

## 構造物の安全性とヒューマンエラー

### SIGNIFICANCE OF HUMAN ERROR ON SAFETY OF STRUCTURES

山本正明\*

By Masaaki YAMAMOTO

Human errors play a dominant role in structural failures. It has been estimated that fewer than 10% of all failures are due to stochastic variability of the load and resistance, and that far more are due to human errors. A method for evaluating significance of human errors on safety of structures is proposed; in the study, safety is expressed in terms of reliability. In the model, the gross human error factor (GE factor), which is to modify the conventional failure probability calculated in the absence of human errors, is introduced. The GE factor for braced excavations is estimated through the questionnaire to civil engineers, and significance of human errors on safety of braced excavations is evaluated.

#### まえがき

土木構造物を計画する際に最も重要なテーマの一つは、社会的に大きな影響を与える構造物の破壊に対して十分な安全性を確保することである。構造物は実際の(真実の)抵抗が実際の荷重または荷重作用より小さくなった時に破壊する。一般には基準類にしたがって設計・施工された構造物は破壊に対して十分な余裕を持っており、安全性の指標である信頼度は十分に大きく、破壊確率は非常に小さい。しかし、構造物を設計し、施工し、さらには使用するのは人間であるため構造物の設計・施工・使用のすべての段階でヒューマンエラーが発生する可能性があり、このヒューマンエラーが構造物の安全性を低下させ、破壊に至らせる重大な原因の一つとなる。

ヒューマンエラーが発生すれば、構造物の抵抗は減少する場合もあるが、反対に増加する場合もある。また、構造物に作用する荷重も増加する場合も、減少する場合もある。しかし、構造物の安全性を評価するためには構造物が危険となるようなヒューマンエラーに注目する必要がある。さらに、構造物の安全性にあまり影響を与えない小さなヒューマンエラーは考慮する必要がない。それゆえ、本研究においてはヒューマンエラーが発生した

場合には構造物の安全性は急激に低下し、それに伴い構造物の破壊確率が增大すると考える。

通常の破壊確率の算定においては構造物に作用する荷重および構造物の抵抗の統計的ばらつきのみを考慮しているが、実際の破壊事例の調査によると構造物の設計・施工・使用におけるヒューマンエラーが原因となっている破壊が多いと報告されている。このため、構造物の安全性をより現実的に評価するためには、ヒューマンエラーの影響を考慮した破壊確率を求める必要がある。本研究においては破壊確率の計算にヒューマンエラーを考慮するための一つのモデルを提案し、このモデルを土留工に適用した事例を紹介する。

#### 1. ヒューマンエラー

##### (1) 構造物の破壊の原因

過去の構造物の破壊記録を整理すると構造物の破壊事例は次のように分類される<sup>1)</sup>。

- ① 挙動が十分に解明されている構造物における設計変数の不確実性の考慮が不十分なことによる破壊。
- ② 挙動が解明されていない構造物における解析法の誤差による破壊。
- ③ 地震・台風・洪水等の異常荷重による破壊。
- ④ 未知の破壊モードによる破壊。

\* 正会員 Ph. D. 鹿島建設(株)土木設計本部技術課長代理  
(〒160/東京都新宿区西新宿2丁目1番1号)

- ⑤ 破壊モードは予知されていたが十分に対応しなかったための破壊.
- ⑥ 不十分な現場管理・意思伝達による破壊.
- ⑦ 経済的・時間的制約による設計・施工時のヒューマンエラーの増加による破壊.
- ⑧ 構造物の誤使用による破壊.

これらの破壊タイプは、ヒューマンエラーが関係するものと関係しないものの二つのグループに分割される。破壊タイプ④は考え方によりどちらのグループに分類してもよいものであるが、⑤～⑧は明らかにヒューマンエラーによる破壊と考えられる。

ヒューマンエラーによる破壊の主な要因は知識の不足・経験の不足・資源の不足であるが、知識・経験・資源が十分な場合にも破壊は発生する。それは意思伝達が不十分な場合であり、実際の破壊の要因の中でこの意思伝達の不足が大きな割合を占めている。プロジェクトの実行においては、設計技術者間あるいは現場技術者間の意思伝達だけではなく、設計技術者と現場技術者の間の円滑な意思伝達が非常に重要である。

通常の信頼性解析においては、ヒューマンエラーが関係しない①～③の破壊のみを取り扱っており、技術者が経験から感じている破壊の頻度とは異なった破壊確率が求まっている。これも信頼性解析が経験豊かな技術者に受け入れられにくい原因の一つであると考えられる。多くの技術者が経験しているように、構造物の破壊はしばしば設計・施工中のささいなケアレスミスにより発生しており、このヒューマンエラーの影響を構造物の安全性評価に考慮すべきである。

## (2) ヒューマンエラーによる構造物の破壊

多くの研究者が実際の構造物の破壊はほとんどヒューマンエラーによるものであると報告しており、*Sowers and Sowers* は矢板式護岸と土留工の破壊例を調査し次のように報告している<sup>9)</sup>。土圧理論の適用の間違い等による破壊は一例もなく、多くの破壊は設計技術者が背面に作用する主要な上載荷重を考慮しなかったため、あるいは使用時に設計荷重以上の荷重が載荷されたためによるものであった。彼らはこの調査より矢板式護岸および土留工の設計・施工においては以下の点に注意すべきであると提案している。

- ① 背面の上載荷重による土圧の増加.
- ② 不十分な切梁等の支保工.
- ③ 矢板変形に対する考慮不足.
- ④ 接合等の構造細目に対する考慮不足.
- ⑤ 鋼材の腐食・劣化.
- ⑥ 施工時の安全性検討の不足.

また、ヨーロッパにおける約800の破壊事例を調査し

た *Hauser* は破壊の主な原因は設計計算に用いる設計値等のチェックの省略にあるとしており、スイスの土木・建築協会 (*Swiss Engineers and Architects Association*) の構造安全性に関する基準作成委員会は、最も有効かつ効率的に構造安全性を向上させる方法は構造解析モデルの精度を向上させることではなく、設計値等のチェックの方法を向上させることであると結論づけている<sup>9)</sup>。

このように多くの研究者が構造物の破壊におけるヒューマンエラーの重要性を述べているが、*Allen* は荷重や抵抗の統計的ばらつきによる破壊は全体の10%以下であり、90%以上は単純なミス・無視・未熟な知識・不十分な意思伝達・現場管理の不手際等のヒューマンエラーによるものであると述べている<sup>9)</sup>。また、*Hauser* の調査からも荷重や抵抗の統計的なばらつきによる破壊は全体の22%程度と推定することができる。

## (3) ヒューマンエラー発生の確率モデル

構造物の破壊に至るような重大なヒューマンエラーは設計・施工・使用の各段階で、ランダムに発生する。また、各プロジェクトにおける重大なヒューマンエラーの発生は独立と考えられる。さらに、重大なヒューマンエラーの発生は非常に稀である。これらの理由よりヒューマンエラー発生の確率モデルとしてポアソン過程を仮定する。ヒューマンエラーは設計・施工・使用の各段階で発生するので次式のように表現される。

$$E = E_D \cup E_C \cup E_O \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $E$  : ヒューマンエラーの発生

$E_D$  : 設計段階のヒューマンエラーの発生

$E_C$  : 施工段階のヒューマンエラーの発生

$E_O$  : 使用段階のヒューマンエラーの発生

これら各段階の担当技術者は一般に別人であるため、各段階におけるヒューマンエラーの発生は独立と考えられる。ゆえに、一つのプロジェクトでヒューマンエラーが発生しない確率は次式で求められる。

$$P(\bar{E}) = e^{-(\nu_D + \nu_C + \nu_O)} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\nu_D$  : 設計段階のヒューマンエラーの平均発生率

$\nu_C$  : 施工段階のヒューマンエラーの平均発生率

$\nu_O$  : 使用段階のヒューマンエラーの平均発生率

## 2. ヒューマンエラーを考慮した破壊確率

ヒューマンエラーが発生した場合には構造物の抵抗が急激に低下したり、作用荷重が増加したりする。このため構造物の破壊確率は増加するがヒューマンエラーの発生機構を解明し、その影響を客観的に把握することは非常に困難な課題である。それゆえ現時点においてはヒューマンエラーの発生頻度、その影響の評価は経験豊かな

技術者の主観的判断に頼らざるを得ないと考えられる。本研究ではヒューマンエラーの影響を破壊確率の計算に考慮するため通常のヒューマンエラーを考慮しない破壊確率を修正するための係数を導入する。

ヒューマンエラーの影響を考慮するための精密なモデルが現在までに提案されているが<sup>5)</sup>、ヒューマンエラーに関する情報は経験者の主観的判断に頼らざるを得ないため、モデルとしては単純なモデルが望ましい。ヒューマンエラーの影響を考慮した現実的な破壊確率は全確率の定理を用いて次のように表わすことができる。

$$P(F) = P(F|E) \cdot P(E) + P(F|\bar{E}) \cdot P(\bar{E}) \dots\dots (3)$$

ここに、

$F$  : 破壊または限界状態の発生

$E$  : ヒューマンエラーの発生

$\bar{E}$  :  $E$  の余事象

$P(F)$  : ヒューマンエラーを考慮した破壊確率

式 (3) の右辺第 1 項に乘法定理を適用すると、

$$P(F|E) \cdot P(E) = P(E|F) \cdot P(F) \dots\dots (4)$$

となり、式 (3) は次のように表わすことができる。

$$P(F) = GE \cdot P(F|\bar{E}) \dots\dots (5)$$

ここに、 $GE$  をヒューマンエラー係数と呼び、

$$GE = \frac{P(\bar{E})}{1 - P(E|F)} \dots\dots (6)$$

式 (5) の  $P(F|\bar{E})$  はヒューマンエラーがない場合の破壊確率であり、通常計算されている破壊確率である。ゆえに、ヒューマンエラーを考慮した破壊確率は通常の破壊確率にヒューマンエラー係数 ( $GE$  係数) を乗ずることにより求められる。  $GE > 1.0$  であるため現実の破壊確率は通常計算される破壊確率より大きくなる。

式 (6) の右辺分子の  $P(\bar{E})$  を式 (2) により求めるためには各段階におけるヒューマンエラーの平均発生率が必要となる。また、式 (6) の右辺分母の  $P(E|F)$  は破壊が発生した場合にヒューマンエラーが発生している確率であり、近似的にはヒューマンエラーにより破壊が発生している確率と考えられる。これら 2 つの情報が得られれば  $GE$  係数を評価することができる。本研究ではこれらの情報を経験豊かな技術者へのアンケートにより求めることとする。

### 3. 土留工の破壊確率

#### (1) 土留工におけるヒューマンエラー

一般に構造物のライフタイムは設計・施工・使用の三段階に分割されるが、土留工においては施工と使用の段階が重複するので、土留工においては設計・施工の二段階に分割して考える。土留工の設計段階のヒューマンエラーには次のようなものが考えられる。

- ① 粘性上におけるヒービング、砂質土におけるボイリング等の基本的な破壊モードの検討もれ。
- ② 重機、資材、既存の構造物等の上載荷重の考慮のもれ。
- ③ 土留壁の根入れ長の検討不足。
- ④ 不適當な土留壁や支保材の使用。
- ⑤ 設計計算のミス。
- ⑥ 不十分な意思伝達。

土留工は地中構造物の施工においては非常に一般的であり施工例が多いため、その挙動や破壊モードは比較的よく解明されている。それゆえ、土留工の設計段階のヒューマンエラーの原因は、設計技術者の経験不足・能力不足・単純ミスあるいは現場の土質条件・環境条件の設計技術者への連絡ミス等である。また、これらヒューマンエラーの発生は仮設であるための工費的・工期的な制約により助長されることが多い。

また、土留工の施工段階のヒューマンエラーとしては次のようなものが考えられる。

- ① 作業管理の不徹底。
- ② 設計と異なった材料の使用。
- ③ 設計技術者の許可を得ない設計変更。
- ④ 不十分な意思伝達。

作業管理の不徹底による不適切な施工順序等は土留工の挙動に大きな影響を与える。例えば、予定掘削深さに到達した直後に切梁を設置しなければ土留壁の変形は時間とともに増加し地表面の過大沈下を生じ、同時に背面地盤の強度の低下にもつながる。設計と異なった材料の使用は単なる施工技術者のミスではなく、経済的な理由によっても生ずることがある。現場技術者は施工を簡単にするため土留工の設計をほんの少し変更することがあるが、設計技術者の承認を得なかったため大事故に至ることもある。

一般に設計は施工時の補助工法等を条件として行われるが、土留工においては補助工法等がしばしば現場技術者に適格に伝えられないことがある。最も一般的な補助工法等の条件は地下水位低下工法・地盤改良工法の実施および余掘り深さの制限であるが、これらのうち余掘り深さの制限はしばしば正確に伝えられないことが多い。

#### (2) ヒューマンエラーの調査

$GE$  係数を評価するためにヒューマンエラーに関するアンケートを日本の総合建設会社で実施した<sup>6)</sup>。アンケートの対象となった技術者は 61 名であり、そのうち 36 名は設計技術者、他の 25 名は現場技術者である。技術者の経験年数は Fig. 1 に示すように 5 年から 24 年の間に分布しており平均は 14.9 年であった。

アンケートではまずヒューマンエラーに関する解説を

行った後、土留工について次の4項目について質問を行った。ここではヒューマンエラーのうち、構造物の安全性に重大な影響を与えるものを対象として質問に答えていただいた。また、4項目とも非常に答えづらい質問であるが技術者としての経験および主観的判断に基づき回答していただくようお願いした。

- ① 土留工が破壊した場合に設計または施工においてヒューマンエラーが発生している割合。
- ② 質問①に対する回答を設計および施工段階に分類すること。
- ③ 土留工の設計段階でヒューマンエラーが発生する頻度。
- ④ 土留工の施工段階でヒューマンエラーが発生する頻度。

質問①、②については10%単位で図に記入する形式

とし、質問③、④については複数の回答から1つを選択する形式とした。また、質問④については、時間的に余裕がない場合および余裕がある場合の2ケースについてアンケートを行った。

質問①～④に対する回答のヒストグラムをFig. 2～5に示す。アンケート実施前には経験年数の違いにより回答に差が出ると予想されたが今回のアンケート結果からはその傾向は見られなかった。しかし、設計技術者と現場技術者の間では意見に次のような差が見られた。

- ① 設計技術者は現場技術者より破壊がヒューマンエラーにより発生する割合が大きいと考えており、設計技術者が与えた  $P(E|F)$  の平均値と現場技術者が与えた  $P(E|F)$  の平均値の比は1.24である。
- ② 現場技術者はヒューマンエラーは施工より設計で多く発生すると考えており、 $P(E_D|F)/P(E_C|F)$  の

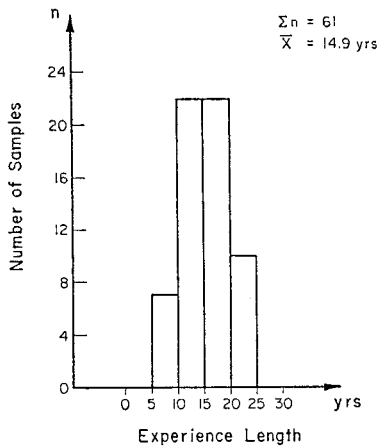


Fig. 1 Distribution of Experience Length

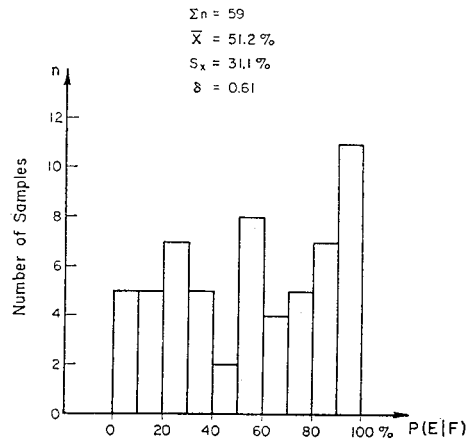


Fig. 2 Histogram for Human Error Given Failure

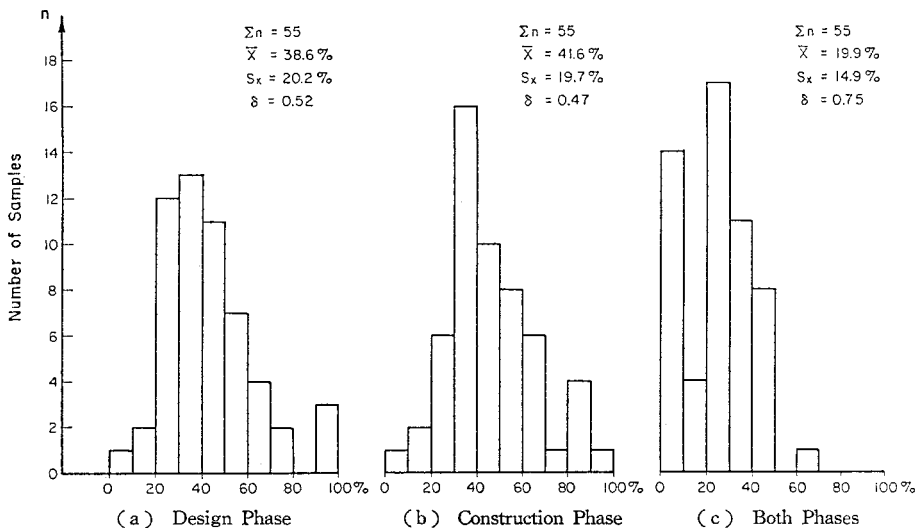


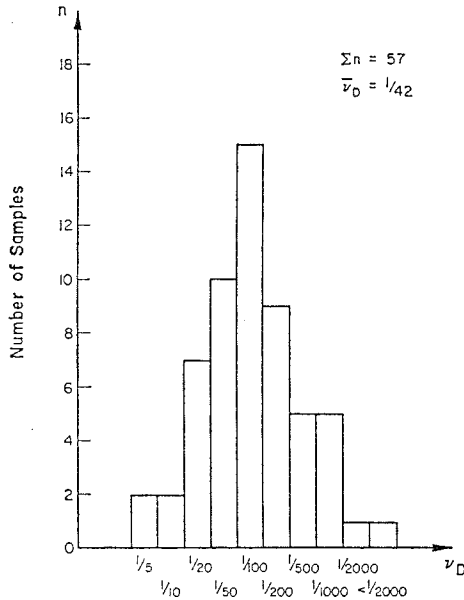
Fig. 3 Histogram for  $P(E|F)$  in Three Phases

平均値は 1.35 となっている。反対に、設計技術者はヒューマンエラーは設計より施工で多く発生すると考えており、 $P(E_D|F)/P(E_C|F)$  の平均値は 0.70 となっている。

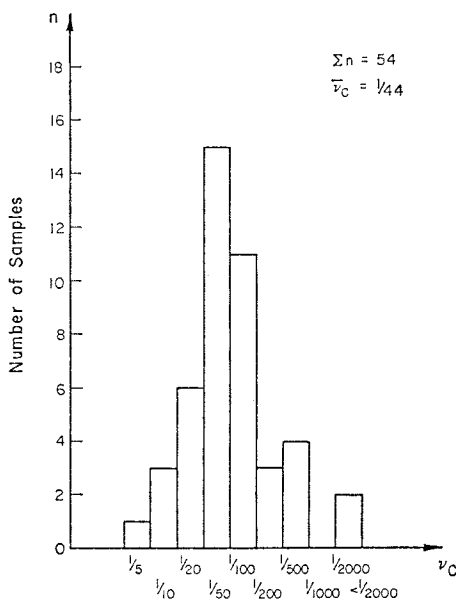
③ 設計技術者は現場技術者よりヒューマンエラーの発生頻度が大きいと考えている。

アンケート結果のまとめを **Table 1** に示す。今回の

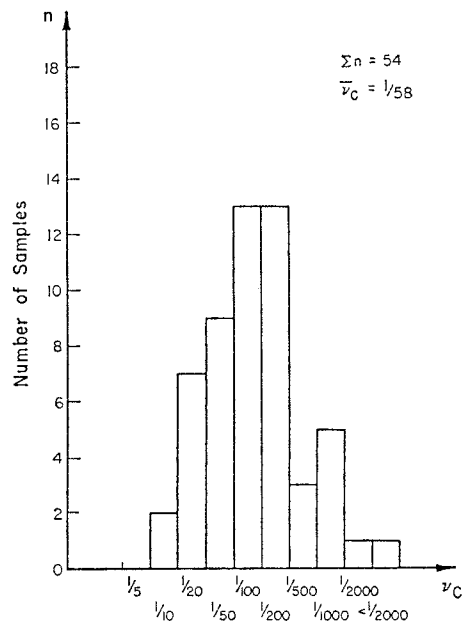
アンケート調査の結果から判断すると、破壊の中でヒューマンエラーが関係しているものは平均的には全体の約半数であるが、傾向的には右上がりとなっており破壊の90%以上にヒューマンエラーが関係していると考えている技術者が11名と最も多い。また、ヒューマンエラーは設計および施工の各段階でほぼ同じ割合で生じていると考えられる。ヒューマンエラーの発生頻度は土留工



**Fig. 4 Histogram for Mean Occurrence Rate of Design Errors**



(a) Short-Term Project



(b) Long-Term Projects

**Fig. 5 Histogram for Mean Occurrence Rate of Construction Errors**

**Table 1 Summary of Survey on Human Errors**

(1) Probability of Human Error Given Failure

	Mean	C.O.V.
$P(E F)$	0.51	0.61
$P(E_D F)$	0.33	0.52
$P(E_C F)$	0.35	0.47
$P(E_D E_C F)$	0.17	0.75

(2) Mean Occurrence Rate of Human Error

	Mode	Range*
Design Phase : $\nu_D$	1/100	1/50 ~ 1/200
Construction Phase : $\nu_C$		
(Short-term)	1/50	1/20 ~ 1/100
(Long-term)	1/100	1/50 ~ 1/200

\* Most frequent range.

50~100 件に 1 回である。時間的な余裕がない工事と時間的な余裕がある工事のヒューマンエラーの発生頻度の比の平均値は 1.35 であり、時間的な余裕がない工事においてはヒューマンエラーの発生が頻繁であると考えられている。

(3) ヒューマンエラー係数

アンケート結果のまとめより次のようなヒューマンエラーの平均発生率が得られる。

設計段階： $\nu_D=0.01/\text{工事}$

施工段階： $\nu_C=0.02/\text{工事}$  (時間的な余裕がない場合)

$\nu_C=0.01/\text{工事}$  (時間的な余裕がある場合)

これらの平均発生率を用いると  $GE$  係数は次のように表わせる。時間的な余裕がない工事に対しては、

$$GE = \frac{0.97}{1 - P(E|F)} \dots\dots\dots (7)$$

また、時間的な余裕がある工事に対しては、

$$GE = \frac{0.98}{1 - P(E|F)} \dots\dots\dots (8)$$

となる。Fig. 6 に式 (7), (8) を示す。

破壊が生じた場合にヒューマンエラーが発生している割合としてアンケートの平均値 0.51 を用いると、 $GE$  係数は時間的な余裕がない場合および時間的な余裕がある場合に対しおのおの 1.98, 2.00 となる。また、アンケートの平均値+標準偏差の値を用いると、おのおの 5.39, 5.44 となる。すなわち、土留工の現実の破壊確率を求めるためには、ヒューマンエラーの影響を考慮せずに求めた通常の破壊確率を約 2~5 倍すればよいことになる。

$GE$  係数の分子、すなわち、ヒューマンエラーが発生しない確率はヒューマンエラーの発生頻度が小さいためほぼ 1.0 と考えられる。このためアンケートの精度を考慮すると式 (6) は次のように書き直すことができる。

$$GE \doteq \frac{1}{1 - P(E|F)} \dots\dots\dots (9)$$

ゆえに、 $GE$  係数を求めるためには実際には  $P(E|F)$  のみが必要である。

1. (2) で紹介した Allen および Hauser の破壊におけるヒューマンエラーの占める割合の推定値を用いると、 $GE$  係数は式 (9) よりおのおの 10.0, 4.5 となり今回のアンケート結果より求めた値より少し大きいがいほぼ一致すると考えられる。

あとがき

構造物の安全性を評価するためには設計・施工・使用の各段階におけるヒューマンエラーの影響を考慮する必要があることを示し、ヒューマンエラーの影響を考慮し

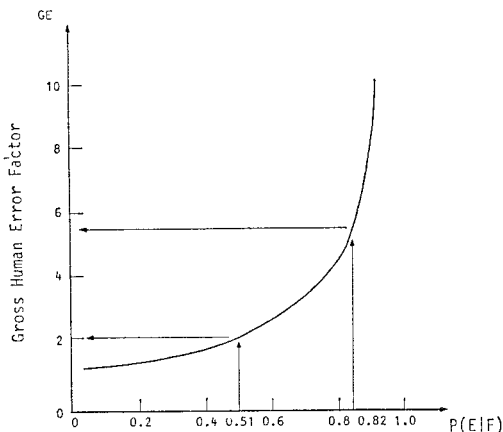


Fig. 6 GE as Function of P(E|F)

て破壊確率を求めるための簡単なモデルを提案した。このモデルでは、ヒューマンエラーの影響を考慮するためにヒューマンエラー係数を導入しているが、この係数を評価するためには、破壊が生じた場合にヒューマンエラーが発生している割合、あるいは、破壊がヒューマンエラーにより発生している割合が必要であり、この割合  $P(E|F)$  は経験豊かな技術者の主観的判断より求めることができることを示した。今回は土留工にこのモデルを適用しヒューマンエラーを考慮した破壊確率は通常計算される破壊確率の約 2~5 倍に達することを示した。

今後は、破壊事例の収集・解析を行いデータを蓄積していくとともに、今回行った技術者へのアンケートの方式を研究し、さらに精度のよいアンケート方式を確立し構造物の安全性に関する技術者の貴重な意見を安全性の評価に反映させていくべきである。また、ヒューマンエラーの発生機構の解明およびヒューマンエラーが構造物の安全性に与える定量的な影響の把握のための地道な研究も進めていく必要がある。

参考文献

- 1) Blockley, D.I. : Analysis of Structural Failures, Proceedings, ICE, Part 1, Vol. 62, February (1977).
- 2) Sowers, G.B. and Sowers, G.F. : Failures of Bulkhead and Excavation Bracing, Civil Engineering, ASCE, Vol. 37, No. 1, January (1967).
- 3) Hauser, R. : Lessons from European Failure, Concrete International, ACI, Vol. 1, No. 12, December (1979).
- 4) Allen, D.E. : Limit State Design—A Probabilistic Study, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 1, 1975.
- 5) Lind, N.C. : Models of Human Error in Structural Reliability, Structural Safety, Vol. 1, 1983.
- 6) Yamamoto, M. and Ang, A. H-S. : Reliability Analysis of Braced Excavation, University of Illinois, C.E. Studies, SRS No. 497, 1982.