済性照査の関係について

本報告書で提案する経済性照査としてのレベル1設計は、現状のレベル2設計つまり安全性照査を満した上で、入力地震動のばらつきや応答の不確定性を陽に評価して、ライフサイクルコストを最小化する。一方、現状のレベル2設計では、入力地震動の不確定性や応答のばらつきを陽に評価して損傷確率をある値以下にする、いわゆる信頼性設計の考え方に基づいている訳ではない。しかし、現状のレベル2設計基準をクリアしていても、実際の損傷確率がゼロという訳ではなく、何らかの損傷確率を保有していることは明らかである。したがって、本来はレベル2設計も、入力地震動の不確定性や応答のばらつきを適切に評価する信頼性設計法に基づくべきであると考えられる。

現状のレベル2設計に信頼性設計の考え方が陽に導入されてこなかった理由として、1) 構造物が満たすべき年損傷確率として $10^{-4} \sim 10^{-6}$ といった大変小さな値を想定するため、損傷確率分布等の裾の部分の適切に評価しなければならないが、その評価のために必要な入力地震動や材料のばらつきの分布を裾の部分まで十分の確からしさをもって推定するのが困難であると思われること、2) 社会が受け入れられる年損傷確率として適正な値が 10^{-4} なのか 10^{-6} なのかといった、いわゆる「アクセプタブル・リスク」の議論が社会から広く受け入れられるに至っていないこと（付録に示す信頼性設計手法の水準Ⅱのように、年損傷確率を陽に用いない信頼性設計もあるが、これとてアクセプタブル・リスクの議論を免れるものではない）、などが挙げられる。これに対して提案する経済性照査としての新しいレベル1設計では、1) 用いる値がライフサイクルコストの「期待値」であるため、レベル2設計の場合に比べて分布の高頻度部分（あるいはデータの豊富な部分）が重要となること、2) ライフサイクルコスト「最小」が判断基準であり、アクセプタブル・リスクの議論が不要であること、により信頼性設計の枠組みを導入するのに障害となっていた点をクリアしている。したがって提案する新しい経済性照査は、積極的に入力地震動や材料のばらつきを考慮することが可能であると考えられる。解析手法はすでに信頼性設計のために開発されてきた手法をそのまま用いることができる。ライフサイクルコストの算出手法として、生起確率という条件を付帯する地震動に対する構造物の損傷程度を評価するため、モンテカルロシミュレーションによるサンプリング手法を用いた地震応答解析により被害ランクを経験する確率の離散的な評価手法が3.3節に示されているが、これは付録に示す信頼性設計手法の水準Ⅲに相当する手法の一つである。

ところで、現状のレベル2設計に信頼性設計の考え方を全く包含していないかと言えば、そんなことはない。現状のレベル2設計の枠組みにおいても、対象構造物の形状や材料特性、さらに耐力評価式など構造物の諸特性に関連する不確定性について間接的な評価を行っている。しかしそれらは、構造物が安全であるか否かを評価することを前提とし、種々の構造特性の安全性裕度に関する工学的判断に基づくものである。たとえば材料強度として、実際の平均的な強度よりかなり小さな値を用いたり、入力地震動として土木学会によるガイドライン¹⁾に示されているように、その地点における「最大級」の地震動を想定したりしている。すなわち、現状のレベル2設計の体系は間接的にはあるが、種々の不確定要因を部分係数により考慮した水準Ⅰの信頼性解析の手法を用いているという意味で、信頼性設計の範疇とすることができるかもしれない。一方、提案するレベル1設計では、評価指標がライフサイクルコストの「期待値」であるので、その評価に用いる材料強度などは実際の分布を用いなければならない。

水準Ⅰの信頼性解析の手法を用いる場合には部分係数として1を用いること、つまり現状のレベルⅡ設計で用いているような、実際の平均から意図的にシフトした値を用いてはならないことに注意が必要である。

最後に、提案する経済性照査は、現状のレベルⅡ設計の枠組みを、安全の量的評価の枠組み、言い換えれば性能照査型の信頼性設計の枠組みへの移行を促進することを指摘しておきたい。損傷確率は構造物が保有する重要な性能指標であり、安全の程度とコストの適切なバランスをもたらす設計体系を構築する意義は極めて高いと考えられる。今後、設計行為として安全性の定量的評価が経済性照査と併せて実践可能なプロセスの確立、さらに安全目標の明確化を早急に実施し、その目標に関する社会的なコンセンサスを得ることが必要と考えられる。

参考文献(3.7)

- 1) (社)土木学会編，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—，2001

付録：水準Ⅲ，ⅡおよびⅠの信頼性設計法の概要

信頼性設計において、重要な各種の損傷や破壊を定義する性能関数 $g(a, x)$ は地震応答や耐力の不確定性を表す確率密度関数 $f_R(a, x)$, $f_C(x)$ の差 $(= f_C(x) - f_R(a; x))$ として表現される。ここで、 a は最大加速度、最大速度などの入力地震動の最大値を表す指標、 x は材料特性を表す。すると、損傷や破壊はその性能関数正負(例えば、 $g < 0$ なら破壊状態、 $g > 0$ が安全状態)によって表現され、破壊確率 P_f は性能関数 g が負になる領域の確率計算から以下のように表わされる。この破壊確率 P_f を一般的に定義すると、複数の変数から定義されている同時確率密度関数の積分表現として得られ、水準Ⅲの信頼性解析と呼ばれている。その手法は、少数のデータから基本変数の確率密度関数を推定することや、破壊確率を直接計算することが求められるが、確率計算の困難さから、実用性は極めて低い。しかし、近年のコンピュータの発展によって、3.3節で示したようなモンテカルロシミュレーションを用いて計算する手法や、目的の効率化を考えて乱数の順序が数値積分には影響しないことからマルコフ過程モンテカルロ法(MCMC)なども提案されている

$$P_f = \Pr\{g(a, x) \leq 0\} \quad (3.7-1)$$

現在、複雑な確率計算はこれらの方法が主流と成りつつあるが、対象ごとにそれら手法の適用性を検討することが望まれる。

これに代わって信頼性を簡便に評価するため、基本変数の分布形を無視し、その平均値と分散を用いて安全性の程度を安全性指標 b により評価しようとする信頼性解析が考えられ、その方法は水準Ⅱの方法と呼ばれている。性能関数は、一般に X の非線形関数であり、 X の平均と共分散から性能関数 g の平均と分散を簡単に計算するために用いられるのが、FORM(First Order Reliability Method)または2次モーメント法と呼ばれる方法である。この性能関数の平均値 m_g と標準偏差 s_g との比の形で安全性指標 b が計算される。この安全性指標 b の意味は、図 3.7-1 に示すように平均値から設計点(破壊点)まで標準偏差の何倍かという意味であり、2~4 くらいであれば概略 $P_f = 10^{-3}$ である。安全性指標 b は確率変数が正規確率変数でなくとも算定することができる。いいかえると、安全性指標は確率変数の分布形が不明でも平均値と標準偏差という2つの統計量がわかっていれば適用できるものである。

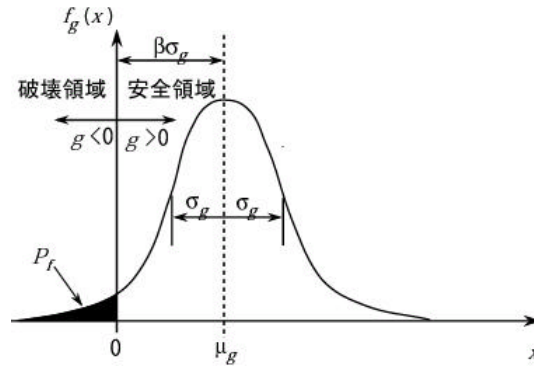


図 3.7-1 安全性指標 b

最後に、確率計算を伴わずに従来の方法で設計を行うため、荷重や強度の特性値を用い、部分係数を有する設計規準により、ある設定した安全性を確保する設計照査式が与えられることにより設計を行う方法がある。この方法は水準Ⅰの方法と呼ばれ、設計照査式の形式の違いによって、部分係数法や荷重抵抗係数設計法(LRFD)と呼ばれている。例えば、部分係数法では、限界状態を表す性能関数が、荷重の設計値 F_d に基づく荷重効果 S と材料物性の設計値 f_d に基づく抵抗 R より次式のように表現される。ここで、荷重と地盤物性の設計値はそれぞれの特性値 f_k, F_k と部分係数 g_f, g_m を用いて表される。

$$g_d = R_d - S_d = R(f_d) - S(F_d) = R\left(\frac{f_k}{g_m}\right) - S(g_f F_k) \geq 0 \quad (3.7-2)$$

すなわち、部分係数法では以下の式を満足するように設計すればよいことになる。

$$S(g_f F_k) \leq R\left(\frac{f_k}{g_m}\right) \quad (3.7-3)$$

一般的に材料の特性値は、地盤工学では平均値、または 5%の変動や $0.5 \times$ 標準偏差を考慮した値を用いることが多い。この特性値の設定に所要の安全性が内在することになる。

このように、破壊(損傷)確率などの安全性の評価手法には、地震応答や耐力に関する確率密度関数の表現形式(水準)に応じて、幾つかの方法がある。破壊(損傷)確率を効率的に計算するためには、破壊確率(損傷確率) P_f の直接評価、また安全性指標 b に基づく間接的な破壊確率の評価などの信頼性設計法における計算法を踏まえ、地震応答や耐力の不確実性に関する与条件のもとでモンテカルロシミュレーション法を含む幾つかの手法を適切に選択、運用することが必要になる。