

死亡者数を指標とした地震災害に対する 許容リスクの設定に関する考察

赤倉 康寛¹・鈴木 基行²

¹正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所 計画設計基準部 システム研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

本論文は、地震災害に対する許容リスクの設定について、死亡者数によりリスク評価を行う方法について述べ、これに関わる考察を行ったものである。まず、許容リスクの設定は、国土レベルでのリスク評価・分析とリスク管理境界の決定との過程であり、個別の社会施設の設計規定とは分離する考え方を示した。リスク評価・分析では、死亡者数を指標とし、地震・洪水・津波災害の発生規模構造の把握を行った。リスク管理境界では、洪水防衛計画、交通事故死亡者数等からの決定方法について述べた。加えて、仮に許容リスクについての国民のコンセンサスが得られた場合に、地震災害に対するリスク管理境界から社会施設の設計規定に係るレベル2想定地震の設計規模要件の算定を行った。

Key Words : acceptable risk, risk management, natural disaster, earthquake disaster, flood disaster, tsunami disaster, return period, design earthquake of level 2

1. 序論

合田¹⁾は、“土木の仕事は人が社会をつくり、共同して生活を営む上で必然的な行為”と述べている。また、伊藤・尾坂²⁾は、設計を“人間生活で生ずる必要を満たす目的で行われる決定過程”であり、“人間の社会活動を維持し、発展せしめる必要から生まれる着想や知的計画を実現化するために、自然科学の原理と技術を適用して、工程、施設、システムを確定する過程である”としている。すなわち、構造設計とは、人間が自ら持つ力により、自然環境の中で、自らの社会生活を営む環境を創り出してきた作為そのものであると言えよう。したがって、構造物、特にその中でも社会施設を設計することは、社会とその社会をとりまく自然環境との関係を、つまり、社会が自然環境から受けるあらゆる影響の度合いを決定していることに他ならない。

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、神戸市を中心とした地域に甚大な被害をもたらした。我々の社会が大きな自然災害の危険に常にさらされながら維持されていることを、強く認識させられる事象であった。では、このような大きな自然力に対し、社会の安全性は一体どのレベルに設定されるべ

きなのであろうか。地震後約1年の1996年1月10日に土木学会から発表された「土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言」³⁾のまえがきにおいては、“われわれは自然に対して謙虚であるとともに、防災機能、環境の保持、経済性のバランスのもとに、国土、地域および都市づくりを考えることの重要性を再認識する必要がある”とされており、さらに、“様々な制約条件の中で、未知の超過地震力に対応することになる。この対応は、指針となるべき絶対的な論理的決定根拠が存在しないが故に、国民の価値観に依存する意思決定に基づくことになる”と述べられている。社会の安全性のレベルの設定、すなわち社会が受容することが許される危険性の設定は、社会全体の意思決定であるべきということであり、社会全体の意思を決定させる社会構成員全体の価値観以外に論理的根拠を求めることはできないとのことであろう。これを受け、土木学会地震工学委員会地震荷重研究小委員会（委員長：伯野教授）においては“土木技術者はどこまで安全を担保しうるかを明確にした上で、安全性に関する国民的合意を形成するための技術体制を多くの分野の人達と協力して構築していかなければならない”との考え方が示されている⁴⁾。さらに土木学会においては、構造工学

委員会の建設事業における確率・統計的意思決定研究小委員会（委員長：佐藤助教授）において議論がなされ報告がまとめられている⁹⁾と共に、企画調整委員会内に国土防災の適正水準に関する検討特別小委員会（委員長：河田教授）が設けられ、技術体制の構築のための検討が進められている⁹⁾。

社会が許容せざるを得ないリスクの国民的合意を形成するためには、兵庫県南部地震を始めとし、これまで社会が被ってきた被害を真摯に捉え、これに立ち向かうためのあるべき姿を描き出す努力が必要になる。本論文は、この過程について一つの考え方を提示し、それに関わる考察を行ったものであり、その目的は、合意形成のための議論を進める上でのたたき台となることである。

本論文では、まず許容リスクの設定についての考え方を整理する。次いで、自然災害のリスク評価について、死亡者数を指標とし、その発生規模構造の把握を行う。さらに、地震災害に対する許容リスクの設定例について述べる。そして、仮に地震災害に対する許容リスクが設定された場合に、社会施設の設計規定について、主要都市でのレベル2想定地震の規模要件を試算する。

2. 自然災害に対する許容リスクの在り方

本論文では、許容リスク (acceptable risk) とは、自然災害等の発生に対して人間社会が許容せざるを得ないリスクであると定義する。この場合のリスクは、未来の被害発生の可能性とその規模を指す。本章では、まず許容リスクに関連する既往の研究を概観し、さらにこの許容リスクの在り方について述べる。

(1) 既往の研究

a) 許容リスクの設定に関する研究

これらの研究は、構造物の安全性規範が“常に安全を保障する”形式から“破壊の確率を受け入れ得る値以下に制限する”形式⁷⁾に移行するに従い発生してきたものと考えられる。なぜならば、構造物が破壊することを認めた場合に、破壊の確率とその破壊によって生じ、波及する被害を論ずることが必要不可欠だからである。

社会が許容せざるを得ない破壊確率の設定に関連した初期の著名な研究に、アメリカにおいて原子力発電所の計画にあたって提出されたラスムッセン報告⁸⁾がある。各種事故・自然災害による年平均死亡確率と原子力発電の事故による年平均死亡確率を相

対比較したこの報告以降、原子力発電所の設計を中心にこの種の調査・研究が行われた^{9),10)}。1980年代以降、アメリカにおいては、自然災害、人工物爆発といった外的事象を対象とした確率論的安全性の評価に関する研究も進められた⁹⁾。Ravindra¹¹⁾は原子力発電所の地震に対する確率論的リスク評価 (PRA) に関する最近の研究をとりまとめており、Berg¹²⁾の研究でもリスク評価の例として原子力発電所に航空機が墜落する事例を取り上げている。一方、これらの原子力発電所を事例としたリスク評価の必要性・手法等は原子力発電所に限らず他の分野への適用も行われている¹³⁾。また、土木の分野においては、佐藤¹⁴⁾が、構造設計におけるリスクを用いた意思決定手法として期待総費用最小化原則を取り上げ、この原則を構成する諸要素について述べている。以上の研究においては、社会的な許容リスクと個別構造物の設計とを区分して理論構築したものは見あたらなかった。すなわち、これらの研究は個別構造物の設計に際し許容リスクの概念を導入してきたものである。

一方、Lind¹⁵⁾は、社会指標の Human Development Indicator (HDI) および Life Product Index (LPI) を用いた社会の許容リスクの設定について考察している。Breugel¹⁶⁾は、許容リスクの視点を個人から社会に移すべきであるとし、その上で社会への影響が“認可”され得るかどうかは、大災害の発生確率によらずその被害から判断されるべきであるとしている。小林・秀島¹⁷⁾は、災害リスクの管理目標として①期待被害額の最小化、②個人が直面するリスクの個人間での公平化、③カストロフの回避（生起する被害額の最小化）を挙げ、これらの組み合わせによる許容リスクの設定について考察している。これらの研究は、社会の許容リスクと個別構造物の設計を分けて考えているが、社会の許容リスクの具体的な設定方法は示されていない。

b) 被害の評価尺度に関する研究

従来からの自然災害による社会の被害の評価尺度としては、損害額が用いられることが多い^{14), 18)-21)}。これは、被害規模の定量的把握の方法として金銭による評価は、比較的容易でかつ有効な指標の一つではあることを示していると考えられる。

その他の指標としては、前述のLind¹⁵⁾が、社会指標 (HDI, LPI) を使用している。松村・清家²²⁾は、地震被害の新聞紙面での割合で評価している。しかし、これらのインパクトを死者数と建築物全壊数で再評価し直しており、結局死者数・建築物全壊数を最終的な指標と捉えていると見ることが出来る。前述のBreugel¹⁶⁾は、代表的な被害の評価尺度として金

銭的損失と死亡者数をあげている。河田²³⁾は、都市や地域の防災力はそこで発生し得る犠牲者数から評価することが出来るとしている。中村・宮地²⁴⁾は、経済社会的損害、地域社会における損害等をも個人の損害に帰結させ、包括的に取り扱う指標を提案している。

以上のように、既往の研究では、被害の評価尺度として金銭を中心としつつ、社会指標や死亡者数による研究も見られる。この中で、一つの評価尺度ではなく全体を包括した指標の開発を試みている中村・宮地²⁴⁾の研究は注目されるが、包括的であるがために実際の被害と直接結びつけることが難しいと考えられ、実際への適用に際し困難を伴うことが予想される。

(2) 評価尺度としての死亡者数

本論文においては、以上の既往の研究を踏まえ、各種自然災害による社会の被害の評価尺度としては、人命の損失を採用する。自然災害が社会に与える被害は単純ではなく、兵庫県南部地震災害における例を見ても、構造物の倒壊、液状化といった現象から、地域コミュニティの崩壊、被災者の心の傷といったものまである。理想としては、これら全てを包含し、個人的な価値観や経済社会的状況に左右されない評価尺度が望ましいものの、実際にはそのような指標の設定は現時点では困難と考えられるからである。そこで、逆に、一つの評価尺度において被害の代表値とさせたものである。

一つの評価尺度において、出来る限り広い被害を数え上げるために、人命の損失や被災者の心理的苦痛、教育や医療の途絶等を金銭換算し、他の金銭算定が可能な経済的損害等を含め可能な限りの被害をも包含する方法がある。被害の評価方法として非常に有効ではあると思われるが、一方、土木学会「第二次提言」の解説²⁾において、“人的被害を金銭に換算することは社会的にはなかなか受け入れられない。(中略)これを阪神・淡路大震災に適用すると(人的被害は)6,000億円程度であり、経済被害(10兆~15兆円)と比較していかにも少ない”とされているように、金銭を被害の評価指標とすることには、一定の困難さを伴うことも事実である。これに対し、死亡者数を評価尺度に据えることにより、被害の根本的な項目のひとつについて考慮できることに加え、時代の経過に対して記録に残りやすいデータを用いることが出来る。例えば、歴史地震の被害についてまとめた文献²⁵⁾や近代の自然災害の被害全般についてまとめた文献²⁶⁾では、死亡者数と負傷者数や家屋倒壊数等がまとめられているが、

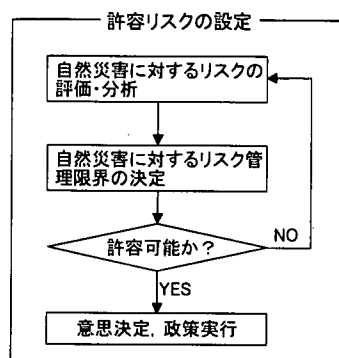


図-1 許容リスクの設定のフローチャート

時代の経過に対して敏感と考えられる金銭的被害についてはデータが蓄積されていない。死亡者数が、被害の評価尺度として、根本的でありかつその具体的評価においてほとんど判断の差のない尺度であることを示しているものと考えられる。

以上のように、評価尺度については例えば金銭と死亡者数において、それぞれ利点と欠点が存在する。本来許容リスクを論じる場合には、代表的な評価尺度を取りあげて、それぞれによる結果を比較検討すべきであろう。さらには、許容リスク設定のための指標の開発も必要である。しかし、本論文では、許容リスクについて論ずる一つの見方として、死亡者数を用いることとしたものである。

(3) 許容リスクの設定についての本論文の考え方

ここで、まず許容リスクの設定についての本論文の基本的な考え方を述べる。許容リスクの設定は、リスクの評価・分析と、リスク管理の設定に分けられる²⁾。まず、どのような指標において災害のリスクを評価するのかの決定を行い、その指標でのリスクの評価・分析を行う。次に、評価されたリスクに対して、これをコントロールする範囲をどこまでと設定するのか、すなわち被害が生じてもやむを得ないと許容される範囲と、許容されない範囲との境界線をどこに引くのか、についての決定を行う。この決定が許容せざるを得ないものとして、国民のコンセンサスを得ることが出来た場合、意思決定がなされ、これに基づいて政策が実行される。コンセンサスを得ることが出来なかった場合、リスク評価の指標、管理限界について、新たな決定が必要である。

(4) 国土レベルでの許容リスクと個別の社会施設の保持すべき性能との関係

兵庫県南部地震の発生までは、既往の研究^{29)~34)}に見られるように、リスクの評価を直接個別の社会施設

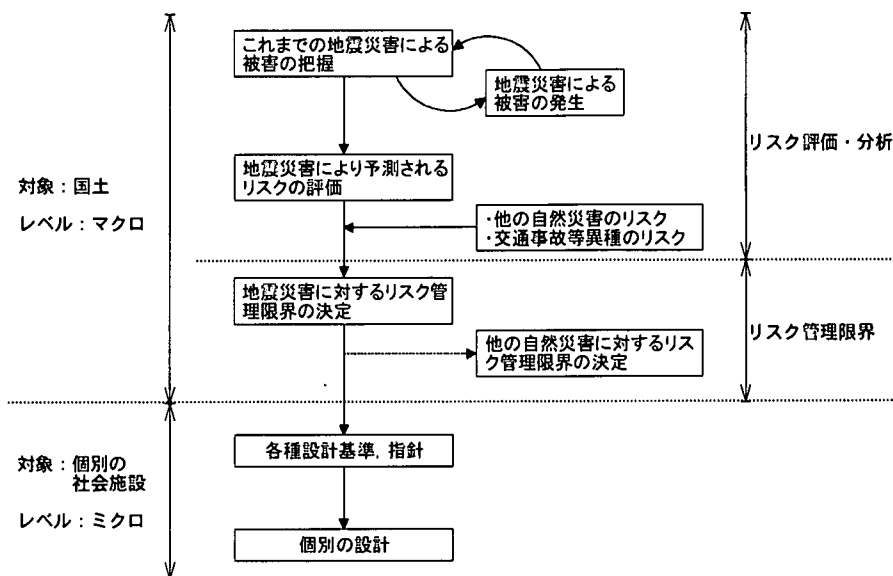


図-2 本研究における許容リスクの設定から個別の社会施設の設計への流れ

設の性能の決定（設計）に結びつける考え方が中心であった。しかし、個別の社会施設がどのような強度の地震動や降雨強度に対しても無損傷であることはあり得ないため、構造物が損傷する可能性を前提にして、これを取り巻く社会全体の安全性を考える必要がある。

また、社会施設は、個々の構造物が単体で機能するのではなく、系として機能を発揮する。具体的には、道路橋やトンネルは道路ネットワークの中であって、全体として車両の通行を可能にすることによりその機能を果たす。鉄道駅も鉄道が路線として機能しなければ意味がない。空港や港湾も飛行・航行する相手方の港湾や空港があることはもちろんのこと、さらに市街地との陸路アクセスが無事であればその機能を果たさない。この点を考えると、個別の社会施設が保つべき性能の決定は、その機能が必要とされる社会全体の安全性との関係の上にあるべきものである。

この社会の安全性を考える上で、一番大きな単位は国土である。この考え方は、新しい全国総合開発計画²⁷⁾において減災対策について述べられていることや、「第二次提言」の解説²⁸⁾において、防災投資は社会的選択の問題であり、「国防のように国のあり方自体を左右するような問題は単なる投資効果ではなく、「国の安全性に関するリスク」をどのように評価するのかの問題」であるとされていることに一致している。

以上を考慮すると、国土としての許容リスクについて図-1の手順に従い意思決定がなされ、その意思

決定に基づいて個別の社会施設の性能の決定（設計）がなされるとの流れが考えられる。この流れについて、地震災害を中心にもう少し詳しくまとめたものが図-2である。まず、国土を対象としたマクロレベルにおいて、これまでの地震災害による被害の把握から、今後予測される地震災害によるリスクを評価する。その後、他の自然災害の被害や交通事故のリスクについても評価を行う。このリスク評価・分析の結果を踏まえ、地震災害によるリスク管理境界が決定される。この管理境界とは、全ての規模の地震災害のリスクをコントロールすることは物理的にも経済的にも不可能であるために設定する、コントロールを考える地震災害の限界規模である。地震災害に対して決定されたリスク管理境界は、他の自然災害に対するリスクの管理境界としても使用が検討されるべきものである。さらに、このリスク管理境界を基に、個別の社会施設を対象とした設計規定（具体的には、設計基準、指針等）やその設計といったミクロのレベルへの決定がなされていく。

この許容リスクの設定に係る考え方は一つの案に過ぎない。許容リスクの設定は、意思決定にかかる問題であり、唯一無二の解が想定される問題ではない。そのため、その考え方、方法論等には様々な形式があり得る。本論文は、一つの形を提示することにより、その論点を明らかにし、次なる議論を導くことを目的としている。このような議論を経た、様々な対案の中から、最良と考えられるものを国民のコンセンサスを得ることによって選択していくべきである。

表-1 兵庫県南部地震以前の地震による死亡者数

	総死亡者数	年平均死亡者数
昭和後半以降 (1960-94)	255	7.3
昭和時代以降 (1926-94)	11,674	169.2
関東大震災以降 (1923-94)	154,928	2,151.8

注). 各地震の死亡者数は文献26)による。(単位は人)

本論文の考え方について、まず、マクロレベルとミクロレベルを分離してしまうことについて、災害の地域性を無視することになる、との批判が考えられる。この災害の地域性については、本論文においては、国土全般の安全性について考えるため、リスク評価の簡易化として地域性等災害特性の細部についての考慮を省略している。これに対し、災害の地域性を考慮したリスクの評価方法を開発し、これを許容リスクの設定に用いる方法も考えられる。

また、他の自然災害や交通事故等のリスクの評価を、地震災害リスクの管理限界の設定に用いる必然性が見あたらない、との批判も想定される。しかし、地震災害のリスク管理の限界値を地震災害リスクの評価・分析のみにおいて決定することは困難と考えられる。この管理限界値の設定のためには、地震災害リスクとは異なった分野における数値、価値判断等を導入する必要がある。本論文では同じくリスクを取り扱う分野には、評価や判断に共通点が見出せるものと考えたため、限界値設定の判断材料に適用したものである。これに対しても、あくまで地震災害のリスクの分析・評価において限界値を設定すべきであるとの考え方も否定できるものではなく、また、もっと異なった分野の数値、価値判断等の適用を検討すべきとの考え方もあり得る。

以降では、まず国土における許容リスクについて述べ、さらに国土のマクロレベルと個別の社会施設のミクロのレベルの関連について考察する。

3. 死亡者数を指標とした地震災害の発生規模構造の把握

ー兵庫県南部地震の災害としての評価

これまで地震災害が国土に及ぼしてきた被害について、その発生規模構造を把握し、今後予測されるリスクの評価・分析を行う。

(1) 兵庫県南部地震以前の地震災害の概況

我が国における兵庫県南部地震以前までの地震に

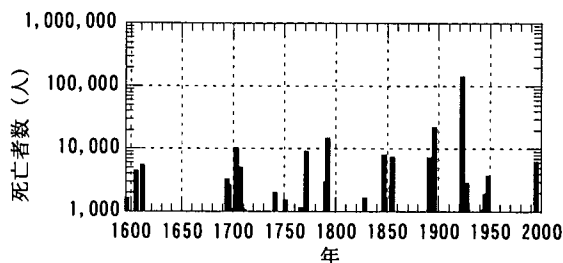


図-3 1596-1995年における大規模地震災害

による総死亡者数、年平均死亡者数は表-1のとおりである。

昭和時代を災害対策基本法が制定された昭和35年(1960年)以降とそれ以前とに分け、その昭和後半以降、昭和時代以降および関東大震災(大正12年:1923年)以降において、地震災害によりどれだけの死亡者数が出たかを見ると、関東大震災を含めると大きく死亡者数が増えることはもちろんであるが、昭和の後半以降と昭和時代以降とでも、総死亡者数による死亡者数・年平均死亡者数共に二桁違っている。昭和後半から兵庫県南部地震発生まで、非常に地震災害による死亡者数が少なかったことが分かる。これは、耐震研究により社会としての耐地震力が増加したこともあるが、大きな被害を及ぼす規模の地震がたまたま大都市圏を襲わなかったと見ることができる²⁶⁾。また、その意味で、短期間の地震被害から社会が被ってきた地震被害を評価することに危険性を示しているとも言える。

昭和時代には全ての地震に対し死亡者数が特定されていた。一方、それ以前については時代が古くなればなるほど被害データの精度が低下する。それを承知の上で、もっと長期間に大きな被害をもたらした地震がどのような周期で発生したのかを見てみることにする。

図-3は、1596年以降400年間での死亡者数1,000人以上の地震災害の発生を、文献25)での死亡者数データを基に集計したものである。16世紀以降は徳川幕府の存在により、ある程度日本全土で地震災害が把握されたと考えられるため、ちょうど400年で考えた。

この図によれば、死亡者数の多い地震災害はそれほど等間隔には発生しておらず、特に1612年~1693年の82年間発生していない。地震データの精度が低いとはいえ、その後の1694年~1711年の18年間に6つの大きな地震災害が発生していることと非常に対照的である。この期間においても、地震災害の発生はそれほど規則的ではなく、斑があることが読みとれる。死亡者数を評価尺度として地震災害の発生規

模を考える場合、この班に影響されにくい評価方法を考える必要がある。

(2) 自然災害の発生規模構造に関する既往の研究

地震災害を含め、自然災害の発生規模構造、すなわちどれほどの頻度で自然災害が発生するののかの把握については、地震動強さ、風速等の物理的な規模と再現期間（発生確率）の関係を定量化する研究として盛んに行われてきた^{28)・35)}。しかし、これらの研究は、いずれも外力の再現期間を評価したものであり、災害としては捉えていない。

Hanayasu・Tang³⁶⁾は労働災害の災害規模の解析手法を地震・津波および台風・風水害に適用している。この研究は、災害としての規模を取り扱っているが、その目的は、災害構造の変化の有無の判定にあり、本論文と異なっている。

(3) 地震災害の発生規模構造の把握

我が国国土での地震災害の発生規模構造を、地震災害による死亡者数と再現期間の関係として定量化する。具体的には、地震災害による死亡者数を極値統計として解析する。この極値統計を地震災害による死亡者数に適用するためには、データの独立性と等質性が要求される³⁷⁾。これらの二つについて以下に検討する。

①独立性：ある地震災害の発生と、他の地震災害の発生との間に相関関係がないことである。このことは、地震の発生が互いに独立に発生していると仮定できるため（ただし、前震や余震の取り扱いには注意を要する）、地震災害についても確保されている。

②等質性：地震災害による死亡者の発生を、同一の母集団から抽出されたデータとして取り扱うことができるとの仮定である。厳密に言えば、この仮定は成立しない。なぜなら、社会は時間と共に変化しており、同一ではあり得ないからである。しかし、昭和時代以降についてみると、兵庫県南部地震発生までの耐震設計は、基本的に関東大地震を最大の想定地震とし続けてきており、設計水平震度もほとんど変化がない。もちろん、構造物の実際の耐震性は向上してきているが、一方過密都市が国土の各所に形成され、地震災害に対して脆弱な地域も増えてきている。このような点を考えると、例えば昭和時代～兵庫県南部地震の期間についてみれば、国土全体の地震災害に対する特性は、ある程度同一のレベルにあったとして取り扱うことができるものと仮定した。

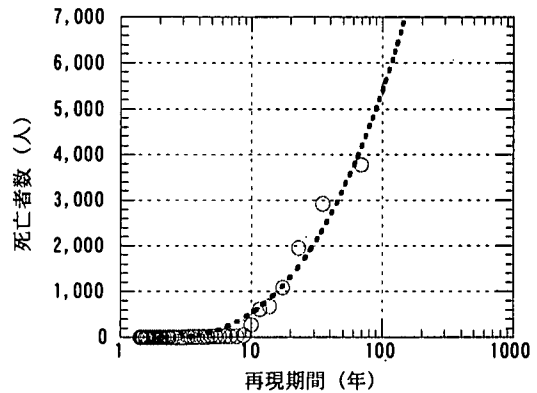


図-4 1926-1994年における地震災害データに基づく死亡者数と再現期間

以上のように、等質性に問題はあるものの、地震災害を極値統計として取り扱うことは可能であると仮定した。そこで、極値統計のデータ期間を、昭和時代以降兵庫県南部地震発生直前の1994年までの69年間及び兵庫県南部地震被害の影響を考慮するために発生直後までの70年間とした。

69年間及び70年間の地震災害データに対し、ワイブル分布を当てはめた。分布形にワイブル分布を採用したのは、ワイブル分布は地震などの極値データの定量化に適しているのに加え、形状母数 k の値を変えることにより様々な分布形状を表現できる³⁷⁾からである。すなわち、形状母数 k は、基準化変量に対する地震災害の年平均発生確率の確率密度を、全体面積を1の下で決定する。そして、決定された基準化変量による推定値と実データの相関係数を最大にする形状母数 k を選択した。また、あてはめたワイブル分布を、観測データ数とデータ期間から算定される再現期間に対してプロットした。

図-4は、69年間のデータによる死亡者数と再現期間の関係である。回帰分析により選択された分布は、形状母数 $k=0.336$ のワイブル分布であり、相関係数 $R=0.997$ であった（図中の点線）。同様に70年間の地震災害データに対するワイブル分布のあてはめ結果は、形状母数 $k=0.317$ 、相関係数 $R=0.990$ であった（図-5）。図-4と図-5を比較すると、再現期間が10年程度まではほとんど差がないが、最大地震災害のデータが大きく違うため、再現期間が大きくなるほど死亡者数に差が出ている。例えば、再現期間50年では、兵庫県南部地震直前までは死亡者数3,171人に対し直後データでは4,913人と1.55倍、再現期間100年では5,399人に対し8,618人で1.60倍、再現期間200年では8,443人に対し13,868人で1.64倍となっている。これにより、非常に大きな地震災害が

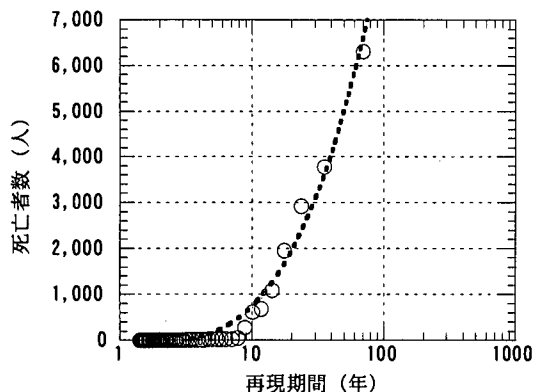


図-5 1926-1995年における地震災害データに基づく
死亡者数と再現期間

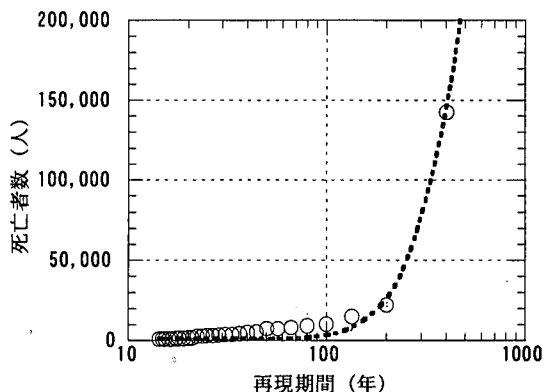


図-6 1595-1994年における地震災害データに基づく
死亡者数と再現期間

発生した場合、社会が被ってきた被害の定量的評価が変化することが分かる。

次に、1595-1994年の400年間での地震災害の発生規模構造を把握する。この場合、データの等質性に非常に問題があるが、大規模な地震の再現期間を考えるとなるべく期間を長く取る方が望ましいため、等質性が確保されていないことを認識した上で敢えて算定した。死亡者数データは、歴史資料のデータ精度を鑑み、1,000人以上のデータのみ採用し、ワイブル分布の当てはめにおいては下限値を1,000人とした。図-6は、400年間のデータによる災害規模に対する再現期間の回帰分析の結果である。形状母数 $k=0.127$ と非常にすそ野の広い分布形が最適と判断された。相関係数は $R=0.995$ であった。ここでは、関東大地震による被害が飛び抜けていることが改めて認識される。なお、50年、100年および200年の再現期間に対する死亡者数はそれぞれ1,058人、2,849人および21,370人であり、再現期間200年間の死亡者数の多さが際だっている。

以上の手法により、国土が被ってきた地震災害を、死亡者数との指標において、その規模に応じて評価することが出来る。この評価は、災害規模を考慮することが出来ない年平均死亡者数による評価方法に比べて利点があるのに加え、斑のある地震災害の規模を捉える一つの有効な方法である。ただし、この際データの等質性についての考慮が必要である。

(4) 兵庫県南部地震災害の災害規模の評価

兵庫県南部地震の起震断層の活動周期は、1,000年のオーダーであるとされている^{32), 38)}。しかし、これまで、兵庫県南部地震災害が災害としてどの程度の規模であると考えられるのか、との評価は見あたらない。そこで、(3)において定量化された、我が国

国土における地震災害の発生規模構造から、兵庫県南部地震災害が、災害として国土においてどの程度の期間に一度発生する規模であるのかを算定する。この際、兵庫県南部地震災害の再現期間であるから、この災害発生寸前を評価点とする。

まず、図-4に示した短期間の1926-1994年の地震災害データにより評価を行った。この形状係数 $k=0.336$ のワイブル分布において、死亡者数6,308人の再現期間は128年と算定された。ただし、この期間においては福井地震（1948年）による3,769人が死亡者数の最大値となっているため、兵庫県南部地震災害の災害規模の定量化においては、回帰曲線を外挿していることになる。

次に、図-6に示した長期間の1595-1994年の地震災害データを基に評価を行った。長期間の地震災害データに対する回帰曲線は、ワイブル分布が最大値に大きく影響を受けるため、飛び抜けて大きい関東大地震災害が曲線形状を強く決定づけていると考えられる。そのため、再現期間が100年の近辺では実データと回帰曲線とに乖離が見られる。しかし、相関係数は0.99を超えており、回帰分析としての評価上それほど乖離しているとは言えない。この回帰曲線を基にすると兵庫県南部地震災害の再現期間は、132年となった。ただし、この結果は等質性が全く確保されていない地震災害データに基づくものである。

歴史地震被害による兵庫県南部地震被害の再現期間の算定を2つの期間で行ったが、いずれの結果も100年強であった。この地震被害が規模としてどれほど大きいのか、社会として許容できるレベルなのか、については、地震災害にかかる評価のみにおいて判断することは困難であると考えられる。この点を踏まえ、4. では、他の自然災害のリスクについ

て同様の評価・分析を行う。

4. 地震以外の災害の発生規模構造の把握

社会が被る自然災害は地震災害だけではない。許容リスクについての検討を行うため、この地震災害以外の種類の自然災害の我が国国土における発生規模構造を把握する。

(1) 検討する自然災害の選定

我が国の国土は様々な自然災害の被害を被っている。文献26)を参考に、この自然災害の分類を試みる。

① 地震および火山災害

- ・ 地震
- ・ 津波：地震により引き起こされるが、地震による直接的な被害がほとんどない場合でも、津波災害としては非常に大きい場合がある（例えば、1896年の三陸大津波）。
- ・ 火山：局地的災害である場合が多く、他の災害と比較して災害規模はそれほど大きくない。

② 気象災害

- ・ 洪水：集中豪雨および台風によりもたらされる。日本の河川の流路が短く急勾配であるため、古くから大きな自然災害の一つであった。
- ・ 雪害：鉄道・道路交通等に大きな影響を及ぼす場合があるが、人命に関わる場合は他の災害と比較して少ない。
- ・ 冷害凶作：直接的に人命に関わる場合はほとんどない。
- ・ 干害：直接的に人命に関わる場合はほとんどない。

以上の分類を基にすると、わが国の社会に対し大きな被害をもたらしている災害で地震災害と比類できるものは、津波災害と洪水災害であると考えられる。したがって、本論文では、津波災害と洪水災害を取り上げることとする。なお、土砂災害は、地震や豪雨に起因する場合が多く、それぞれの災害に含まれている。各災害における死亡者数は文献26)によった。

(2) 津波災害の発生規模構造の把握

地震災害において用いた期間のうち短期間に当たる昭和時代以降（1926-1995年）の津波災害について、死亡者数と再現期間の関係を調べた。その結果が図-7である。回帰分析の結果、形状母数 $k=0.259$ のワイブル分布で、相関係数 $R=0.991$ であった。一

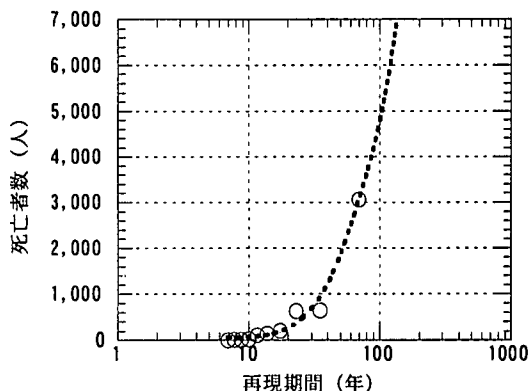


図-7 1926-1995年における津波災害データに基づく死亡者数と再現期間

番大きな災害データは、1932年の昭和三陸地震津波による災害であり、地震規模は $M=8.1$ と大きかったものの、地震動による直接的な人的被害はほとんどなかった²⁶⁾。

昭和時代以降の津波災害のデータが極値統計として解析可能であるかどうかの検証であるが、独立性は確保されている。一方、等質性については、厳密には確保されていない。その中で、史上最大の津波災害である明治三陸大津波が1896年に発生し、死亡者数2万人を超え、最大波高は綾里湾奥で38.2 (m)に達している²⁶⁾。津波災害への対策は、過去の津波被害を考慮する形で行われてきており（例えば、「港湾構造物設計基準」（1967年）³⁹⁾・「港湾の施設の技術上の基準・同解説 昭和54年3月及び平成元年2月」（1979年及び1989年）⁴⁰⁾、⁴¹⁾においては、一貫して“設計に用いる津波の諸元は、その地点における既往の津波記録から定めるものとする”とされている）。明治三陸大津波はその最大の対象であり続けてきたと考えられる。もちろん、津波防波堤の整備や津波警報システムの確立等津波災害への対策は進んできている一方、臨海部地域の活用が促進され被災可能性のある地域の人口が増加してきており、また、南海地震（1946年）、日本海中部地震（1983年）、北海道南西沖地震（1993年）において警報の発令より津波の来襲の方が早い事例も見られ²⁶⁾、このような点を考慮し、昭和時代以降は国土全体の津波災害に対する特性も、地震災害同様、ある程度同レベルにあったものと仮定した。

(3) 洪水災害の発生規模構造の把握

洪水災害についても、1926-1995年の70年間にについて災害規模と再現期間の関係を調べた。その結果、形状母数 $k=0.367$ のワイブル分布が選択され、相関

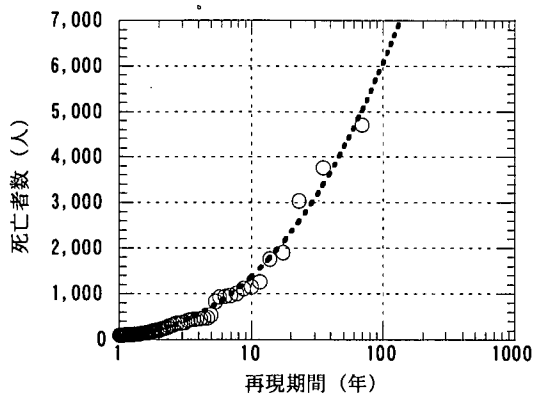


図-8 1926-1995年における洪水災害データに基づく
死亡者数と再現期間

係数 $R=0.993$ であった（図-8参照）。洪水災害は非常に件数が多く、70年間に死亡者が確認された災害は実に151件に及んでいる。

この極値統計データとして取り扱うための特性であるが、独立性は確保されている。等質性は、厳密には確保されない。この点については、明治20年代以降に河川堤防の整備が始まって⁴²⁾以来、洪水災害に対する安全性の確保が図られてきているが、昭和33年～51年までの「河川砂防技術基準（案）」が降雨強度で最大100年間の再現期間、51年以降では最大200年以上まで考慮すべき⁴³⁾としているのに対し、実際には現時点（1998年）における当面の目標として、最大40年の降雨強度⁴⁴⁾とされている。すなわち、「河川砂防技術基準（案）同解説 計画編」（1997年）⁴⁵⁾の整備目標の達成には遠い状態であり、さらに、昭和30年代以降では都市近郊における宅地開発の進展や道路建設等による山肌の抵抗力の低下、土地の保水力の低下²⁹⁾により土砂災害が併発するようになってきている。以上の点を考慮し、国土の洪水災害に対する特性も昭和時代以降ではある程度同レベルにあったものと仮定した。

5. リスク管理限界の設定についての検討

本章では、これまでの地震災害、津波災害及び洪水災害の発生規模構造の把握やその他の材料を基に、許容リスクについて、リスク管理限界を設定する手法の検討を行う。前述したように、許容リスクは、社会の意思を決定する問題であり、一つの論理的解が求まる問題ではないと考えられる。したがって、ここで述べる方法やその考え方も意思決定のための判断材料を示しているに過ぎない。

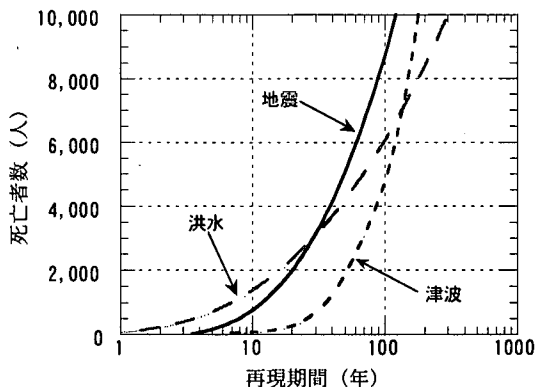


図-9 各災害のリスクの相対比較

なお、許容リスクの設定について、地震の起震断層の再現周期が数百年～数千年以上であるのに対し、これをたかが数十年の地震災害データにより検討することが可能なのか、との疑問が考えられる。地震の発生や断層の挙動は、純粋な自然現象として捉えることが出来るが、地震災害の発生・規模は、地震が発生したとの条件の下どれほどの人々がどのような状況で地震影響範囲に居るのか、との社会的な現象である。本論文は、地震災害としての特性の把握とその観点からの許容リスクの設定を試みているものであるため、社会現象としての側面から、データの等質性を考慮し、地震災害データ数十年において検討を行うものである。

(1) 自然災害のリスクの相対比較

3. 及び4. では自然災害の発生規模構造を評価した。これらは、過去において生じた被害であるが、同時に、国土に居住する構成員が認知している災害のリスク、すなわち将来発生し得る自然災害の被害の可能性に対する認識であると考えられる。そこで、これらを相対比較することにより、リスク管理限界を検討するための材料とする。

図-9は、それぞれの災害のリスクを、同一座標系に示したものである（昭和時代以降：1926-95年データを使用）。注意を要するのは、これらのリスクの評価において、災害データの等質性は厳密には確保されておらず、さらにその確保されていない度合いも災害の種別に対して一定ではないため、相互の比較にはある程度の誤差が含まれ得ることである。

まず、再現期間が短い範囲においては、洪水の災害規模が一番大きいことが分かる。これは前述したように洪水の発生件数が非常に多く、毎年死亡者が出ているためである。一方、再現期間が長くなると、洪水に代わり地震の災害規模が大きくなっている。

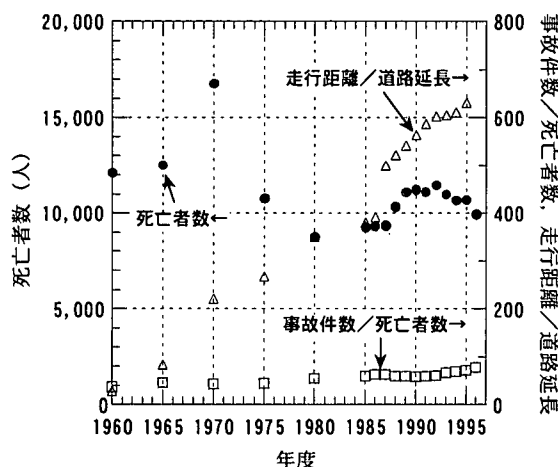


図-10 交通事故死亡者数と関連する交通状況
(データは、文献47)、48より)

この規模においては、地震災害が大きなリスクとなっていることが定量的に示されている。津波災害は非常に数が少ないものの再現期間100年以上においては、洪水の死亡者数を超えている。

この評価は、死亡者数を観点とした一元的なものであり、これをもって直ちに、例えば地震災害は洪水災害よりリスクが大きいなどといった評価は到底出来るものではない。しかし、このような評価を行うことにより、地震災害以外のリスクに関する数値・価値判断を、地震災害に対するリスク管理限界を設定するための判断材料と考えることが可能となるものである。

(2) 能動的リスクの評価

自然災害は、災害発生要因が自然作用である。この発生要因を除去したり、消滅させたりすることは極めて困難であるため⁴⁰⁾、その対策は専ら受動的な防衛対策となる受動的リスクである。一方、交通事故や火災は、発生要因が人為的であるため、ある程度個人の行動もしくは判断でそのリスクをコントロールできる能動的リスクである。この受動的リスクと能動的リスクに対しては、その発生要因の相違により、リスク管理目標にも差があるものと考えられる。この点を認識しつつ、能動的リスクの実態を地震災害に対するリスク管理限界を検討するための材料とする。

図-10は、1960年からの交通事故死亡者数と、その死亡者数に関連する死亡者数1人当たりの事故件数、道路延長当たりの自動車走行距離のデータである。死亡者数1人当たりの事故件数は単調に増加してきており、このことは交通事故1回当たりの死亡者発

生確率が減少してきていることを示している。自動車の衝突安全性の向上等がその要因であると推測される。一方、道路延長当たりの自動車走行距離は、いわば道路上の自動車密度を見たものであるが、単調に増加してきている。このことは、自動車密度が高いと交通事故が起きやすいと考えれば、交通事故の発生確率が上昇してきていることとなる。以上を考慮すると、交通事故死亡者数は1980年代末程度からほぼ一定に見えるが、その背後にある交通状況は変化し続けており、死亡者数データの等質性は確保されていない。そのため、交通事故死亡者数から自然災害に対するリスク管理限界を考える場合には、その死亡者数の時点を、そのリスク管理限界の判断時点に合わせるのが最良の方法であろう。

(3) アンケート調査結果

許容リスクについての様々な方々の認識を許容リスク設定のための判断材料とする方法も考えられる。日本建築学会荷重運営委員会の設計荷重理論小委員会は、実際に設計に従事している技術者に対し、リスク管理限界に関連するアンケート調査を実施している⁴¹⁾。その中に、通常の建築物に対する設計用地震荷重の再現期間としてどの程度が妥当であると思うか？との設問があり、最も多い回答が50年で全体の36%、その次が100年で32%となっている。このアンケートが実施されたのは兵庫県南部地震発生以前であり、低頻度巨大災害の議論がなされる以前である点を考慮しておく必要があるが、設計者の技術的な経験と知識によるリスク評価は、地震災害に対するリスク管理限界を検討する上での判断材料の一つと考えられる。

(4) リスク管理限界の設定の考え方

本章では、これまでリスク管理限界の検討のための判断材料について述べてきた。ここでは、これらを用いたリスク管理の限界範囲の設定方法について述べる。

自然災害のリスク管理について、リスクの低減を図る限界規模は、自然災害の災害規模発生構造、すなわち災害リスクに対し、以下のどちらかに着目することによって設定することができる。

①災害規模(死亡者数)

②災害規模の再現期間

これらは、図-4～図-9で示した災害規模(死亡者数)－再現期間の座標軸において、縦軸に着目するか(①)、横軸に着目するか(②)の相違である。

まず、(1)で述べた異なった種別の自然災害のリスクの相对比较から、リスク管理限界の設定を試み

表-2 河川の重要度と洪水防御計画の計画規模

重要度	計画規模	備考
A級	200年以上	大都市近郊の一級河川
B級	100～200年	一級河川の主要区間
C級	50～100年	都市の中小河川
D級	10～50年	一般河川
E級	10年以下	一般河川

計画規模：計画降雨の超過確率年（再現期間）

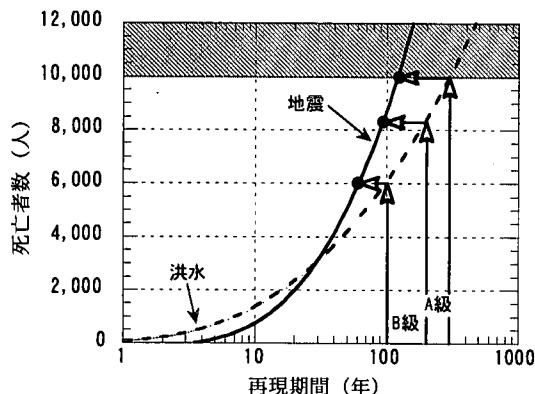


図-11 洪水防御計画によるリスク管理限界の設定

る。河川堤防の設計基準である「河川砂防技術基準（案）同解説 計画編」（1997年）⁴⁵⁾では、洪水防御計画として河川堤防の設計上考慮すべき洪水の規模を計画降雨の再現期間によって表-2の様に設定している。この河川の重要度については、“河川の大きさ、その対象となる地域の社会経済的重要性、想定される被害の量質および過去の災害履歴などの要素を考慮して定める”とされているが、具体的にどのような条件であればA級なのかとの設定は見られない。なお、前述したとおり、この洪水防御の計画規模は目標であって、現状の整備レベルとは差がある。

この計画規模の目標を、地震災害に対するリスク管理限界の設定のための判断材料と考える。B級及びA級の区切りである再現期間100年、200年及び300年（A級200年以上については、便宜的に300年と仮置きした）に対する洪水災害の災害規模を求める。そして、この災害規模に対応する地震災害がリスク管理の限界値となる。この考え方を模式化したのが図-11である。図中の●とハッチが限界値を示している（ハッチは300年に対して図示した）。この方法は、洪水防御計画と洪水災害の災害規模発生構造を基に、災害規模からリスク管理限界を設定しているものであり、前述の①の方法に当たる。ここで注意が必要なのは、洪水防御計画は個別構造物の設計規定であって、洪水災害に対するリスク管理限界そのものではない、との点である。洪水災害に対して、

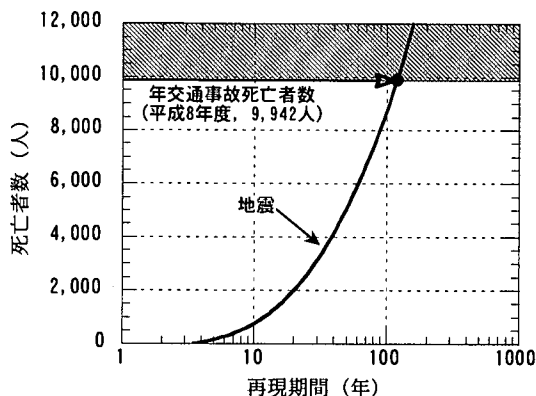


図-12 交通事故死者数によるリスク管理限界の設定

意思決定過程を経たりリスク管理限界が設定されていれば、これを基にする方法が考えられるが、洪水災害・津波災害いずれに対してもそのような設定はなされていないため、対象レベル（マクロ・ミクロ：2. (3)参照）が異なっていること、さらには2. (4)で述べたとおり、洪水防御計画を判断材料とすることに必然性はないことを認識した上で、この方法について述べた。

次に、能動的リスクの例として、交通事故による死亡者数を基にした、地震災害に対するリスク管理限界の設定を考える。前述の通り、交通事故による死亡者数を取り巻く状況は変化し続けているため、最新のデータである平成8年度の死亡者数（9,942人）を用いる。この死亡者数を、地震災害の規模についてのリスク管理限界としたのが、図-12である。この際、能動的リスクと受動的リスクの差を考慮し、何等かの修整を行うべきであるが、ここでは便宜上そのまま用いている。この方法も、災害規模からリスク管理限界を設定する①の方法である。

さらに、アンケート調査結果に意味を見出し、地震災害のリスク管理限界の設定を試みる。前述の設計技術者に対するアンケートでは、設計用地震荷重の再現期間としての最頻値は50年であった。これを、地震荷重ではなく地震災害規模の再現期間と置き換えると、この値によるリスク管理限界の設定は、図-13ようになる。この方法は、災害規模の再現期間からリスク管理限界を設定する②の方法である。

設計技術者にとっては、地震荷重の再現期間と本論文で示している地震災害規模の再現期間とに対する理解の差はそれほど大きくないと考えられるが、一般には地震荷重○○○galより地震災害規模□□□人の方が理解が容易である。許容リスクに係るリスク管理限界の設定は、最終的には国民レベルにおいて理解を求め、その意思を決定すべきであることを

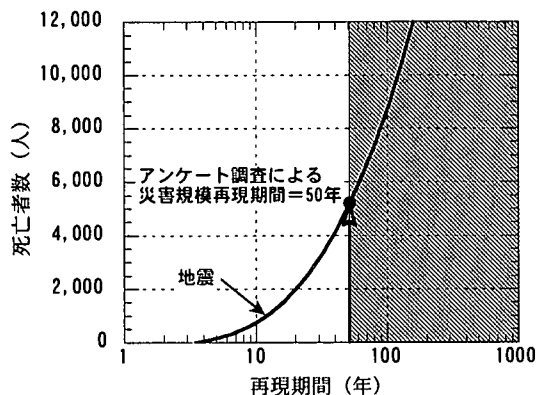


図-13 アンケート調査結果によるリスク管理境界の設定

考えると、この点においても本論文の死者数による災害規模は一つの有用な指標になり得るものと考えられる。

以上が、許容リスクに係るリスク管理境界の設定方法の例である。これらの方法は死者数との指標を用いた一つの例に過ぎない。さらに、どの方法も、許容リスクの設定過程として、国土レベルにおいて検討すべきものを、個別の設計規定から準用するなど、十分な背景を持っているものとは言い難い。この部分については、今後の検討課題としたい。

学会等において、様々な指標と、その指標におけるリスク管理境界の設定方法の提示がなされ、それに基づいて、国家としての意思の決定がなされること……これが許容リスクの決定への道であると考えている。

6. 許容リスクの決定に基づくレベル2想定地震の規模要件

これまでの議論は、国土全体についてのマクロ的な視点での許容リスクの設定についてである。許容リスクが決定された場合、2. で述べたように、このマクロ的なリスクを現在の各種設計基準、指針等が規定するところの自然災害の物理的な強度（地震動強さ、降雨量等）であるマイクロレベルの設定へとつなげなければならない。

ここでは、地震災害について、マクロレベルでの許容リスクが決定されたとの仮定の下、具体的に、社会施設の耐震設計において、考慮すべきレベル2想定地震に係る規模要件を試算する。

(1) レベル2想定地震の設定に関する既往の研究

奥村ら⁵⁰⁾は、確率論的想定地震の概念を用いて低

頻度巨大外力すなわちレベル2地震動としての対象地震を選定する方法を提案している。長⁵¹⁾は、道路橋示方書⁴⁹⁾におけるレベル2地震動と性能保証の規定に内在する不確実性について言及し、さらに、設計地点における断層での地震発生 of 切迫度から、そもそもレベル2地震動を考慮した設計が必要であるかどうかを判断すべきであるとしている。しかし、これらの研究では、許容リスクとレベル2想定地震との関連性については触れられていない。

(2) マクロレベルの許容リスクからマイクロレベルの想定地震の規模要件への変換の考え方

マクロレベルの許容リスクをマイクロレベルへ変換するためには、変換条件が必要である。前述の小林・秀島の研究¹⁷⁾では、この条件として期待費用最小化、リスク公平化及びカストロフの回避を挙げている。このうち、期待費用最小化は、費用－便益分析につながり個別の社会施設の新規建設における見積もり手法としては良いかも知れないが⁵²⁾、個別の施設毎に安全性を差別化させる¹⁷⁾ことになり、社会施設の耐震設計規定には適切とは言い難い。また、カストロフの回避は、国土としてのリスク管理上重要な条件ではあるが、一方広く国土全体を考えた場合には、過疎地域での耐震設計の必要性が大変低く見積もられてしまうため、これも社会施設の耐震設計規定には妥当とは考えがたい。リスク公平化の条件についても、都市の規模に応じて確保すべき耐震性のレベルに差が生じることとなる。しかし、その差はカストロフの回避ほど大きいものにはならないため、国土全体に対するリスク管理の変換条件としては他の二つの条件に比べて妥当であると判断し、本論文ではリスク公平化の条件を用いることとした。具体的には、地震災害が発生したとの条件下において、各都市に居住する住民の死亡確率が等しくなるように、リスク管理境界をレベル2想定地震に要求される規模要件へと変換するものである。この際、地震の発生確率すなわち物理的再現期間は考慮しない。これは、地震を災害として扱っている本論文の特徴である。この考え方に依れば、都市近傍の活断層についても、その物理的再現期間に関係なく、その活断層において地震が発生した場合にどれほどの地震災害となるのか、のみを設計の想定地震とするかどうかの判断材料とすることとなる。これは、物理的再現期間が数千年以上にも及ぶ地震をくまなく設計対象とすべきなのかどうか、との低頻度巨大外力の議論^{38), 51), 52)}に対する一つの答えであると考えられる。

実際の変換ために、まずリスク管理境界の災害規

模から、国民一人当たりの死亡確率を導く。この死亡確率は、リスク公平化の条件により、特定の地震による被災都市住民の死亡確率と等しくなる。この条件から、当該都市において考慮すべきレベル2想定地震の限界規模が定まる。以上の算定手法を、(4)以降に示す。なお、地震災害に対するリスク管理限界は、ここでは例として洪水防御計画によるものを用いることとする。これは、5.(4)で述べたとおり、許容リスクは国民の合意の基に決定されるべきものであり、仮に置いたにすぎない。しかし、他のリスク管理限界であっても、同じ方法によってミクロレベルへ変換することが可能である。

(3) レベル2想定地震の考え方

具体的な算定を行う前に、レベル2想定地震についての本論文の考え方を述べておく。

土木学会「第二次提言」の解説³⁾においては、地上構造物のレベル2地震動に対する耐震性能として、“重要な構造物および早期復旧が必要な構造物は、(中略)構造物の最大の地震応答が許容される塑性変形もしくは極限耐力の限界を超えないものとする”“上記以外の構造物は、(中略)地震応答が終局の変形を超えないものとする”としている。これらは、レベル2地震動に対し、目標とする損傷状態に至らない確率を、必要なだけ確保するよう安全率を設定すべきことを規定しているものである。この点を考えると、レベル2想定地震とは、構造物の損傷のコントロールを照査する限界の地震動強度、と捉えることが出来る。つまり、これ以上の地震動に対しては、構造物が目標とする損傷状態(終局状態)に至る確率が相当程度存在してもやむを得ないということである。この考え方は、「第二次提言」解説³⁾の地中構造物や構造物基礎についての規定にも共通である。もちろん、設計においてどれだけの安全率を見込んでも、目標とする損傷状態に至る確率を0にすることは出来ない。この条件の下で、レベル2想定地震は、これをある一定値以下にすることを目標とする設計外力であると考えている。すなわち、レベル2想定地震とは、設計に用いるための地震動であって、地震動の上限値とは無関係である。なお、レベル2想定地震に対する耐震性能を満たすことにより、副次的にそれを超える地震動に対しての安全性も向上することは十分考えられるが、これはレベル2地震動に対する設計の目的ではない。そのような外力に対しては、レベル2想定地震に対する目標損傷状態を超えた範囲における構造物の挙動、例えば終局状態の発生形態を追従していく必要がある。

(4) 死亡確率の算定

洪水防御計画を基に、再現期間100年、200年および300年の洪水災害に対する国民一人当たりの死亡確率 P_{Dr} を算定する。算定式は以下の通りである。

$$P_{Dr} = \frac{ND_{Flood}(t)}{JTP} \quad (1)$$

ここに、 $ND_{Flood}(t)$: 再現期間 t 年間の洪水災害による死者数

JTP : 日本の総人口

式(1)より、 $P_{D100}=4.810 \times 10^{-5}$ 、 $P_{D200}=6.679 \times 10^{-5}$ および $P_{D300}=7.958 \times 10^{-5}$ と算定された。

(5) 地震による死者数の推定

特定の地震による被災都市での死者数を算定する。従来、地震による死者数を把握しようとする試みは、関東大地震を対象とする場合を中心に各機関により実施されてきた²⁾。例えば、東京都⁵⁾においては、直下地震に対する被害想定の中で、死亡原因毎に死者数を推定している。また、河田²⁾は、世界各国の災害による最大死亡確率を平均寿命により規定し、これに対象地域の人口、人口密度および都市災害増幅指数を導入して災害による死者数の定式化を行っている。

本論文では、日本の近年の地震災害のデータを用いて、以下の説明変数による死者数について、既往の研究より簡易な推定式を算定した。

- ・ マグニチュード
- ・ 断層面距離
- ・ 被災都市の総人口

上記説明変数のうち、マグニチュードと震央距離は、被災都市での地震動強度を表すものである。一方、被災都市の総人口は、都市の過密化・機能の多様化等により同じ地震動強度でも都市の規模が大きくなるほど死者数が多いと考えられるため導入した変数である。以上の考え方を基に、死者数 ND_{Earth} は、次式により回帰された。

$$ND_{Earth} = 10 \exp \{-14.29 + 2.172M - 0.4591 \log(\Delta) + 0.3801 \log(CTP)\} \quad (2)$$

ここに、 M : マグニチュード

Δ : 断層面距離 (km)

CTP : 被災都市の総人口 (人)

回帰分析に用いたデータは、関東大地震(東京、横浜)、北但馬地震(城崎)、北丹後地震(与謝、竹野、中)、鳥取地震(鳥取)、福井地震(福井)及び兵庫県南部地震(神戸、西宮、芦屋)である。これらは、我が国における関東大地震以降の大規模地震において、死者が100人以上発生した都市の

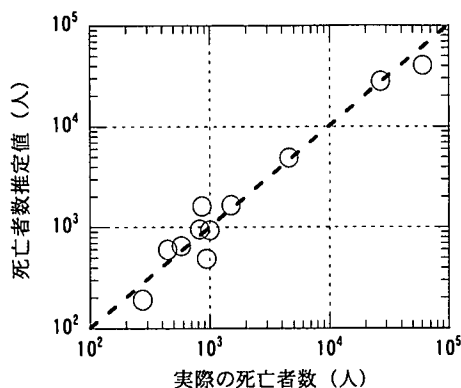


図-14 大規模地震による死者数の推定結果

ものである（死者数のデータは文献27）による。ただし、当時の人口が入手できなかった福井地震の足羽、吉田、坂井は除いてある）。また、断層面距離の算定は、文献54)に従い、断層面の諸元（傾斜角や深さ方向の広がり）が判明している場合には真の断層面距離を、判明していない場合には地表面に現れた断層線までの距離とした。各都市の位置座標については文献55)（市役所等の位置）に依った。

式(2)による推定値と実際の死者数の比較は図-14のとおりであり、相関係数は0.978と精度よく回帰された。なお、社会の等質性について考慮する場合、式(2)の算定においても昭和時代以降のデータで整理すべきである。しかし、上述のデータの内、関東大地震と北但馬地震を除くと、マグニチュードの範囲が7.1～7.3となり、その結果マグニチュードの偏回帰係数が有意性が無いものと判定されることとなった（ t 値による判定）。マグニチュードは地震規模の指標として重要であり、この回帰式の説明変数から取り除くことは出来ないため、やむを得ず関東大地震と北但馬地震のデータを追加した。

(6) レベル2想定地震の規模要件

(4)で求めた死亡確率と(5)で求めた特定地震による死者数より、各都市におけるレベル2想定地震の規模要件である限界規模を試算する。

まず、式(2)を被災都市の総人口 CTP で割ると被災都市における特定地震による一人当たりの死亡確率が求まる。さらに、その地震の発生確率は再現期間の逆数に等しく $1/t$ であることから、式(2)を CTP と t で除せば、これが、全ての都市において式(1)の死亡確率 P_{Di} に等しくなる。これにより、式(3)が導かれる。

$$\frac{ND_{\text{Flood}}(t)}{JTP} = P_{Di} = \frac{ND_{\text{Earth}}}{CTP \cdot t} \quad (3)$$

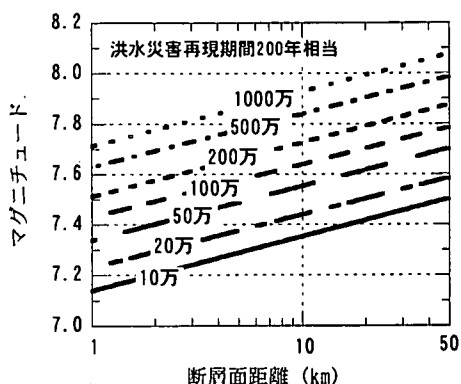


図-15 被災都市総人口に対する M と Δ の関係

式(3)において、都市が特定された場合、 CTP が既知となり、 M と Δ の関係式となる。この関係式が、各都市におけるレベル2想定地震の限界規模の試算例である。

この限界規模について、まず、被災都市の総人口 CTP 10万、20万、50万、100万、200万、500万および1000万人での、再現期間200年の洪水災害に相当する M と Δ の関係を示したのが図-15である。図-15より、人口の増加に対し M と Δ の関係が上に移動していることが分かる。すなわち、人口の多い都市ほど、大きな被害を防ぐためにレベル2地震動として考慮すべき地震の規模を大きくしなければならない。

次に、再現期間100年、200年および300年の洪水災害を基に試算したレベル2想定地震の限界規模と文献56)によるカタログ地震、歴史地震および活断層地震との関係を日本の主要都市について示したのが、図-16～図-19である。ここで文献54)によればカタログ地震とは1885年以降に発生した地震で宇津カタログおよび気象庁地震月報に基づくデータ、歴史地震は1884年以前に発生した宇佐見カタログによるデータでカタログ地震に比べ断層位置やマグニチュード決定精度が低いもの、活断層地震とは活断層マップから今後発生が予想される地震データである。なお、歴史地震のデータは、震源深さが不明のものが多く、この場合震源深さは便宜上0kmとされている。そのため、歴史地震の断層面距離は小さめに算定される傾向がある。

図-16の仙台については、全ての地震データが洪水災害再現期間200年に相当する限界規模より下に位置している。仮に、再現期間300年もしくは200年の洪水災害規模が、地震災害に対する許容リスクとしてコンセンサスが得られた場合、全ての地震を設計対象地震として検討することとなる。もし、再現期

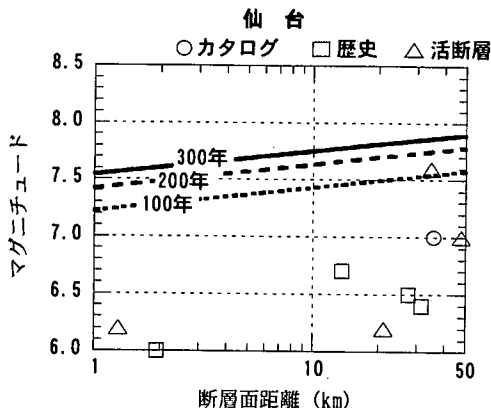


図-16 地震データとレベル2想定地震限界規模（仙台）

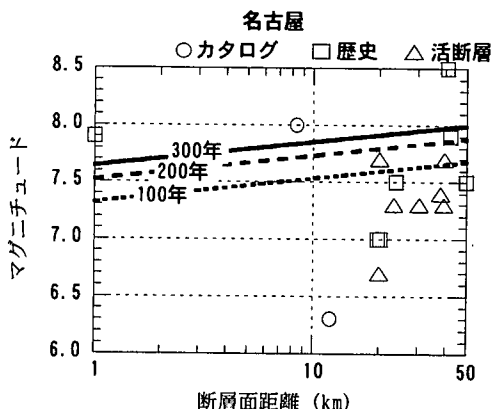


図-18 地震データとレベル2想定地震限界規模（名古屋）

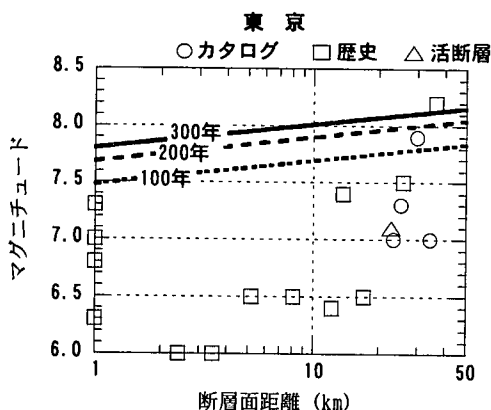


図-17 地震データとレベル2想定地震限界規模（東京）

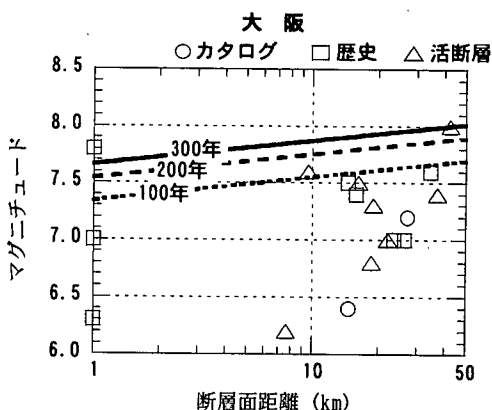


図-19 地震データとレベル2想定地震限界規模（大阪）

間100年が許容リスクと認められた場合には、限界規模を超える、設計対象とするには規模が大きすぎる地震が過去に発生していることとなる。

図-17の東京においては、洪水災害300年相当の限界規模を超える歴史地震が記録されていることに加え、カタログ地震も再現期間200年相当の限界規模より少し下に存在している。このカタログ地震は関東大地震（1923年）である。仮に、再現期間100年の洪水災害規模が、地震災害に対する許容リスクとしてコンセンサスが得られた場合には、東京においては、関東大地震はレベル2想定地震には該当しないこととなる。

図-18の名古屋においては、濃尾地震（1891年）が洪水災害再現期間300年に相当する限界規模より上に位置している。濃尾地震は、日本の陸地下で発生した地震の中でマグニチュードが最大のものであり⁴⁶⁾、さらにその断層面が名古屋市街地に近接しているということである。また、他にも2つの歴

史地震が洪水災害再現期間300年相当の限界規模を超えており非常に大きな地震が発生してきた過去があることが分かる。これらは、仮に再現期間300年の洪水災害規模が地震災害に対する許容リスクであるとされても、レベル2想定地震には該当しない。一方、活断層地震は全て再現期間200年相当規模以下に収まっている。

図-19の大阪については、カタログ地震に限ってみれば洪水災害再現期間100年相当の限界規模を下回っており、精度の良いデータの中においては過去そこまで大きな地震を経験していない。もし、洪水災害再現期間100年が地震災害に対する許容リスクと認められた場合、全てのカタログ地震は、レベル2想定地震の候補となり得る。一方、歴史地震が洪水災害再現期間300年相当の限界規模を超えている。

以上が、主要都市におけるレベル2想定地震の規模要件の試算例と実際の地震データとの比較である。このように、許容リスクに係るリスク管理境界の設

定は、レベル2想定地震としての限界規模を定めることとなり、その結果として関東大地震や濃尾地震を耐震設計の想定地震とはしない、との帰結もあり得る。これが、本論文の捉えるところの許容リスクとレベル2想定地震の具体的な関係である。

なお、実用上十分に判断されるほど高い限界規模を設定したとしても、レベル2想定地震を超える規模の地震の発生確率を0にできるものではない。したがって、蛇足ではあるが、実際にレベル2想定地震を超える規模の地震による災害が発生した場合についての考慮も、レベル2想定地震の規定に併せて重要であると考ええる。

7. 結論

本論文は、地震災害に対する許容リスク設定について、一つの考え方について述べ、これに関わる考察を行ったものである。本論文の結論は以下のとおりである。

- (1)許容リスクについて、個別の社会施設の設計と分離し、リスク評価・分析、リスク管理限界の決定により設定する考え方を提案した。
- (2)自然災害のリスクを、死亡者数を指標とする方法により評価した。
- (3)自然災害に対するリスク管理限界の設定について、その例を示した。
- (4)許容リスクの設定から、レベル2想定地震の規模要件を定める方法を示した。

本論文は、あくまで許容リスク設定方法の一つの考え方を示したものに過ぎない。許容リスクの設定については、各所で述べたように様々な方法が想定され、多くの議論があると考えられる。また、許容リスクとレベル2想定地震の関係についても同じである。本論文の目的は、このような地震災害に対する許容リスクの設定に関わる事項について、国民的コンセンサス形成への議論を進める上でのたたき台となることである。今後、この方向性に沿った議論がさらに活発になることが期待される。

謝辞：本論文の公表に際し、港湾技術研究所福手勤構造部長（前計画設計基準部長）に貴重な御助言をいただきましたことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 合田良實：土木と文明、鹿島出版会、1996。
- 2) 伊藤学、尾坂芳夫：土木工学大系 15設計論、彰国社、1980。
- 3) （社）土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」、1996。
- 4) （社）土木学会地震工学委員会地震荷重研究小委員会：レベル2地震動と設計地震荷重の課題－地震荷重研究小委員会の活動報告－、1997。
- 5) （社）土木学会構造工学委員会：建設事業における確率・統計的意思決定研究小委員会報告書、1998。
- 6) 河田恵昭：研究討論会 国土防災の適正水準（Acceptable Risk）を考える、土木学会誌、Vol.84、pp.119-122、1999。
- 7) 尾坂芳夫：コンクリート構造の限界状態設計方法の省察、土木学会論文集、No.378/V-6、pp.1-13、1987。
- 8) 都甲泰正：ラスムッセン報告書（Reactor Safety Study (WASH-400) Draft）の概要、日本原子力学会誌、Vol.17、No.2、pp.3-8、1975。
- 9) 山田太三郎：原子力安全問題とその周辺－第1回各種発電方式の危険度の比較－、原子力工業、Vol.24、No.9、pp.23-27、1978。
- 10) 山田太三郎：ラスムッセン報告の波紋、原子力工業、Vol.24、No.10、pp.40-45、1978。
- 11) Mayasandra K. Ravindra：Resent Seismic Risk Studies of Nuclear Power Plants, *Proceedings of ICOSSAR '89*, pp.2211-2218, 1989。
- 12) Berg, H. P., Grundeler, D and Lange, F.：Risk Comparison: One Way of Risk Evaluation, *Proceedings of ICOSSAR '93*, pp.1843-1847, 1993。
- 13) Payer, H. G., Hupmann, H., Jochum, Chr., Madsen, H. O., Nittinger, K., Shibata, H., Wild, W. and Wingender, H.－J.：Plenary Panel Discussion on 'How Safe is Safe Enough?', *Proceedings of ICOSSAR '93*, pp.57-74, 1993。
- 14) 佐藤尚次：構造計画・設計の総合化と期待総費用最小化原則、確率・統計的意思決定に関するシンポジウム論文集、pp.11-16、1998。
- 15) Niels C. Lind：Target Reliability Levels from Social Indicators, *Proceedings of ICOSSAR '93*, pp.1897-1904, 1993。
- 16) K. van Breugel：Acceptance Criteria for High Consequence Risks, *Proceedings of ICOSSAR '93*, pp.1849-1856, 1993。
- 17) 小林潔司、秀島栄三：耐震投資に関する費用便益分析、第二回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集、pp.193-196、1997。
- 18) 上田孝行、森杉壽芳、高木朗義：防災投資の経済評

- 価の考え方, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.619-626, 1996.
- 19) Berz, G.A. : World Increase of Extreme Disaster Losses: The View of an International Reinsurer, *Booklet of Abstract ICOSSAR '97*, pp.21-24, 1997.
 - 20) 小林潔司, 松島格也: カタストロフ・リスクと防災投資の経済評価, 第三回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.469-472, 1998.
 - 21) 塚田康夫, 木村雄一, 河村壮一: SRMによる免震建物のライフサイクルコスト評価, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.241-246, 1998.
 - 22) 松村和雄, 清家規: 地震による壊滅的な都市災害を防止するための地震都市係数, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.523-528, 1998.
 - 23) 河田恵昭: 都市災害の被災シナリオと人的被害予測, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.735-742, 1996.
 - 24) 中村孝明, 宮地和子: 地震災害の指標化に関する試案—個人の損害に着目して—, 第1回リアルタイム地震防災論文集, pp.129-134, 1999.
 - 25) (社) 日本電気協会: わが国の歴史地震被害一覧表, 1994.
 - 26) 国会資料編纂会(力武常次, 武田厚監修): 日本の自然災害, 共伸舎, 1998.
 - 27) 国土審議会計画部会編: 新しい全国総合開発計画 21世紀の国土のランドデザイン —地域の自立の促進と美しい国土の創造—, 1998.
 - 28) C. Allin. Cornell: Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.58 No.5, pp.1583-1606, 1968.
 - 29) 後藤尚男, 亀田弘行: 地震時における最大地動の確率論的研究, 土木学会論文集, No.159, pp.2-12, 1968.
 - 30) A. Der Kiureghian and A. H-S. Ang: A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.67 No.4, pp.1173-1194, 1977.
 - 31) Suzuki, M., Chida, M., Kudou, M. and Ozaka, Y.: Seismic Risk Analysis Based on Strain Energy Accumulation in Focal Region, *Journal of Structural Eng. / Earthquake Eng. JSCE*, Vol.8, No.3, pp.143-152, 1991.
 - 32) 亀田弘行, 石川裕, 奥村俊彦, 中島正人: 確率論的想定地震の概念と応用, 土木学会論文集, No.557/I-41, pp.75-87, 1997.
 - 33) 藤野陽三, 伊藤学, 酒井利夫: 年最大風速記録による設計基本風速の算定に関する研究, 土木学会論文報告集, No.305, pp.23-34, 1981.
 - 34) 田村幸雄, 須田健一, 松井源吾: 設計基準風速についての一考察—建築密度の経年変化を考慮した年最大風速の均質化—, 日本建築学会論文報告集, No.400, pp.101-111, 1989.
 - 35) 坂本順, 森保宏: 順序統計量による2つの強さクラスの地上積雪深・地表加速度についての考察 終局限界および使用性限界状態設計に用いる荷重モデル[II], 日本建築学会論文報告集, No.495, pp.29-36, 1997.
 - 36) Shigeo Hanayasu, Wilson H. Tang: Parameter Estimation of Frequency-Magnitude Curve of Natural Disasters and Construction Accidents, *Proceedings of ICOSSAR '97*, pp.549-556, 1997.
 - 37) 合田良實: 極値統計におけるプロットング公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討, 港湾技術研究所報告, Vol.27, No.1, 1988.
 - 38) 柴田碧: 構造物の構造安全性 5耐震設計における構造安全性の最近の問題—低確率事象に対する耐震設計法についての論議—, 日本造船学会誌, 第825号, pp.38-44, 1998.
 - 39) (社) 日本港湾協会編: 港湾構造物設計基準(昭和42年4月), 1967.
 - 40) (社) 日本港湾協会編(運輸省港湾局監修): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(昭和54年3月), 1979.
 - 41) (社) 日本港湾協会編(運輸省港湾局監修): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成元年2月), 1989.
 - 42) 建設省: 日本の防災の歴史, 建設省Home Page (URL: <http://www.moc.go.jp/disaster/syoukai/rekisi.htm>)
 - 43) 山本三郎: 河川法全面改正に至る近代河川事業に関する歴史的研究, (社) 日本河川協会, 1993.
 - 44) 建設省: 洪水や土砂災害にも強いまちづくりのために 第9次治水事業5箇年計画の整備目標, 建設省Home Page (URL: <http://www.moc.go.jp/river/kasen/p08.htm>)
 - 45) (社) 日本河川協会編(建設省河川局監修): 改訂新版河川砂防技術基準(案)同解説 計画編, 1997.
 - 46) 松澤勲監修: 自然災害科学事典, 築地書館, 1988.
 - 47) (財) 道路経済研究所(建設省道路局監修): 道路交通経済要覧 平成9年度版, ぎょうせい, 1998.
 - 48) 株式会社富士通ラーニングメディア: 日本国勢図会 CD-ROM'97/98, 1997.
 - 49) 神田順, 石井清, 大橋雄二, 浅野美次, 和泉正哲, 大熊武司, 加藤博之, 小浜芳朗, 小林俊夫, 鈴木祥之, 田村幸雄, 高橋徹, 藤堂正喜, 西谷章, 三橋博巳, 村上雅也, 菅沼信也: 荷重・構造安全性についてのアンケート調査, 日本建築学会構造系論文報告集, No.433, pp.73-81, 1992.

- 50) 奥村俊彦, 石川裕, 亀田弘行: 確率論的想定地震による低頻度巨大外力としての対象地震の選定方法, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.507-512, 1998.
- 51) 長尚: 確率論的立場から見たレベルⅡ地震動と性能保証について, 確率・統計的意思決定に関するシンポジウム論文集, pp.23-26, 1998.
- 52) 佐藤尚次: 構造物の構造安全性 4橋梁における構造安全性, 日本造船学会誌, 第825号, pp.30-37, 1998.
- 53) 東京都: 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書, pp.160-166, 1996.
- 54) 野津厚, 上部達生, 佐藤幸博, 篠澤巧: 距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係, 港湾技研資料, No.893, 1997.
- 55) (財) 日本地図センター (建設省国土地理院編集): 日本の市区町村役所・役場経緯度一覧, 1993.

(1999. 2. 25受付)

AN ANALYSIS OF EVALUATION METHODS OF ACCEPTABLE RISK FOR EARTHQUAKE DISASTERS ADOPTING A DEATH TOLL AS AN INDEX

Yasuhiro AKAKURA and Motoyuki SUZUKI

This paper proposes and analyzes an approach to decide the level of acceptable risk for earthquake disasters. The proposed way to decide the level of acceptable risk for national land planning is estimation of risk of natural disasters such as earthquake, tsunami and flood from the viewpoint of the relation between a death toll and a return period, and decision of upper limit of risk management. Then, the decision of acceptable risk is converted into the requirement for design earthquake of level 2, assuming that the design concept of river facilities is decided the acceptable risk for earthquake disasters. Furthermore, the catalogue of earthquakes are compared with the requirement for design earthquake of level 2 at the chief cities of Japan.