

RC構造の安全性に及ぼす人為的過誤の影響

鈴木基行*・高橋美昭**・尾坂芳夫***

本研究では、まず構造物の安全性を評価する上で、人為的過誤の影響を考慮する重要性を示した。そして、人為的過誤の起こり易さは、構造物建造の品質保証水準とある相関関係にあるものと仮定し、RC構造物の安全性照査に取り入れるための確率モデルを提案した。また、数値計算例として、軸方向圧縮力を受けるRC柱の安全性照査に、本論文で提案した確率モデルを適用し、品質保証水準や、荷重作用の特性が安全性に及ぼす影響について検討を行った。

Keywords : structural safety, human error, probabilistic model, quality assurance level, failure probability, partial safety factor

1. ま え が き

RC構造の設計法として、部分安全係数を用いた限界状態設計法の確立が急がれている。この設計法は、統計確率論および信頼性理論に基礎を置き、力学的あるいは統計的な性質が相違する設計変数、とりわけ様相が異なる不確実性などを合理的に取り扱い、より精度の高い設計を行うことを目的としている。これらの不確実性は材料の強度のように本来統計的性質を有する不確実さ（客観的不確実性）と、モデルと実際の相違など人間の意思による選択・決定に基づく不確実さ、あるいは設計や施工過程における人為的過誤に基づく不確実さ（主観的不確実性）とに大別できる。

客観的不確実性については、実験や観測により統計的資料もかなり整備されつつある。これに対し、主観的不確実性を取り扱った研究は非常に少なく、データの蓄積も少ないのが現状である。しかし、構造物の安全性に最も重大な影響を及ぼすのは主観的不確実性、とりわけ異常な過誤（Gross error, または Human error）である、との報告が多く、研究者によりなされている。例えば M. Matousec¹⁾は、ヨーロッパにおける構造物の破壊例 800 のうちの 75%、および被害額の 90% は人為的過誤によるもの、と報告している。このように、土木構造物の安全性において人為的過誤が非常に重要である、との認識が高まっているにもかかわらず、構造設計の安全性照査において人為的過誤の影響が考慮されていないのが現状である。この理由として、実験や観測によって人為的過誤のデータがなかなか得られず、その性質を支配する法則が把握しにくいこと、事故や変状が起これなければ

わからないこと、などが考えられる。構造設計において、客観的不確実性のみ厳密に取り扱っても、主観的不確実性に対する取り扱いを現状のままにしておくのであれば、構造設計の精度にも限界があると思われる。

本研究は、人為的過誤に関する基礎的研究として、RC構造物の施工における人為的過誤が、構造物の安全性に及ぼす影響について検討することを目的としている。特に、人為的過誤の起こりやすさは構造物建造の品質保証水準とある相関関係にあるものと仮定し、RC構造物の安全性照査において、人為的過誤の影響を考慮した確率モデルを提案する。さらに、軸方向圧縮力を受けるRC柱の安全性照査に、この確率モデルを適用し、数値計算を通じて、品質保証水準や荷重作用の統計的特性が安全性に及ぼす影響について検討を行う。

2. 既往の研究とその問題点

主観的不確実性に対する研究は、Ang, Amin の拡張信頼性理論²⁾が最初であろう。その後、Cornell³⁾, Lind⁴⁾, Ang and Ellingwood⁵⁾らにより主観的不確実性は客観的不確実性から区別して取り扱われた。

人為的過誤の取扱い方には、離散事象モデルと連続量モデルの二通りがある。

(1) 離散事象モデル

このモデルは、Nowak^{6),7)}, Lind⁸⁾, Nessim⁹⁾, 杉山ら¹⁰⁾により検討されてきたが、次のような特徴あるいは問題点を有していると思われる。

1) 人為的過誤の明確な定義あるいは判断基準が必要である。

2) 人為的過誤が「発生した」あるいは「発生しない」という単純なモデルである。

3) 構造物の事故や変状発生の報告に基づき、人為的過誤の発生頻度を統計的に評価することができる。しかし、構造物や部材の強度や性能に及ぼす人為的過誤の影響

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

** 正会員 工修 東京電力 福島第一原子力発電所

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

響はあいまいで、不明確ことが多い。

4) 人為的過誤を考慮するためには、その照査式に応じた連続量(例えば強度や変位等)に変換しなければならない。単純な離散事象に連続量を与える合理的な方法はない。結局、本来連続量である人為的過誤による影響を離散事象に変換する際、およびそれを再び連続量に変換する過程において誤差が含まれてしまう、という欠点を有する。

(2) 連続量モデル

このモデルは、佐藤ら¹¹⁾、および長¹²⁾により提案されてきたが、次のような特徴あるいは問題点を有していると思われる。

1) 本来、人為的過誤の構造物に及ぼす影響は、強度や変位など、連続量で表される力学量で評価される。連続量モデルでは、真の値からの偏りで表される人為的過誤を安全性照査式に適用することができる。

2) 人為的過誤を連続量として定義しても、ある力学系に及ぼす人為的過誤の影響を定量的に評価するための情報は得られない。したがって、連続量モデルで人為的過誤を推定するのは非常に困難であり、かなりのあいまいさが含まれると思われる。

3. Human error の定義

本研究において“Human error”を“標準的なレベルの技術者による標準的な行為から逸脱した行為”と定義する。また“Human error”という術語には、“人為的過誤”と“人為的誤差”とが含まれるが、本研究ではこれらを以下のように定義する。

人為的過誤：確率論的異常値の原因となる人間の過誤の内容を表す離散事象

人為的誤差：人間の過誤による真の値からの偏りを表す連続量

さらに、真の値からの偏りを表す“誤差”をその原因により次のように区別する。

客観的誤差：客観的(自然)現象としての性格を有する不確実性による誤差。おもに、設計基礎量の日常変動による誤差。

主観的誤差：人為的過誤や人間の意志決定および選択の影響などの主観的不確実性による誤差。

4. RC 部材耐力に影響する人為的過誤の確率モデル

(1) 仮定事項

一般に、人為的誤差は全ての構造物の中に含まれているものと考えられ、設計荷重の評価ミスや、作用応力の算定ミスなどの場合を除けば、人為的誤差の存在により影響を受けるのは、主に耐力側の基礎変数であると思

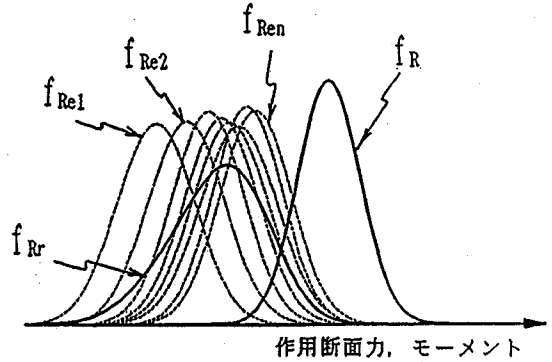


図-1 人為的誤差の影響を受けた耐力の確率分布

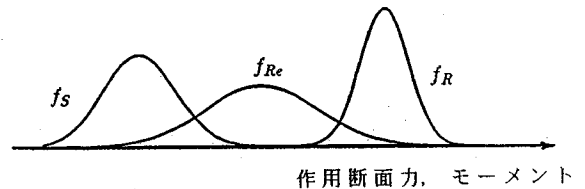


図-2 耐力と作用の確率分布

れる。したがって、本研究では、客観的誤差を有するRC部材耐力の確率分布が人為的誤差によりどのような影響を受けるかに焦点を絞ってモデル化を行い、荷重作用の確率分布はHuman errorの影響を受けないものと仮定する。モデル化においては、客観的誤差を有するRC部材耐力の確率分布の平均値は低下し、ばらつきは大きくなることが考えられる。この様子を図-1に示す。この図において、 $f_R(\cdot)$ は、人為的誤差の影響を受けていない客観的誤差のみを含む耐力の確率分布であり、 $f_{Rei}(\cdot)$ ($i=1, 2, \dots, n$)はある人為的誤差(i)の影響により変化した耐力の確率分布である。この $f_{Rei}(\cdot)$ は構造物に含まれると予想される人為的過誤の種類や大きさにより多種多様であり、それら全てを合成したものが $f_{Rr}(\cdot)$ である。

しかし、現在のところ人為的誤差のモデル化に必要な統計的データは非常に少ない。そこで、本研究では前述したHuman errorの定義に基づき、構造物の状態は「人為的過誤が存在している場合」と、「人為的過誤がない場合」の2通りである、という離散事象モデルとして取り扱う。その様子を耐力と作用の確率分布で示すと図-2のようになる。図において $f_s(\cdot)$ は作用の確率密度関数、 $f_R(\cdot)$ は人為的過誤のない耐力の確率密度関数、および $f_{Re}(\cdot)$ は人為的過誤の発生により変化した耐力の確率密度関数である。

(2) 人為的過誤の発生確率

人為的過誤の発生は、ポアソン過程に従うものとする、その発生確率 p は次式で表される。

$$p = 1 - \exp[-\lambda] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 λ は1つの工事やプロジェクトにおける人為的過誤の平均発生率である。

この平均発生率 λ は、対象とする過誤や構造物の種類、作業に携わる人間および機械の能力など、多くの因子の影響を受けるため確定することが非常に難しい。そこで、本研究では λ を確率変数(Λ と置く)として取り扱い、“人為的過誤は幾重もの検査の網の目をくぐり抜けて発生する”および“より管理の行き届いた検査システムの整った現場ほど、人為的過誤を未然に防ぐことができる”という経験的事実に基づき、 Λ をRC構造材料の品質保証水準(Quality Assurance Level;以後Q.A. levelと呼ぶ)との相関関係により推定することにする。

一般に人為的過誤は構造物の計画・設計・施工・使用の各段階で発生すると思われるが、本研究ではコンクリート構造物の施工段階における人為的過誤を対象としている。コンクリート構造物の施工は多くのプロセスを有するが、同一の管理運営の下でなされているので、各プロセスにおいて発生する人為的過誤は施工の管理状態に大きく依存していると思われる。よって、同一の管理下における施工全体のQ.A. levelはコンクリートの圧縮強度の変動係数にも影響すること、およびコンクリートの圧縮強度は常に記録されていること、などから、Q.A. levelを評価する統計的情報として、現場において採取されるコンクリートロットの圧縮強度の変動係数が有効、かつ実的であると判断した。

つまり、あるQ.A. levelを有する工程のコンクリート標準供試体による圧縮強度試験結果から得られた統計資料に基づき、変動係数(CV_c)の確率分布を推定し、この確率分布と平均発生率 Λ の分布が正の相関関係により結び付けられるというものである。その関係を図-3に示す。図において、 $f_{CV_c}(\cdot)$ はあるQ.A. levelに対応するコンクリート圧縮強度 f_c^t の変動係数 CV_c の確率密度関数、 $f_\Lambda(\cdot)$ は Λ の確率密度関数、そして $f_{\Lambda|CV_c}(\cdot)$ はある CV_c での Λ の条件付確率密度関数である。

(3) Human errorの影響を受けたRC部材耐力評価

施工段階において人為的過誤の発生により、部材あるいは断面耐力 R は、 $\phi \cdot R$ に変化するものとする。なお ϕ は次式で表される。

$$\phi = R_e/R_i \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 R_i :人為的過誤の影響を受けていない部材あるいは断面耐力に相当する物理量、 R_e :人為的過誤の影響を受けて変化した部材あるいは断面耐力に相当する物理量、 ϕ :人為的過誤の影響による部材あるいは断面耐力の低下率である。

しかし、 ϕ の値は構造物の種類や人為的過誤の種類によって大きく異なり、この値を特定することは非常に困難である。そこで、 ϕ を確率変数(Φ とする)として取り扱い、前述の平均発生率 Λ と同様に、Q.A. levelと

平均発生率 λ

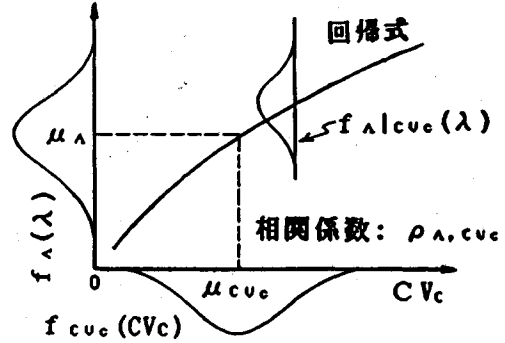


図-3 CV_c と Λ の同時確率密度による相関関係

耐力の低下率 ϕ

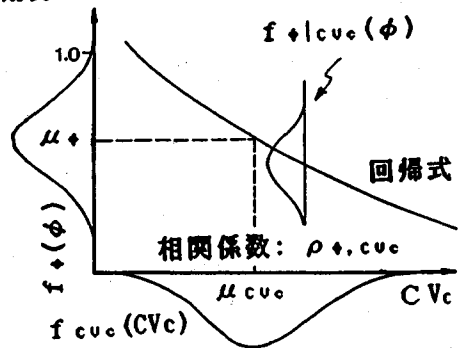


図-4 CV_c と Φ の同時確率密度による相関関係

の相関関係から推定することにする。これはQ.A. levelが低い工程能力ほど、大きな人為的過誤を犯しやすいという考えに基づくものである。

具体的には、コンクリート圧縮強度の変動係数 CV_c との負の相関関係により推定されるものとする。その様子を図-4に示す。図において、 $f_\phi(\phi)$ は Φ の確率密度関数、 $f_{\phi|CV_c}(\phi)$ はある CV_c での ϕ の条件付確率密度関数である。

(4) 限界状態式および破壊確率の算定

a) 人為的過誤がない場合

限界状態式は次式で与える。

$$Z_0 = R - S \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 R :断面耐力に相当する物理量、 S :荷重作用に相当する物理量である。

また、耐力 R の変動係数 CV_R を確率変数として取り扱い、密度関数 $f_{CV_R}(\cdot)$ を持つ場合、errorが全くない理論上の破壊確率 Pf_n は次式で表される。

$$Pf_n = \int_{CV_R=0}^{\infty} f_{CV_R}(CV_R) \int_{R=0}^{\infty} f_R(R|CV_R) \cdot \int_{S=R}^{\infty} f_S(S) dS dR dCV_R \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 CV_R :断面耐力に相当する物理量の変動係数、

$f_{cvr}(\cdot)$: 耐力の変動係数の確率密度関数, $f_R(\cdot)$: 変動係数を一つのパラメーターに持つ断面耐力の確率密度関数, $f_s(\cdot)$: 荷重作用に相当する物理量の確率密度関数である。

b) 人為的過誤が発生した場合
限界状態式は次式で与える。

$$Z_e = \Phi \cdot R - S \dots \dots \dots (5)$$

ここに, Φ : 人為的過誤の影響による断面耐力の低下率。
また, CV_c と負の相関関係をもつとした断面耐力の低下率 Φ の確率密度関数を CV_c との 2 次元確率密度関数 $f_{\phi, cvc}(\phi, CV_c, \rho_\phi)$ で表わすと, 人為的過誤が発生したときの破壊確率 Pf_e は次式で表される。

$$Pf_e = \int_{CV_c=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{\infty} f_{\phi, cvc}(\phi, CV_c, \rho_\phi) \int_{R=0}^{\infty} f_{Re}(R) |m_{Re}, CV_{Re}) \cdot \int_{S=R}^{\infty} f_s(S) dS dR d\phi dCV_c \dots \dots \dots (6)$$

ここに, ρ_ϕ : CV_c に対する Φ の相関係数, $f_{\phi, cvc}(\cdot)$: CV_c と Φ の 2 次元確率密度関数, m_{Re} : 人為的過誤の影響により変化した耐力の平均値, CV_{Re} : 人為的過誤の影響により変化した耐力の変動係数, $f_{Re}(\cdot)$: 人為的過誤の影響を受けた耐力の確率密度関数である。

なお,

$$m_{Re} = m_\phi \cdot m_R \dots \dots \dots (7)$$

$$CV_{Re} = \sqrt{CV_R^2 + CV_\phi^2} \dots \dots \dots (8)$$

c) 人為的過誤の発生も考慮した全破壊確率
人為的過誤がない場合の理論上の破壊確率 Pf_n と, 人為的過誤の影響を受けた場合の破壊確率 Pf_e とを考慮した総合的な破壊確率 Pf_r は次式で表される。

$$Pf_r = p \cdot Pf_e + (1-p) \cdot Pf_n \\ = \int_{CV_c=0}^{\infty} \int_{p=0}^1 p \cdot f_{\phi, cvc}(p, CV_c, \rho_p) \cdot \int_{\phi=0}^{\infty} f_{\phi, cvc}(\phi, CV_c, \rho_\phi) \int_{R=0}^{\infty} f_{Re}(R) |m_{Re}, CV_{Re}) \cdot \int_{S=R}^{\infty} f_s(S) dS dR d\phi dCV_c \\ + \int_{CV_c=0}^{\infty} \int_{p=0}^1 (1-p) \cdot f_{\phi, cvc}(p, CV_c, \rho_p) \cdot \int_{CV_R=0}^{\infty} f_{cvr}(CV_R) \int_{R=0}^{\infty} f_R(R) |CV_R) \cdot \int_{S=R}^{\infty} f_s(S) dS dR dCV_R dp dCV_c \dots \dots \dots (9)$$

ここに, p : 人為的過誤の発生確率, $f_{\phi, cvc}(\cdot)$: CV_c と p との 2 次元確率密度関数, ρ_p : CV_c に対する p の相関係数, である。

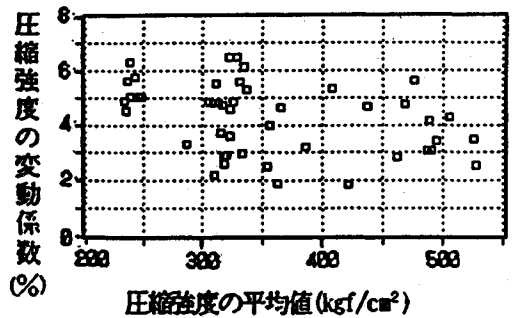


図-5 コンクリート圧縮強度の平均値と変動係数の関係

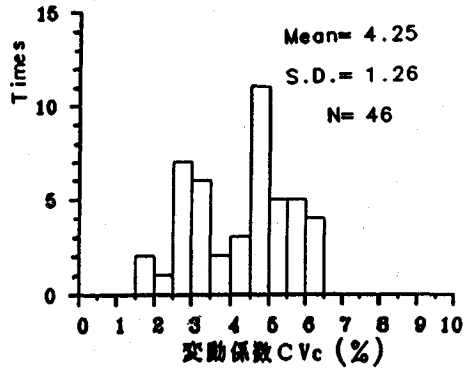


図-6 変動係数の頻度分布 (コンクリート圧縮強度)

5. 設計基礎変数の日常変動に関する確率モデル

(1) コンクリートの圧縮強度 f_c'

日本道路公団 S 工事事務所での RC 橋および PC 橋施工におけるコンクリート強度報告書を基に, 同一配合で標準養生した円柱供試体の 28 日強度を同一標本として集計した。各標本のサンプル数は 20~180 個, 圧縮強度の平均値 m_c は 228.5~528.5 kgf/cm² で, 46 の標本が得られた。コンクリートの圧縮強度 f_c' についての標本の平均値と変動係数 CV_c の関係を図-5 に示す。また, 図-6 に変動係数 CV_c の頻度分布を示す。

この頻度分布に基づき, 想定される Q.A. level を Good, Normal, および Bad という 3 つのレベルにランク分けし, 各 level に対し CV_c の確率密度関数 $f_{cvc}(\cdot)$ を与える。 CV_c は非負であるので, 対数正規分布でモデル化することにし, その確率密度関数を図-7 に示す。また, 図中に各レベルに対する f_{cvc} の平均値 μ_{cvc} , および標準偏差 σ_{cvc} を示す。

(2) 鉄筋の降伏点強度 f_y

著者ら¹³⁾は, 鋼材検査証明書を基に, 種別, 製鉄所, 鉄筋径の同じものを同一標本として降伏強度の変動係数の検討を行った。SD 30 に対しては 23 個, SD 35 に対しては 6 個の標本が得られ, それぞれのサンプル数は約 20~60 個であった。図-8 には, 各標本の平均値 m_y と,

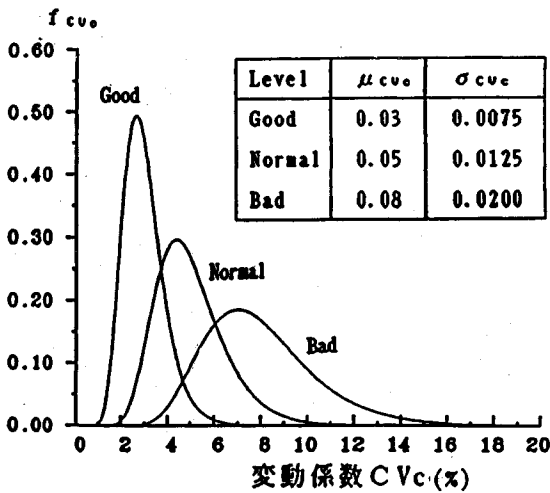


図-7 各 Q. A. level に対応する確率密度関数 f_{cvc} .

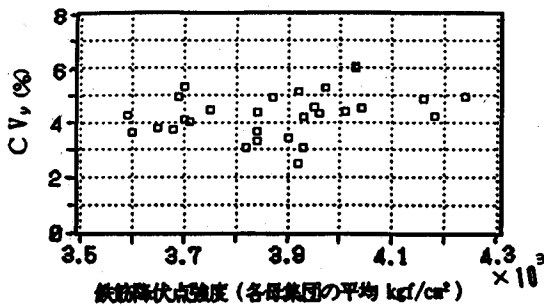


図-8 鉄筋の降伏点強度の平均値と変動係数の関係

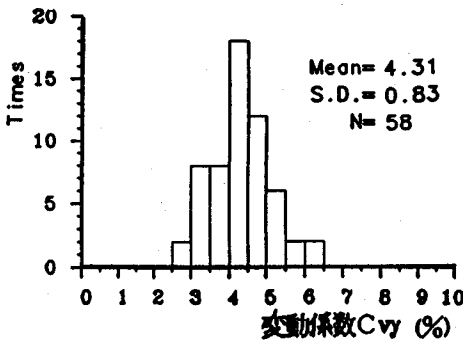


図-9 変動係数の頻度分布 (鉄筋降伏点強度)

変動係数 CV_v との関係を示す。また、 CV_v の頻度分布を図-9 に示す。

(3) 部材断面寸法

著者ら¹³⁾は、東北新幹線建設工事に関連して得られた出来形検査表を基に RC 断面の寸法、かぶりについて、絶対誤差および相対誤差を集計した。それぞれのサンプル数は 57~238 であった。その結果、部材寸法の絶対誤差は設計寸法の増加によってもあまり増加せず、-10. ~+2.0 mm の範囲にばらついていたこと、部材寸法の

変動係数の最大値は、断面の幅で 0.36%、高さで 0.39%、有効高さで 0.4%、かぶりで 3.3% であり、かぶり以外はかなり小さい値であったことなどを結論づけている。

6. 人為的過誤に関する統計確率の情報

人為的過誤に関する情報として一般に公開されているものは非常に少なく、評価の基準も統一されていない現状において、信頼性の高い情報を得ることは大変困難である。また、本研究における確率モデルの重要なパラメーターである Λ と Φ は、構造物ごとに異なるはずである。しかし、あえて統計確率の情報を得るために、コンクリートの不良率や、各研究者が報告する事故の発生率など現在得られる情報を基に、 Λ および Φ の推定を行うことにする。

(1) 人為的過誤の発生による構造物の破壊の確率

山本¹⁴⁾は、構造物の状態を、“破壊する”(事象 F)と“破壊しない”(事象 \bar{F})という2つの離散事象、および“過誤がある”(事象 E)と“過誤がない”(事象 \bar{E})という2つの離散事象にそれぞれ区分ができるものとし、全確率の定理および乗法定理から次式を導いている。

$$P(F) = P(F|E) \cdot P(E) + P(F|\bar{E}) \cdot P(\bar{E}) \dots\dots\dots (10)$$

$$P(F|E) \cdot P(E) = P(E|F) \cdot P(F) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $P(F)$: 事象 F の起こる確率、 $P(F|E)$: 事象 E が起こった場合の事象 F の条件つき確率、である。さらに、式 (10)、式 (11) を変形することにより次式を導いている。

$$P(F) = \frac{1 - P(E)}{1 - P(E|\bar{F})} \cdot P(F|\bar{E})$$

$$\doteq \frac{1}{1 - P(E|\bar{F})} \cdot P(F|\bar{E}) \dots\dots\dots (12)$$

$$P(F|E) = \frac{\{1 - P(E)\} \cdot P(E|F)}{P(E) \cdot \{1 - P(E|\bar{F})\}} \cdot P(F|\bar{E}) \dots\dots\dots (13)$$

この式 (13) は、過誤がないという仮定のもとでの破壊確率 $P(F|\bar{E})$ と、過誤が原因となって生じる破壊の確率 $P(F|E)$ との関係を、 $P(E)$ と $P(E|F)$ により表わしたものである。

ところで、人為的過誤に関する既往の調査・研究報告において、 $P(E|F)$ の値として表-1のような報告がある。この報告に対しては、1) 対象とする人為的過誤の種類、構造物に与える影響度などが明確に定義されていないため、各研究者の推定する確率もかなりの不確実さを持っていること、2) 構造物の破壊や損傷の原因を調査した場合、それが人為的過誤によるものかどうかを離散的に判断することはできないこと、3) 荷重作用や耐力の統計的情報、あるいは外部環境や品質管理の状態などは無関係な捉え方であり、このようなマクロ的な見方には限界があること、などの問題点が指摘されるが、 $P(E|F)$ の値はおよそ 0.75~0.95 の範囲であると判断さ

表一 既往の研究における $P(E|F)$

報告者 (year)	$P(E F)$	集計数	対象
D. W. Smith (1976) ¹⁵⁾	0.79	73 ¹⁾	橋梁 (R.C., 鋼)
R. Hauser (1979) ¹⁶⁾	0.78	800	構造物一般
A. C. Walker (1981) ¹⁷⁾	0.75	120	建築
M. Matousec (1981) ¹¹⁾	0.75	800	構造物一般
D. E. Allen (1983) ¹⁸⁾	0.9 以上	記載無し	構造物一般
B. Ellingwood (1987) ¹⁹⁾	0.75	記載無し	構造物一般

*1) 143例中洪水を原因とするものを除いた数

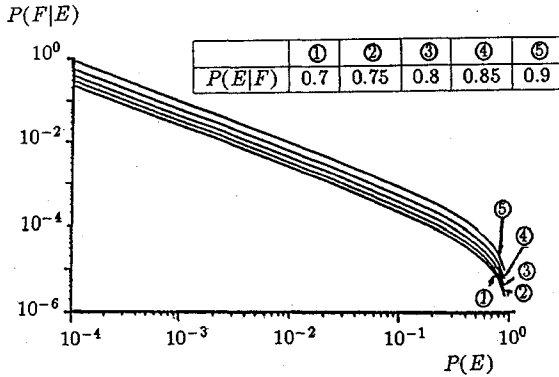


図-10 $P(E)$ と $P(F|E)$ の関係

れる。

式 (13) より, $P(E)$ と $P(F|E)$ の関係を図-10 に示す。ただし, この図における関係は, $P(F|\bar{E})$ が 10^{-5} のときのものである。

(2) 人為的過誤の情報による人為的誤差の推定

式 (13) により与えられる $P(F|E)$ は, 人為的過誤による破壊の確率であるが, これを, 作用と耐力の確率分布の情報に変換することにより, 人為的誤差の影響を受けた RC 構造部材の作用と耐力の位置的関係がどのように変化するかの情報を得ることができる。以下にその手順を示す。

a) 耐力の低下率 ϕ の推定

耐力 R と作用 S の確率密度関数を, ともに対数正規分布と仮定する。そして, 人為的過誤がない場合の R と S の平均値および変動係数をそれぞれ m_R, m_S , および CV_R, CV_S とすると, 破壊確率 Pf_n は次式で表される。

$$Pf_n = 1 - \Phi' \left[\frac{\ln \left\{ \frac{m_R}{m_S} \sqrt{\frac{1+CV_S^2}{1+CV_R^2}} \right\}}{\sqrt{\ln \{ (1+CV_R^2)(1+CV_S^2) \}}} \right] \dots (14)$$

これにより中央安全率 $\gamma_c (= m_R/m_S)$ は次式で表される。

$$\gamma_c = \frac{\exp \{ \Phi^{-1}(1-Pf_n) \cdot \sqrt{\ln \{ (1+CV_R^2)(1+CV_S^2) \}} \}}{\sqrt{(1+CV_S^2)/(1+CV_R^2)}} \dots (15)$$

ここに, Φ' : 標準正規分布関数, \ln : 自然対数, である。つぎに, 人為的過誤が発生したときの破壊確率 Pf_e は,

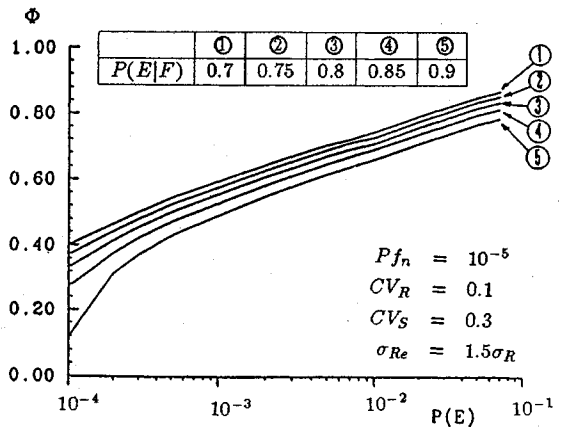


図-11 $P(E)$ と Φ の関係の一例

4. で述べた確率モデルに基づき計算すると, 次のように表される。

$$Pf_e = 1 - \Phi' \left[\frac{\ln \left\{ \frac{m_{Re}}{m_S} \sqrt{\frac{1+CV_S^2}{1+CV_{Re}^2}} \right\}}{\sqrt{\ln \{ (1+CV_{Re}^2)(1+CV_S^2) \}}} \right] \dots (16)$$

このとき, 耐力の平均値 m_{Re} , 標準偏差 σ_{Re} , 変動係数 CV_{Re} は次のように表される。

$$m_{Re} = m_\phi \cdot m_R \dots (17)$$

$$\sigma_{Re} = k \cdot \sigma_R \dots (18)$$

$$CV_{Re} = \sigma_{Re} / m_{Re} \dots (19)$$

ここに, k は σ_{Re} と σ_R の比を表す定数である。その時の中央安全率 γ_{ce} は次式により求められる。

$$\begin{aligned} \gamma_{ce} &= \frac{\exp \{ \Phi^{-1}(1-Pf_e) \cdot \sqrt{\ln \{ (1+CV_{Re}^2)(1+CV_S^2) \}} \}}{\sqrt{(1+CV_S^2)/(1+CV_{Re}^2)}} \\ &= \frac{\exp \{ \Phi^{-1}(1-Pf_e) \cdot \sqrt{\ln \{ (1+(k \cdot \sigma_R/m_R)^2)(1+CV_S^2) \}} \}}{\sqrt{(1+CV_S^2)/(1+(k \cdot \sigma_R/m_R)^2)}} \\ &= \frac{\exp \{ \Phi^{-1}(1-Pf_e) \cdot \sqrt{\ln \{ (1+(k \cdot CV_R \cdot \gamma_c/\gamma_{ce})^2)(1+CV_S^2) \}} \}}{\sqrt{(1+CV_S^2)/(1+(k \cdot CV_R \cdot \gamma_c/\gamma_{ce})^2)}} \dots (20) \end{aligned}$$

すなわち, γ_{ce} は上式を用いて繰り返し収束計算を行い, 求めることができる。

4. で導入した, 耐力の低下率 ϕ は次式で表される。

$$\phi = \gamma_{ce} / \gamma_c \dots (21)$$

ϕ と $P(E)$ の関係の一例を図-11 に示す。

b) Φ の平均値 m_ϕ の推定

図-11 に示した ϕ と $P(E)$ の関係を用い, 実質上 ϕ がどのような値をとるかシミュレーションにより推定する。そのとき用いる設計基礎量は, 以下に示す範囲において, 一様分布を持つものと仮定する。

$$Pf_n = 10^{-5} \sim 10^{-6}, P(E|F) = 0.7 \sim 0.9$$

$$k (= \sigma_{Re} / \sigma_R) = 1.0 \sim 1.5, CV_R = 0.05 \sim 0.2$$

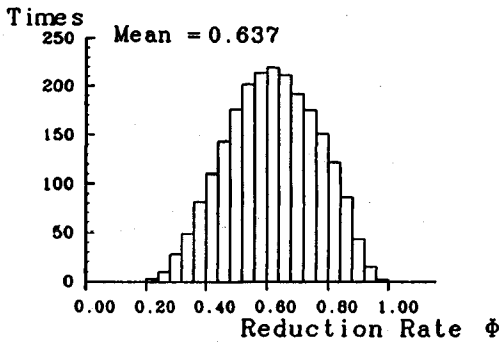


図-12 ϕの頻度分布

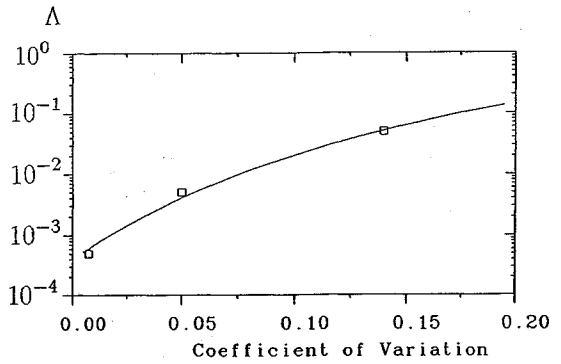


図-13 CV_cに対するλの回帰式

$CV_s=0.1\sim 0.5, P(E)=0.0005\sim 0.02$

そのときのϕの頻度分布を図-12に示す。これより、上記に示すような値の範囲において、ϕの平均値はおおよそ0.6~0.7であろうと推測される。

7. 数値計算例と考察

(1) 目的

以下の事項について検討を行うため、本論文において提案した確率モデルを用いて数値計算を行った。

- ① 品質保証水準の程度、すなわち人為的過誤の存在により、破壊確率はどのような影響を受けるか。
- ② 人為的過誤の影響も考慮した確率モデルにおいて、所定の安全性水準を確保するために必要な特性安全率 γ_k はどうなるのか。
- ③ 荷重作用の分布形状は、Human error を考慮した安全性にどのような影響を及ぼすか。

(2) 回帰式の決定

a) 人為的過誤の平均発生率 λ の回帰式

本研究では、人為的過誤の起こり易さを Q.A. level との相関関係から推測するが、その人為的過誤の平均発生率 λ と f_c の変動係数 CV_c との回帰式を実際に決定する手順を以下に示す。

① λ と CV_c の最も起こり易いと思われる値どうしを対応させる。この点を点 C とする。

② λ と CV_c の予想される変動領域において、1対1に対応するよう、上限値と下限値を対応させる。ただし、ここでの上限および下限とは、ある程度の超過も許した主観的な値を意味する。この2点を点 U と点 L とする。

③ これら3点により回帰式を決定するが、点の位置から指数型の回帰式が適当と考えられ、最小二乗法によりその回帰係数を決定する。

以上より、

$$\text{点 } C(CV_c, \lambda) = (0.05, 5 \times 10^{-3})$$

$$\text{点 } L(CV_c, \lambda) = (0.0075, 5 \times 10^{-4})$$

$$\text{点 } U(CV_c, \lambda) = (0.14, 5 \times 10^{-2})$$

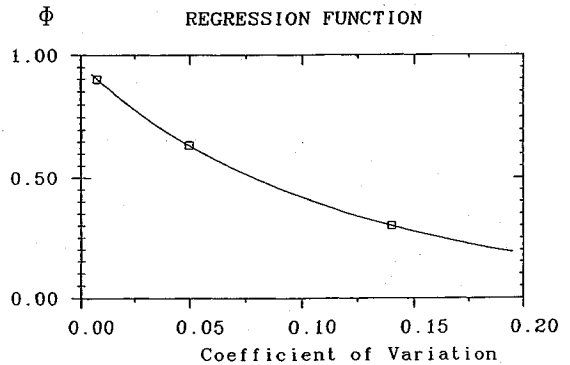


図-14 CV_cに対するϕの回帰式

指数型の回帰式

$$\log_{10}(\lambda) = -3.3841 \cdot \exp[-6.9195 \cdot CV_c] \dots \dots (22)$$

なお、λ と CV_c の相関係数 ρ_{λ, CV_c} は、0.8 とし、回帰式を図-13に示す。

b) 耐力の低下率 ϕ の回帰式

CV_c に対する ϕ の回帰式も、6. で示した統計の情報に基づいて決定する。その手順を以下に示す。

① ϕ と CV_c の最も起こり易いと思われる値どうしを対応させる。この点を点 C' とする。

② ϕ と CV_c の予想される変動領域において、1対1に対応するよう、上限値と下限値を対応させる。ただし、ここでの上限および下限とは、ある程度の超過も許した主観的な値を意味する。この2点を点 U' と点 L' とする。

③ これら3点により回帰式を決定するが、点の位置から指数型の回帰式が適当と考えられ、最小二乗法によりその回帰係数を決定する。

以上より、

$$\text{点 } C'(CV_c, \phi) = (0.05, 0.637)$$

$$\text{点 } L'(CV_c, \phi) = (0.0075, 0.9)$$

$$\text{点 } U'(CV_c, \phi) = (0.14, 0.3)$$

指数型の回帰式

$$\phi = 0.96064 \cdot \exp[-8.3031 \cdot CV_c] \dots \dots (23)$$

なお、 Φ と CV_c の相関係数 ρ_{Φ, CV_c} は、0.8 とし、回帰式を図-14 に示す。

(3) 断面耐力の算定式

a) 耐力算定式

コンクリートの品質が安全性に大きく影響する部材として、軸方向圧縮力を受ける RC 柱を対象に安全性の検証を行う。その断面耐力の算定として、以下の式を用いる。

$$R = b \cdot d \cdot (f'_c + p_t \cdot f_y) \dots \dots \dots (24)$$

ここに、 b, d は断面寸法、 p_t は軸方向主鉄筋比、 f_y は鉄筋降伏点強度である。

また、 f'_c, f_y は互いに独立な対数正規確率変数として取り扱うが、 b, d に関しては f'_c, f_y に比べて変動性が無視できるほど小さいので、これらを確定値として取り扱う (5. (3) 参照)。

よって、耐力の平均値 m_R および耐力の分散 $Var(R)$ は次のようになる。

$$m_R = b_n \cdot d_n (m_{f'_c} + p_{in} \cdot m_{f_y}) \dots \dots \dots (25)$$

$$Var(R) = (b_n \cdot d_n)^2 \times \{Var(f'_c) + p_{in}^2 \cdot Var(f_y)\} \dots \dots (26)$$

ここに、 b_n, d_n は断面寸法の公称値、 $m_{f'_c}$ は f'_c の平均値、 p_{in} は鉄筋比の公称値、 m_{f_y} は f_y の平均値である。

したがって、耐力の変動係数 CV_R は次式で示される。

$$CV_R = \frac{\sqrt{Var(R)}}{m_R} = \frac{\sqrt{Var(f'_c) + p_{in}^2 \cdot Var(f_y)}}{m_{f'_c} + p_{in} \cdot m_{f_y}} \\ = \frac{\sqrt{CV_c^2/m_{f'_c}^2 + (p_{in}/m_{f'_c})^2 \cdot CV_y^2}}{(1/m_{f'_c}) + (p_{in}/m_{f'_c})} \dots \dots \dots (27)$$

この CV_R 算定において、5. における設計基礎変数の日常変動に関する資料から、次のように仮定した。

$$m_{f'_c} = 300. \text{ kgf/cm}^2, \quad m_{f_y} = 3000. \text{ kgf/cm}^2 \\ CV_y = 0.043, \quad p_{in} = 0.03$$

(4) 作用断面力の確率モデル

作用断面力の確率モデルとして、正規分布、対数正規分布、および極値 II 型最大値分布 (下限値 = 0.) を用いることとする。また、荷重の組合せは考えず、柱に作用する軸圧縮力を想定し、変動係数を 0.1~0.5 に設定した。

(5) 結果と考察

a) 破壊確率 Pf_n, Pf_r の比較

人為的過誤がない場合において、破壊確率 Pf_n が 10^{-5} となるような安全性を確保した上で、人為的過誤を考慮した確率モデルにより、トータル破壊確率 Pf_r を算定した。まず、人為的過誤がないと仮定したときの理論上の破壊確率 Pf_n を 10^{-5} にするために必要な特性安全率 γ_k を算定した結果を表-2 に示す。このときの γ_k は、荷重の上側と耐力の下側のそれぞれ 5% フラクタイルを用いた場合の値である。次に人為的過誤を考慮した確率モデルにより Pf_r を求め、その結果を図-15 に示す。

表-2 $Pf_n = 10^{-5}$ を確保するのに必要な γ_k

Q. A. Level	作用断面力の変動係数 CV_s				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Good	1.26	1.58	1.80	1.96	2.10
Normal	1.26	1.56	1.80	1.98	2.12
Bad	1.31	1.56	1.81	2.01	2.17

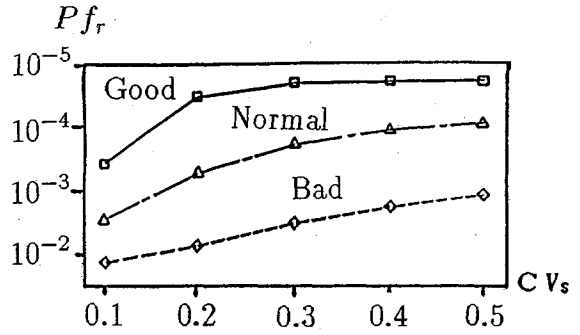


図-15 $Pf_n = 10^{-5}$ に対応する Pf_r

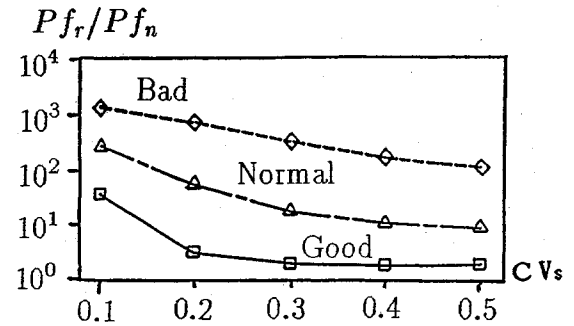


図-16 Pf_r と Pf_n の比

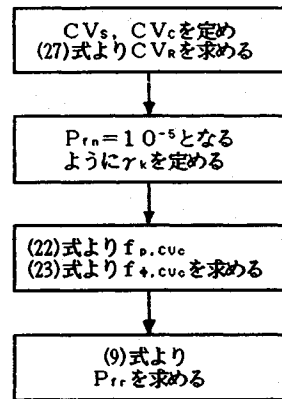


図-17 計算のフローチャート

また、 Pf_r と Pf_n の比を図-16 に示す。

この計算において、 R, S も対数正規分布を仮定し、 CV_c と Δ の相関係数 $\rho_{CV_c, \Delta} = 0.8$ 、 CV_c と Φ の相関係数 $\rho_{CV_c, \Phi} = 0.8$ と仮定した。また、以上の計算のフローチャートを図-17 に示す。

b) 人為的過誤を考慮した特性安全率

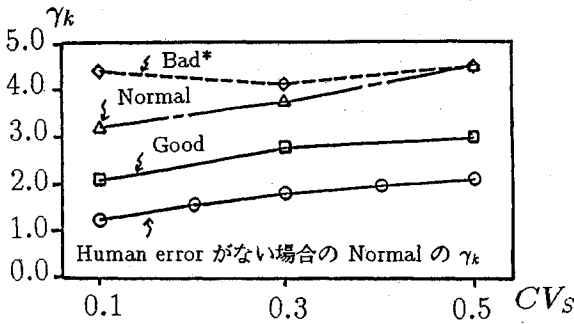


図-18 $Pf_r=10^{-5}$ の安全性を確保する γ_k

人為的過誤を考慮した確率モデルにおいて、破壊確率 Pf_r が 10^{-5} の安全性を確保するのに必要な特性安全率 γ_k を図-18に示す。この計算においては、a)と同様の仮定を設けた。ただし、*のついた値は $Pf_n=10^{-4}$ の場合の値である。

c) 荷重作用の確率分布の裾の形状による影響

以上の数値計算例では、 R も S も対数正規分布を当てはめていたが、荷重作用の分布の裾の形状により、安全性に及ぼす人為的過誤の影響にどのような変化がみられるかについて検討を行った。ただし、方法は7.(5) a)と同様に、 $Pf_n=10^{-5}$ の安全性を確保したときの Pf_r を求めようとするものである。 R については対数正規分布を用いたが、 S に対して、正規分布、極値II型最大値分布を用いた。その計算結果を図-19に示す。また、 Pf_r と Pf_n の比を図-20に示す。

d) 考 察

以上の数値計算例から以下のことがいえる。

1) いずれのQ. A. levelにおいても、荷重作用の変動係数が小さくなるほど人為的過誤の影響を強く受け、安全性も損なわれ易い。これは、人為的過誤の発生により低下した耐力が、荷重作用の確率密度の高いところまで達したためと考えられる。

2) 荷重作用の分布形の影響は、上側の裾の長い分布形ほど、人為的過誤の影響が小さい。この理由は、荷重作用の変動係数による相違と同じであると思われる。

3) $Pf_n=10^{-5}$ を満たす γ_k は各Q. A. levelによって殆ど差がないにもかかわらず、人為的過誤を考慮したモデルでは、Q. A. level間の差はかなり大きくなる。したがって、本研究の“人為的過誤の起こり易さや耐力低下の割合はQ. A. levelと相関がある”という仮定と計算モデルがある程度妥当であるなら、コンクリート標準供試体で評価されるQ. A. levelの差以上に、実際の構造物のQ. A. levelには格差が生じているものと推測される。

4) 本研究では、本来連続量で扱うべきerror(誤差)を、便宜上、発生するかしらないかという離散事象に変換し、再び Φ を掛けた連続量で安全性照査を行っている。

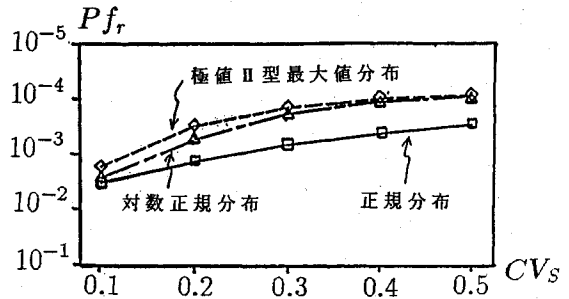


図-19 作用の分布の違いによる Pf_r の変化

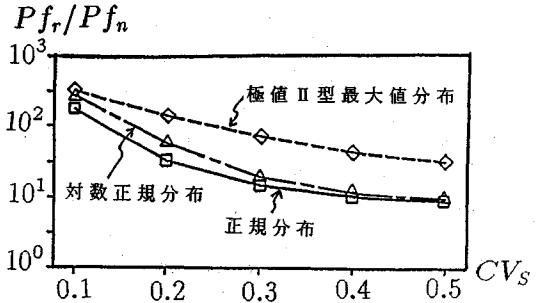


図-20 Pf_r と Pf_n の比

このような手段は現実には必ずしも望ましいとはいえないが、統計資料の少ない人為的誤差を直接推定すること避け、多少とも情報のある人為的過誤の発生率から人為的誤差を考慮したことは実際的な方法と思われる。

8. ま と め

本研究では、人為的過誤の起こり易さは、構造物建造の品質管理水準と、ある相関関係にあるものと仮定し、RC構造物の安全性照査に取り入れる確率モデルを提案した。さらに、このモデルを用いて軸方向圧縮力を受けるRC部材を対象に、Human errorの存在が破壊確率に及ぼす影響、および所定の安全性を確保するために必要な特性安全率の評価を行った。

Human errorを安全係数の中でどの程度考慮する必要があるかについては、人為的過誤の統計的データが整うまで、確かな議論はできないであろう。それまでは品質保証システムや、総合的品質管理方法を整備することによって安全性を確保するのが妥当であると思われる。

参 考 文 献

- 1) Matousec, M. : A system for a detailed analysis of structural failures, Structural safety and reliability, Elsevier, Amsterdam, pp.535~544, 1981.
- 2) Ang, A.H.S. and Amin, M. : Safety factors and probability in structural design, ASCE, Vol.95, No.ST 7, pp.1389~1405, 1969.
- 3) Cornell, C.A. : A probability based structural code, ACI

- Jour., Vol.66, pp.974~985, 1969.
- 4) Lind, N.C. : Consistent partial safety factors, ASCE Vol.97, No.ST 6, pp.1651~1669, 1971.
 - 5) Ang, A.H.S. and Ellingwood, B.R. : Critical analysis of reliability principles relative to design, Conf. on application of statistics and probability to soil and structural engineering, Hong Kong, 1971.
 - 6) Nowak, A.S. : Effect of human error on structural safety, ACI Journal, pp.959~972, Sept. 1979.
 - 7) Nowak, A.S. and Carr, R.I. Sensitivity analysis for structural errors, ASCE, Vol.111, No.ST 8, pp.1734~1746, Aug.1985.
 - 8) Lind, N.C. : Models of human error in structural reliability, Structural Safety, 1, pp.167~175, 1983.
 - 9) Nessim, M.A. and Jordaan, I.J. : Models for human error in structural reliability, ASCE, Vol.111, No.ST 6, pp.1358~1376, June.1985.
 - 10) 杉山俊幸・酒井利夫・藤野陽三・伊藤学：構造設計における信頼性レベル・安全率の設定に関する研究：土木学会論文報告集，第 327 号，pp. 21~28，1982 年 11 月。
 - 11) 佐藤尚次・長谷川彰夫・西野文雄：人的過誤等の要因が安全率設定に及ぼす影響に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 32 A，pp. 517~528，1986 年 3 月。
 - 12) 長尚：土木構造物の安全性に影響を及ぼす要因に関する若干の考察，第 37 回土木学会年次学術講演会概要集，第 1 部，pp. 85~86，1982 年 10 月。
 - 13) 武山泰・鈴木基行・戸谷有一：構造変数の変動性の実態調査と耐力評価に関する研究，土木学会第 36 回年次学術講演会概要集，第 5 部，pp. 7~8，1981 年 10 月。
 - 14) 山本正明：構造物の安全性とヒューマンエラー，土木学会論文集，No. 335，VI-2，pp. 134~139，1985 年 3 月。
 - 15) Smith, D.W. : Bridge failures, Proc. of ICE, Vol.60, Part 1, pp.367~382, Aug.1976.
 - 16) Hauser, R. : Lessons from European failures, ACI, Concrete International, pp.21~25, Dec. 1979.
 - 17) Walker, A.C. : Study and analysis of the first 120 failure cases, Symp. Structural Failures in Buildings, The Institution of Structural Engineers, pp.15~39, 1981.
 - 18) Allen, D.E. : Structural failures due to human error-What research to do? , Proc. Symp. on Structural Technology and Risk, Univ. of Waterloo, Canada, pp.127~138, 1983.
 - 19) Ellingwood, B. : Design and construction error effect on structural reliability, ASCE, Vol.113, No.ST 2, pp.409~422, Feb.1987.

(1991. 9. 3 受付)

INFLUENCE OF HUMAN ERROR ON SAFETY OF RC STRUCTURE

Motoyuki SUZUKI, Yoshiaki TAKAHASHI and Yoshio OZAKA

It is very important to take the influence of human error into consideration in order to assure the structural safety. New probabilistic model by which the influence of human error is taken into consideration is proposed. In the new model, occurrence of human error is assumed to have something to do with the quality assurance level of structural material or member. Furthermore, the influences of quality assurance level or the distribution of load effect on the structural safety of RC columns subjected to axial load are numerically examined by use of the proposed probabilistic model.