リスクについて

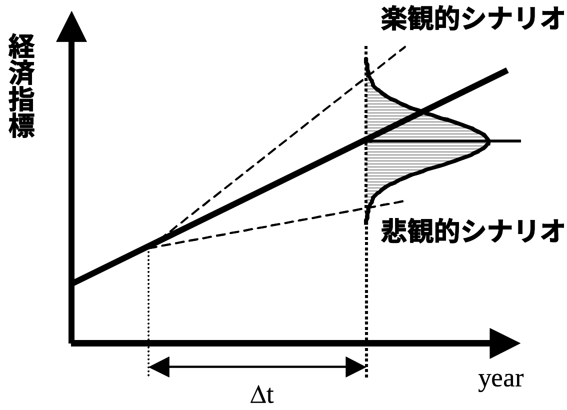
1．概　説

昨今リスクという言葉が，様々な分野で使用されている．例えば，新聞の見出しとして，金融リスク・証券リスクなどという文字が毎日のように踊っている．

ここで，リスク（*risk*）は，フランス語の *risqué* という言葉から派生したものであり，17 世紀頃から保険市場での危険性を表す指標として用いられ始め，18 世紀に英単語として辞書にも初めて登録されたものである[1]．つまり，リスクという言葉は本来経済用語として用いられてきたものであり，その後他の様々な分野でも援用されるようになってきた背景がある．ただし，その言葉が他の分野へと派生してきた過程で，それぞれの分野毎で異なる使い方がされてきたため，現状ではリスクについて様々な定義が存在する．この傾向は，日本語において特に顕著であり，最近では同じリスクという言葉を使用しても，専門分野毎にその解釈が異なるような状況がみられる．しかし，全般的に見て，現状ではリスクとは「予測できない事象が発生する危険性」を表す用語として用いられることが多いようである．

それでは，何故最近リスクという用語が頻繁に用いられるようになってきたかの背景について考える．例えば，**図－1** の模式図に示すように，経済がかなりの率で単調に成長を続ける場合にはリスクという概念は発生しない．これは，ある時点からΔt 年後の予測値がばらつきを有していたとしても，最も悲観的な数値であっても現状を上回っている場合に相当する．この場合には，たとえ借金をしても投資を行うことが収益を上げる最善の方法であり，リスクに代表される危険要素を全く想定する必要はない．これが，日本では高度経済成長期あるいはバブル経済期に相当し，また海外では 1997 年のタイバブル崩壊前の東アジア及び東南アジアの経済状況に相当する．したがって，日本及びアジア諸国では，これまでにリスクと言う概念が普及しにくい社会環境にあったものと推察される．

これに対して，昨今のような急速な経済成長が期待できない経済状況では，投資に対して常に最も悲観的な数値が出現することへの危険要素を想定することおよび，それに対する対応策を想定することが必要となる．これは，例えば日本に比べて既に緩やかな経済成長段階へと移行を遂げていた欧米諸国の経済状況及びバブル経済崩壊以後の日本の経済状況に相当する．したがって，このような社会背景から，昨今日本におい



図－1　経済予測の概念（模式図）

表－1　リスクの大分類

客観的リスク（*Objective Risk*） • 定量的な指標 • 過去の具体的なデータに基づき設定 （数学モデル/統計・確率モデル） 適用分野：金融工学，信頼性工学， 建設マネジメント 主観的リスク（*Subjective Risk*） • 半定量的な指標 • 経験・直感に基づき設定 （アンケート，ブレインストーム） 適用分野：建設マネジメント

ても欧米諸国と同様にリスクという概念が急速に普及しつつあるものと推察される．

ここで，リスクの概念が金融・保険の分野から他分野へと派生して使用されてきた過程で，その定義が各分野で異なる使い方がされていることについては既に述べた．例えば，金融工学の分野では，リスクは貨幣価値で表現されるが，他の分野でも金融工学と同様にリスクを定量的な指標として取り扱うためには，以下のような課題が生じる．

- 損失の発生に対する影響度を定量的に表現することが容易でない．
- 損失の発生する状況を表現するためには，その発生頻度を確率密度関数により表現することが必要となるが，そのモデル化は容易ではない．

このような状況を踏まえて，一般的なリスクの表現方法は，**表ー1** に示すように大きく以下の二つに区分される．

1）客観的リスク（*Objective risk*）

2）主観的リスク（*Subjective risk*）

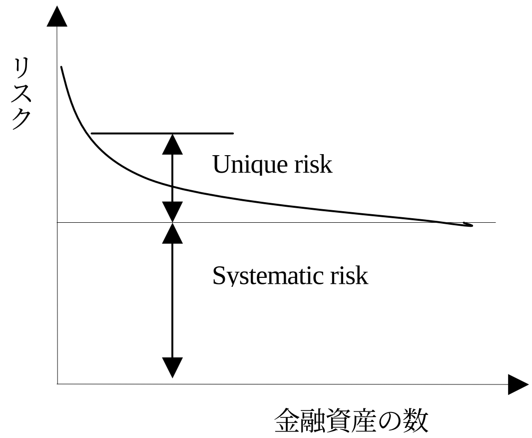
この内，客観的リスクは，実験結果あるいは過去の記録に基づき不確定量を統計・確率理論を用いてモデル化し，そのリスクを定量的に算定されるものである．例えば，**表ー1** に示すように，上述の金融工学の分野及び信頼性工学 [2] の分野で用いられるリスクがこれに相当する．また，建設マネジメントの分野でも，客観的リスクが用いられることがあるが，その代表例は，建設プロジェクトでのコストオーバーランおよび工期の遅延が発生することに伴う損失を，定量的な指標として貨幣価値により評価する検討事例等である．

これに対して，主観的リスクは，これらの値は数値で分類された等級，ブレーンストーミング，デルフォイ法あるいは，関係者へのインタビュー・アンケート結果に基づき算定されるものである [3]．すなわち，主観的リスクは金融工学の分野で取り扱われるように貨幣価値で表されるものではないが，関係者の経験・直感に基づき損失の重要度合いを感度分析的に表現するという意味では半定量的指標と位置付けられる．

この場合に，半定量的な指標として位置付けられるリスクは，以下に示すように数学的には期待値として表現を用いることが多い．

$$R = P \times I \qquad (1)$$

ここで，P（確率）は，ある事象が発生する可能性を表し，I（損失）は，ある事象が発生した際のインパクトの度合を表す．また，この指標は，各種のリスク要因毎に算定され，その影響度が算定される．



図ー2　金融リスクの分類 [6]

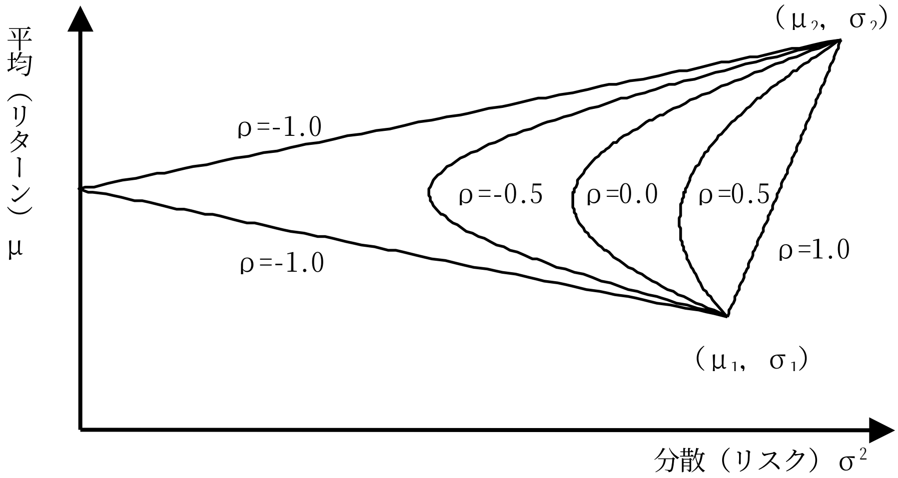
表ー1 に示すように，建設マネジメントの分野 [4] では，そのリスク評価の方法として，上記のような主観的リスクが用いられることが多い．これは，建設プロジェクトが内蔵するリスク要因が非常に多いことに対して，それらを統計・確率に基づき評価する事例が少ないことに起因する．さらに，この分野で対象とされるリスクの多くが，プロジェクトに関わる関係者の経験・直感により評価されることが多いことがこのような主観的リスクとして表現される所以である．また，LCA（*Life cycle analysis*）のように様々なリスク要因を挙げその中から支配的な要因を抽出する方法も，主観的リスクをベースとした感度分析と位置付けることができる．

上記のような各分野でのリスクの定義を踏まえて，本章では本研究の主題である建設マネジメント分野でのリスクとの相違及び類似性を明確にするために，金融工学・信頼性工学の 2 分野でのリスクの概念について概説する．

2．金融工学でのリスク

現状でも最も頻繁にリスクという用語を用いるのは，金融工学の分野である．なお，リスクと同様な意味を有する言葉として不確実性（*Uncertainty*）が挙げられるが，金融工学での狭義の定義として，リスクと不確実性はそれぞれ以下のように記述されている [5]．

- 不確実性とは，将来の変動が不確定な事象で，その変動が何らかの数学モデルで記述できないもの



図−3　ポートフォリオ曲線の事例

- リスクとは，将来の変動が不確定な事象で，その変動が何らかの数学モデルで記述可能なもの

ここで，示される数学モデルの代表例としては，確率モデルが挙げられる．ただし，上述の分類はあくまで狭義の定義であり，実際にはリスクと不確実性はほぼ同等な意味の言葉として用いられることが多い．

金融工学の分野でリスクとは，投資に対する不確定的を表現するもので，具体的には期待値（期待収益値）まわりの分散あるいは標準偏差として表現される．この定義の下では，一般には期待値あるいはリスクに相当する標準偏差を評価する場合に多くの過去の事例を用いることから，大数の原理あるいは中心極限定理が適用可能とすることで，暗黙の内に確率密度関数として正規分布関数を用いられることが多い．

また，この分野で取り扱われるリスクは，**図−2** に示すようにシステマティックリスク（*Systematic risk*）と個別リスク（*Unique risk*）とに分離可能と仮定される[6]．前者のシステマティックリスクは，株式等のマーケット全体での資産の変動（ボラティリティ）に起因するものである．一方，後者の個別リスクは，個々の資産（例えば証券）の変動（ボラティリティ）に起因するものである．この両リスクの特性として，**図−2** に示すように，システマティックリスクはマーケットに固有な値であり一定値となるのに対して，個別リスクは保有する資産を数多く組み合わせることでその量を低減することが可能であることが知られている．この保有する資産を数多く組み合わせることで個別リスクが低減可能となる特性が，後述するいわゆるポートフォリオ理論[5),6)] 及びβ−CAPM 法[7)] と呼ばれる金融工学でのリスクマネジメント手法の基礎理論となる．以下に，ポートフォリオ理論及びβ−CAPM 法について概説する．

２．１　ポートフォリオ理論

ポートフォリオ理論の基本概念は，投資を数多くの資産に分けて行うことで，収益の不確定性に対する危険分散を図ることである．金融工学の文献では，この概念を説明する上で，「決して１つの籠にすべての卵を入れるなかれ」と喩え話で説明されている．この複数の資産を組み合わせるという概念は，議論を最も簡単にした場合には，以下に示すように２つの確率量の和としてモデル化される．

ここで, 資産 1 及び資産 2 の収益率がそれぞれ $N(\mu_1, \sigma_1^2)$，$N(\mu_2, \sigma_2^2)$の正規分布に従うとした場合に，両者を等分に購入した場合の平均収益率（リターン）μ 及び分散（リスク）σ^2 は，以下のように表される．

$$\mu(Return) = \mu_1 + \mu_2 \qquad (2)$$

$$\sigma^2(Risk) = \sigma_1{}^2 + \sigma_2{}^2 + 2\rho\sigma_1\sigma_2 \qquad (3)$$

ここに，ρ は資産 1 及び資産 2 の収益率の相関係数を表す．

式（2）に示す関係で注目すべき点は，平均値（リターン）は同じであっても，分散（リスク）は相関係数ρの関数となり変動することである．例えば, 相関係数ρ =1.0，0.0，-1.0 とした場合に，それぞれの分散（リスク）には以下のような関係が成り立つ．

$$\sigma^2(\rho = 1.0) = \sigma_1{}^2 + \sigma_2{}^2 + 2\sigma_1\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2)^2$$

$$\sigma^2(\rho = 0.0) = \sigma_1{}^2 + \sigma_2{}^2$$

$$\sigma^2(\rho = -1.0) = \sigma_1{}^2 + \sigma_2{}^2 - 2\sigma_1\sigma_2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2$$

$$\therefore \sigma^2(\rho = 1.0) > \sigma^2(\rho = 0.0) > \sigma^2(\rho = -1.0) \tag{4}$$

式（4）の関係より，たとえ正の相関（ρ>0.0）がある資産を組み合わせて購入しても，全く同じ資産を購入するよりもリスクは減少させることが可能となる．また，負の完全相関（ρ=-1.0）にある資産を組み合わせることで，リスクを最小にすることが可能となる．

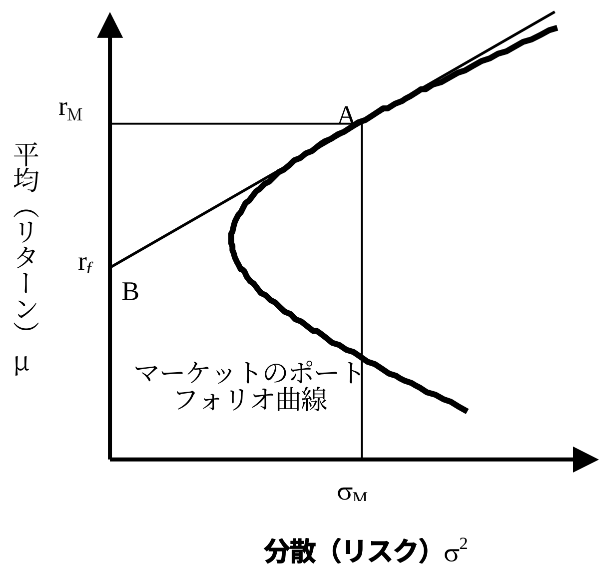
次に，同じ資産 1 及び資産 2 の購入の割合をそれぞれ（1-α）及びαとした場合には，平均収益率（リターン）μ 及び分散（リスク）σ^2 は，以下のように表される．

$$\mu = (1-\alpha)\mu_1 + \alpha\mu_2 \tag{5}$$

$$\sigma^2 = (1-\alpha)^2\sigma_1{}^2 + \alpha^2\sigma_2{}^2 + 2\alpha(1-\alpha)\rho\sigma_1\sigma_2 \tag{6}$$

式（5）及び式（6）の関係式に基づき，５種類の相関係数（ρ=1.0，0.5，0.0，-0.5，-1.0）に対して分配率αを 0 から 1 まで変化させた場合には，平均収益率（リターン）μ 及び分散（リスク）σ^2 は，**図−3** に示すような関係になる．同図の平均（リターン）−分散（リスク）平面に示すように，同じ平均（リターン）に対しても，相関係数ρ が小さくなるにつれて分散（リスク）も小さくなる．この傾向から，平均収益率の変化についての相関性が低い（ρ <1.0 に相当）資産を組み合わせることにより，リスクの低減を図ることが可能となる．また，同じ相関係数ρ の場合でも，分配率αを変動させることで平均（リターン）を大きくすればそれに伴い分散（リスク）も大きくなる．つまり，ハイリスク−ハイリターンの関係が成り立つ．

以上に述べたように，**図−3** に示した 2 つの資産の組み合わせという簡単な数学モデルを用いても，資産を数多く組み合わせることで個別リスクを低減することという，ポートフォリオ理論の基本概念は説明できる．



図−4　市場ポートフォリオ曲線と市場ライン

２．２　β−CAPM 法

２．１では，ポートフォリオ理論の基本概念について，2 つの資産の組み合わせ問題を用い述べたが，上記の関係は組み合わせる資産の数を増やしても全く同様である．すなわち，資産の数を増やした場合には，**図−3** に示したような 2 つの資産で形成されるポートフォリオ曲線を複数描くことができ，最終的にはそれらをすべて包絡するものが，効率的フロンティア曲線を形成するはずである．

ここで，株式市場のようなマーケットは，投資家の分散した投資を集積したものとみなされることから，市場価格は**図−4** に示すようなすべての資産を包絡するものが，効率的フロンティア曲線を形成すると考えられる．

この市場ポートフォリオとリスクの存在しない資産との関係から，さらに仮想的なポートフォリオを形成して，ある危険資産 i の価格設定を行う方法が，シャープにより提案された CAPM（Capital assets pricing method）である [7]．

この方法では，**図−4** に示す関係に基づき，危険資産 i のリスクプレミアムは，市場収益率のリスクプレミアムと線形化係数β_iで関係づけられると仮定する．

$$r_i - r_f = \beta_i (r_m - r_f) + \varepsilon_i$$
$$\beta_i = \frac{Cov[r_i, r_m]}{Var[r_m]} \tag{7}$$

ここに，r_iは危険資産iの収益率，r_fはリスクフリー率，r_mは市場収益率，ε_iは危険資産iの個別ショック，σ_{m}は市場リスク，σ_{mi}は市場収益率と危険資産iの収益率との共分散である．

したがって，期待値として危険資産 i のリスクプレミアムは，市場収益率のリスクプレミアムと次式のように線形化係数β_iで関係づけられる

$$E[r_i] - r_f = \beta_i (E[r_m] - r_f) \tag{8}$$

一方，危険資産 i の収益率の分散は，次式のように表される．

$$Var[r_i] = \beta_i^{\ 2} Var[r_m] + \sigma_i^{\ 2} \tag{9}$$

ここに，σi^2は危険資産iの個別リスクの分散を表す．

したがって，危険資産 i のリスクプレミアムは個別リスクと無関係で，システムリスクのみに依存して設定されるものとなる．

３．工学分野でのリスク

従来，土木工学分野には，リスクという概念は存在しなかったといえよう．なぜならば，リスクという概念を設計に導入するためには，構造物が壊れる可能性があるということを明確に認めることになるからであろう．

これまでの設計論では，構造物が設定した外力すなわち，設計で設定される仕様に対して安全であることのみを強調するものであった．その安定性を具体的に表示する指標として，応答値と耐力値と比として定義される安全率が適用されてきた．すなわち，この枠組みの下では，限定された条件での安全性を保証しているが，損傷を受ける可能性があるということを明示していないため，どのような観点から安全であるかの定義が曖昧であるといえる．

このような課題が顕在化したのが，阪神大震災であったといえよう．つまり，設計条件を超える外力が作用すれば，構造物は崩壊するという，ある意味では当然の帰結を招いたといえる．それでは，設定外力をこれまで以上に大きくし，高い耐力を有する構造物を建設することは可能であろうか．技術的には可能であるが，現実的には耐力を高めることは，建設コストの増加を伴う．右肩上がりの経済状況下では，この建設コストの増加は吸収されたであろうが，現状およびこれから想定される経済状況では，無制限な建設コスト増加の吸収は実行不可能である．つまり，ある程度までの外力レベルまでの耐力を保証するが，それ以上の外力が作用した場合には構造物は被害を受ける危険性があるということを認めざるを得ない．このことは，従来の安全率を満足していれば，構造物は被害を全く受けないという大前提を覆すことになるため，構造物の利用者（インフラストラクチャーの場合には国民）に，構造物がその性能を喪失する危険性について明示するとともに，その方策について合意を得ることが必要となる．そのためには，これまでの専門家による安全性評価だけでなく，分かり易い指標を用いてその被害が発生する危険性について利用者に説明することが必要となる．

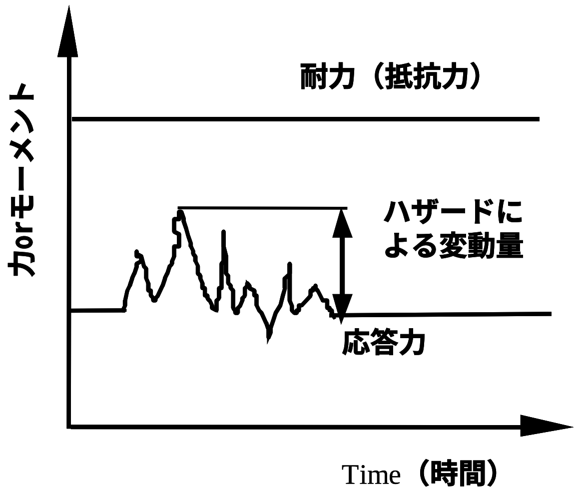
このような観点から，リスクという概念が工学分野でも注目されるようになってきた．いうまでもなく，工学分野でのリスクの基本概念は，構造物が地震等の外力を受けて何らかの被害を受ける危険性を表現するものである．このためには，作用する外力レベルとその外力により構造物が被害を受ける危険性を明確に関連付ける必要がある．つまり，構造物の被害推定を行うことが必要となる．

もちろん，構造物の被害とは確定的に推定されるものではない．このため，工学分野でのリスクとは，被害が想定される事象に対して，その事象が発生する頻度（あるいは可能性）とその際の損失のレベルとを掛け合わせた損失期待値（Expected Loss）として定義されることが一般的である[8)]．

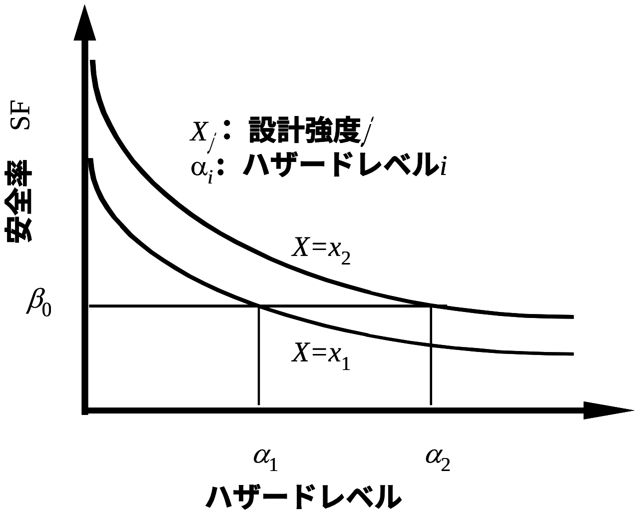
$$R = \sum_{i=1}^{J} P_i \times C_i \tag{10}$$

ここに，R は損失期待値，P_iは事象 i が発生する確率，C_iは事象iが発生する場合の損失を表す．

このような観点から，本節では従来の安全率規範による設計論の基本概念を明確にすると共に，リスクの



（a）耐力と応答力との関係



（b）安全率とハザードの関係

図−5　従来の安全率規範に基づく設計論（模式図）

評価方法及びそのリスク基本による設計論について示す．

３．１　安全率規範による設計論 [9)]

従来の設計論では，**図−**5 に示すように構造物の耐力（抵抗力）と，地震力のようなハザードを考慮した構造物の応答力を想定し，その安定性を評価する指標として，次式に示す安全率が用いられる．

$$SF = \frac{R}{S + \Delta S} \qquad (11)$$

ここで，SF は安全率，R は耐力（抵抗力），S は常時の応答力, ΔS はハザードによる応答力増分の最大値を表す．なお，式（11）に示す安全率は，通常設計強度 x とハザードレベルαとの関数となるため，次式のように表される．

$$SF = f(x, \alpha) \qquad (12)$$

したがって，**図−5** に示すように安全率 SFーハザードレベルα関係は，通常設計強度 x をパラメータとして幾つもの曲線関係を得られる．

次に，一般的な設計では**図−5** に示すように，設計条件として所与の安全率β（β>1.0）及びハザードレベルα を設定し，それに対応した設計強度 x を定めることになる．ここで，**図−5** に示すように，所与の安全率β を一定としても，設定するハザードレベルα_i を大きくするにつれて，必要となる設計強度 x_i は単調に増加する関係となる．したがって，上記の設計論の妥当性は，ハザードレベルα_i をどのように設定するかに依存することになる．

次に，所与の安全率β の下で，設定ハザードレベルをα^*とした場合に求められる設計強度を x^*とする．この場合には，所与の安全率β は通常 1.0 以上の値となることから，構造物の安定性と，実際に発生するハザードレベルαとの間には, **図−6** に示すように以下の関係が成り立つ．

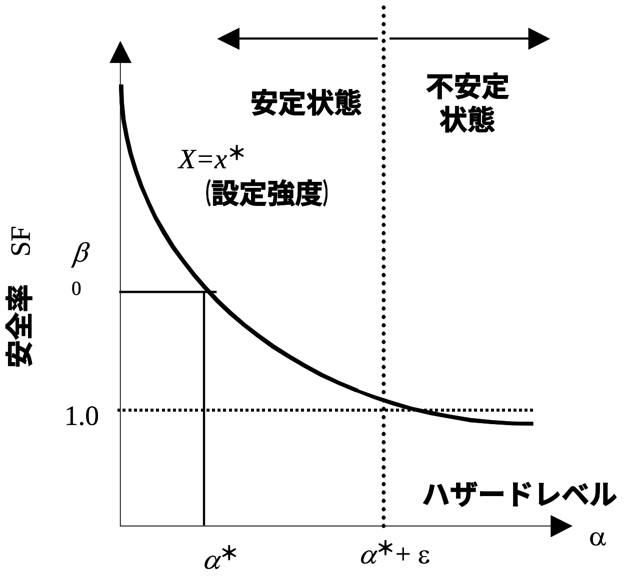
1）　安定状態

$$\alpha \le \alpha^* + \varepsilon \qquad (13)$$

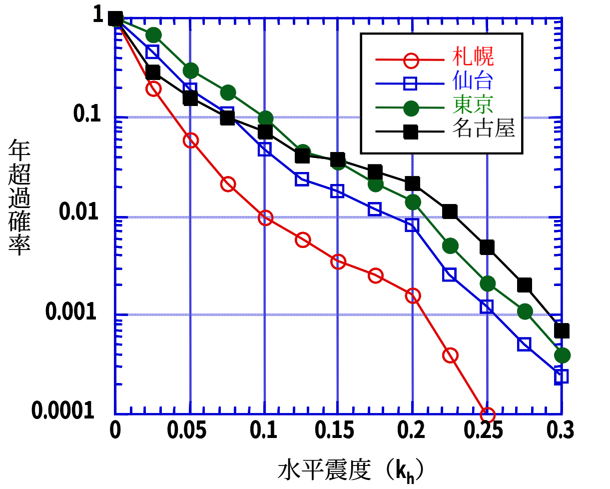
2）　不安定状態

$$\alpha > \alpha^* + \varepsilon \qquad (14)$$

ここに，ε は所与の安全率によるハザードレベルに対する崩壊余裕を意味する割増分を表す．



図－6　安全率とハザードレベルとの関係



図－7　地震ハザード曲線[10)]

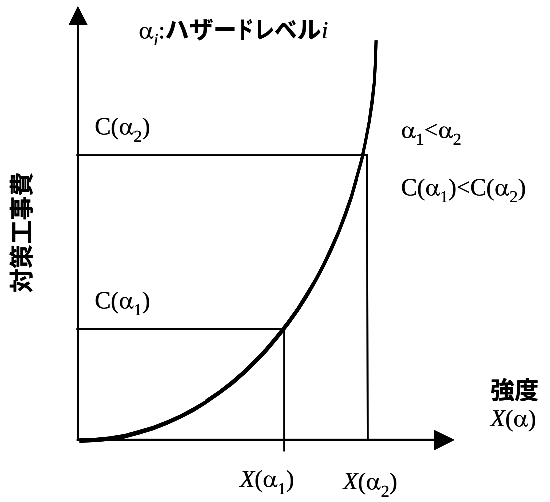
したがって，式（13）～式（14）の関係に示すように，所与の安全率の下で，設定ハザードレベルα^*および設計強度を x^*とした場合には，$\alpha^*+\varepsilon$ が限界状態となるハザードレベルを与えることになる．つまり，既往の設計論において，従来の所与の安全率を満足していれば，構造物は被害を全く受けない，つまりリスクは存在しないという大前提は，以下の条件が成立つことを仮定しているものとなる．

$$Prob\{\alpha > \alpha^* + \varepsilon\} \cong 0 \qquad (15)$$

ここに，*Prob*{・}は・の事象が発生する確率を表す．

いうまでもなく，式（15）の条件が満足されない場合には，構造物はハザードの発生により被害を被ることになる．従来は重要構造物の設計においては，設計仕様書に示されているように，設定ハザードレベルα^*は過去の最大値を用いることで，工学的判断として式（15）を満足させるように配慮されてきた

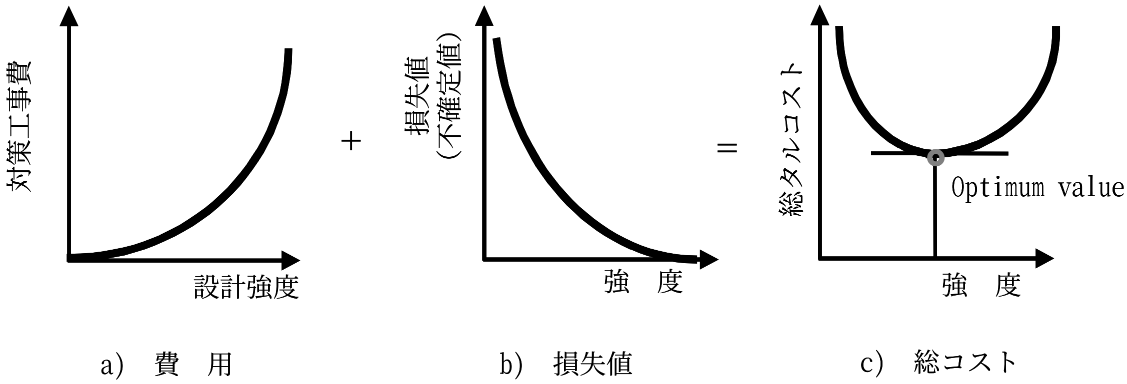
しかし，この仮定条件が満足されない場合があることが，兵庫県南部地震の発生により明らかとなった．兵庫県南部地震で観測された地震動は，過去に経験されたことがない極めて大きいものであり，未曾有の構造物の崩壊が発生した．つまり，従来の設計論の基本概念であった式（15）の関係式は，以下のように書き換えなければならない可能性がある．



図－8　建設コスト～設計強度関係

$$Prob\{\alpha > (\alpha^* + \varepsilon)\} \neq 0 \qquad (16)$$

すなわち，従来の設計論では想定されて来なかったリスクを認めることである．この事実は，石川[10)]により示された地震ハザード曲線[11),12)]からも明らかとなる．地震ハザード曲線とは，**図－7** に示すように，各地での過去の地震記録に基づく，あるハザードレベル（この場合には最大加速度）と，そのハザードレベルを上回る地震動の発生する年超過確率の関係を表すものである．なお，**図－7** に示す年超過確率の逆数は，そのハザードレベルの再現期間を表す．すなわち，あるハザードレベルの地震の年超過確率が0.01とは，100



図－9　総コスト最小化原理

年確率で発生が予想される地震動に相当することになる．阪神大震災以降，自然災害の発生に関するハザード設定で，100 年確率あるいは 1000 年確率という表現が用いられることがあるが，この数値と年超過確率とは，上記のような関係にある．

図－7 に示されるように，如何なるハザードレベルに設定しようとも，そのハザードレベルを上回る地震動の発生確率は，決して式（.15）を満足するように 0 となることは無い. すなわち, 100 年確率あるいは 1000 年確率というハザードレベルを用いても，従来の所与の安全率を満足していれば，構造物は被害を全く受けないという大前提は成立たないことは明白である．

それでは，被害を出来るだけ少なくするという立場に立てばどのようになるであろうか．最も単純な方策は，設定ハザードレベルをα^*を高くすること（本質的に設計強度を x^*を大きくすることと等価）である．

しかし，設定ハザードレベルα_i～設計強度 $x(\alpha_i)$～建設コスト $C(\alpha_i)$に関して，**図－8** に示す以下の関係が成り立つことは明らかである．

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \cdots\cdots < \alpha_J$$
$$x(\alpha_1) < x(\alpha_2) < \cdots\cdots < x(\alpha_J) \qquad (17)$$
$$C(\alpha_1) < C(\alpha_2) < \cdots\cdots < C(\alpha_J)$$

すなわち，設定ハザードレベルα_iの増加に対して，建設コストも単調増加するだけの関係となり，単純に最適な設計強度 $x(\alpha_i)$～建設コスト $C(\alpha_i)$の関係を議論することはできない．

もちろん, 建設コストに限界がある場合には, 式(17)に示す関係から, 最適値は逆算的に設計強度 $x(\alpha^*)$～設定ハザードレベルα^*が算定される．しかし，その場合には，式（16）の関係から構造物が損傷する可能性とは独立した議論であり，最適設計とはいえないであろう．

３．２　リスク規範による設計論

リスク規範による設計論は，従来の安全率規範と異なり，ある設計強度の下で構造物が損傷を受ける危険性があるとすることが前提条件となる. このためには, 設定ハザードレベルα_i～設計強度 $x(\alpha_i)$～建設コスト $C(\alpha_i)$の関係に加えて，その条件での損傷レベルすなわち損失を関連付けることが必要となる．この前提条件の下での，リスク規範による設計論を以下に述べる．

（1）基本概念

仮に，**図－6** に示した事例で，構造物が不安定状態になった場合の損失を L とした場合には，式（10）の定義式より，損失期待値 R は以下のように表される．

$$R = (1 - p_f) \times 0 + p_f \times L$$
$$p_f = Prob\{\alpha > (\alpha^* + \varepsilon)\} \qquad (18)$$

ここに, p_fはハザードレベルαが所与のハザードレベルを超える発生確率である．また，ハザードレベルαが所与の値を超えない場合には損失を仮定しないものとした．

ここで，以下の 2 つの事項が問題となる．

① 式(18)に示す損失 L をどのように評価するか．

② 式（18）に示す損失期待値 R をどのように利用するか．

上記の事項について，以下に要約して示す．

ここで，インフラストラクチャーの代表例として高速道路を想定する．仮に，高速道路が健全な状態である場合に有している潜在価値を V とする．そして，その構造物が破損した後も復旧して使用するものとすれば，高速道路が破損することによる事業者および，利用者の損失はそれぞれ以下のように列挙される [13), 14), 15)]．

a） 事業者損失；L_1
- 復旧費
- 道路閉鎖期間の営業損失
- 人的・物的補償費

b） 利用者損失；L_2
- 道路閉鎖期間の営業機会損失
- 道路閉鎖期間の迂回・走行時間損失

すなわち，事業者損失 L_1 は，復旧費，道路閉鎖期間の営業損失，人的・物的補償費の和とし，利用者損失 L_2 は，道路閉鎖期間の営業機会損失および迂回・走行時間損失の和とする．

さらに，一般性を持たせるために，所与の設計強度 x^*とすると，その強度条件に対する損失は次式のように表される．

$$L(x^*) = L_1(x^*) + L_2(x^*) \qquad (19)$$

この仮定の下では，損失 $L(x^*)$は所与の設計強度 x^*での構造物の性能を潜在価値 V に回復するまでに必要な損失と定義できる．また，事業者のみならず利用者の損失を考慮することで，式（19）に示す損失は社会全体としての損失を表すものとなる．なお，この損失は，式（18）に示すようにある生起確率 p_f の条件で発生するため，損失期待値 $R(x^*)$は次式のようにように表される．

$$R(x^*) = p_f \times L(x^*) \qquad (20)$$

次に，所与の設計強度 x^*の構造物を建設するためのコストを $C(x^*)$とすれば，事業者および利用者を対象とした, 構造物の社会的厚生 B は次式のように表される．

$$B = V - R(x^*) - C(x^*) = V - \{R(x^*) + C(x^*)\} \qquad (21)$$

ここで，総コスト $TC(\alpha^*)$を次式のように定義する．

$$TC(x^*) = R(x^*) + C(x^*) \qquad (22)$$

式（21）および式（22）の関係において，最適設計設計は，構造物の社会的厚生 B を最大にする設計強度 x^*を求める問題であると仮定する．この場合に，構造物の潜在価値 V が一定とすれば，その問題は**図ー**9 に示すように，総コスト TC を最小にする問題と等価になる．すなわち，リスク規範による最適設計とは，式（22）に示す損失期待値と建設コストの和となる総コストを最小となる設計強度 x を求めることとなる．

(2) 一般的な期待損失値の評価方法

(1) では，議論を簡素化するために，損傷モードを構造物が破壊するか否かとし，また設計パラメータを確定値としたモデルを示した．ここでは，より議論を一般的なものとするために，設計パラメータを不確定量とし，損傷モード i も J 通り存在するものとする．また, 各損傷モードに対する損失も Li（i=1, J）とする．

次に，設計強度 x およびハザードレベルαの条件の下で，損傷モード j 以上の損傷が生じる条件付き確率を $Pj(x, \alpha)$とすると，構造物に損傷モード j の破損が生じる条件付き確率$\Phi j(x, \alpha)$は, 以下のように定義される．

$$\Phi_j(x,\alpha) = P_j(x,\alpha) - P_{j+1}(x,\alpha) \quad (1 \le j < J) \qquad (23)$$

$$\Phi_J(x,\alpha) = P_J(x,\alpha) \qquad (24)$$

また，式（23）および式（24）より，条件付き損失期待値 $R(x, \alpha)$は，以下のように表される．

$$R(x,\alpha) = \sum_{j=1}^{J} L_j \cdot \Phi_j(x,\alpha) \qquad (25)$$

次に，図－7 に示す地震ハザード曲線において，1 年間にハザードレベルα 以上の地震が発生する確率を$\Psi(\alpha)$は，地震の発生確率密度$\varphi(\alpha)$と次式のように関連付けられる．

$$1-\Psi(\alpha)=\int_0^{\alpha}\varphi(X)dX \qquad (25)$$

したがって，地震の発生確率密度$\varphi(\alpha)$は次式のように表される．

$$\varphi(\alpha)=-\frac{\partial\Psi(\alpha)}{\partial\alpha} \qquad (26)$$

ここで，ハザードレベルα の発生する確率が$\varphi(\alpha)d\alpha$であることに注意すれば，年間損失期待値R_aは以下のように算定される．

$$R_a(x)=\int_0^{\infty}R(x,\alpha)\varphi(\alpha)d\alpha$$

$$=-\int_0^{\infty}R(x,\alpha)\frac{\partial\Psi(\alpha)}{\partial\alpha}d\alpha \qquad (27)$$

ここで，構造物の供用年数を n とした場合には，n 年間の累積損失期待値 $R_n(x)$は次式のように表される[16)]．

$$R_n(x)=R_a(x)\sum_i^n\left(\frac{1}{1+\rho}\right)^i \qquad (28)$$

ここに，ρ は社会的割引率である．

したがって，構造物を供用後 n 年時での総コストは，次式のように表される．

$$TC_n(x)=C(x)+R_a(x)\sum_i^n\left(\frac{1}{1+\rho}\right)^i \qquad (29)$$

ここに，$C(x)$は設計強度xに対する建設コストを表す．

式（29）に示すように，構造物の総コストは，建設費 $C(x)$に社会的割引率を考慮した累積損失期待値を加えたものとなる．

したがって，一般的な条件での構造物の供用年数を考慮した場合での最適設計は，式（29）に示す総コストを最小化する設計強度 x を求める問題となる．

なお，一般にインフラストラクチャーは，明確に耐用年数を設定されないことから，その設計条件は無限とされている．そのことから，対象構造物を無限期間に渡り供用する場合には，式（29）において n→∞とした場合の総コストは，次式のように算定される．

$$TC_n(x)=C(x)+R_a(x)/\rho \qquad (30)$$

式（30）に示すように，総コストは初期の建設コストと，年間リスクに重みとして社会的割引率の逆数を掛けたものの和として表される．

なお，この場合の総コスト最小条件は，次式のように表される．

$$\frac{\partial C(x)}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial R_a(x)}{\partial x} \qquad (31)$$

上式より，建設コストの設計強度に対する増加率と，年間損失期待値の設計強度に対する減少率に社会的割引率の逆数を重みとして掛けた数値に等しい場合が，最適設計強度を与えることとなる．

ここで，社会的割引率は，日本ではρ=0.04 と設定されるのに対して，開発途上国では一般的にρ=0.12 程度に設定される．このため，累積損失期待値の現在価値は，開発途上国では日本の 1/3（=0.04/0.12）程度となる．また，無限期間を仮定しながら，収束値に達する期間が開発途上国の方がはるかに早くなる．このことから，日本のように成熟型社会においては，インフラストラクチャーの建設投資は，施設を長期にわたり供用することが有効となるため，最適設計強度は長期に渡るメンテナンスを前提として設定される必要がある．一方，開発途上国ではいわゆる更新投資を前提とした設計強度が最適設計強度となる．

このように，最適設計強度 x は，そのインフラストラクチャーが建設される国のマクロ経済状況を反映したものとして算定される．

参考文献

1) C. Chapman and Stephen Ward: Project Risk Management, John Wiley & Sons, 1997

2) 伊藤学他：土木・建設のための確率・統計の応用, 丸善株式会社，1988

3) 能澤徹：国際標準プロジェクトマネジメント，日科技連出版社，1999

4) He Zhi: Risk Management for Overseas Construction Projects, International Journal of Projects Management, Vol. 13, No. 14, pp. 231-237, 1995

5) 山下智志：市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店, 2000

6) 野口悠紀夫：金融工学、こんなに面白い，文春新書，pp. 42-109，2000

7) 齊藤誠：金融技術の考え方使い方，有斐閣，2000

8) J. R. Benjamin and Cornell, A. A. : Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, pp. 578-580, 1970

9) 大津宏康・大西有三・水谷守：斜面の性能に着目した安定解析手法に関する一考察，土木学会論文報告集 No. 631/III-48，pp. 235-243，1999

10) 石川裕：確率論的想定地震と低頻度巨大外力評価へ応用に関する研究，京都大学大学院博士論文, 1998

11) Cornell,C.A. ：Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America,Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968

12) Der-Kiureghian, A. and Ang, A.H-S.：A Fault Rupture Model for Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.67, No.4, pp.1173-1194, 1977

13) 中村英夫他：道路投資の評価に関する指針(案), 道路投資の評価に関する研究委員会, 日本総合研究所, 1998

14) 太田勝敏：道路投資の社会経済評価，道路投資評価研究会，東洋経済新報社，pp.110-121，1997

15) 小林潔司：道路投資の社会経済評価，道路投資評価研究会，東洋経済新報社，pp.212-235，1997

16) 大津宏康・大西有三・水谷守：地震に伴う災害リスク評価に基づく斜面補強の戦略的立案方法に関する一提案，土木学会論文集 No．679/VI-51，pp. 123-134，2001