

施工中構造物の設計代替案の確率論的評価法

PROBABILISTIC EVALUATION OF DESIGN ALTERNATIVES FOR STRUCTURES UNDER CONSTRUCTION

隈 元 力*・石 井 清**・星 谷 勝***

By Tsutomu KUMAMOTO, Kiyoshi ISHII

and Masaru HOSHIYA

This paper describes a probabilistic evaluation method of design alternatives for structures under construction to assess their safety in view of economical aspects. In the evaluation, a construction period is divided into several terms corresponding to the construction stages and several possible failure modes are considered in every term. The magnitudes of loads are estimated statistically by the extreme-value distribution. Delay or additional expense due to a failure is intuitively estimated by engineers for every damage level in each construction stage. The estimates are based on many parameters evaluated synthetically, in which the total anticipated expense and the additional expense required to fix the failure are included. The proposed evaluation method has been applied to a harbour-construction to verify its applicability and efficiency.

Keywords : construction procedure, design, safety, economics, probability theory, docks

1. はしがき

完成後の土木構造物が有する安全性は、各種の規準・指針等をガイドラインとして設計の段階で十分に検討されることから、よほど大きな計算ミスや施工管理の手落ち（手抜き）がなければ、構造安全性の不安は少ない。一方、その構造物が完成するまでの施工段階における仮設および施工中本設構造物（以下、施工中構造物と呼ぶ）は、多くの場合、現場技術者が経験に基づき施工計画を立案し、規準・指針等に準拠してその安全性を確認し、実施に移すものである。しかしながら、このような確認を踏まえても、施工中構造物の安全性が問題とされるような事故は後をたたない。特に、施工中構造物の破壊事故は、施工者にとって大きな経済的損失を与え貴重な人命を失うこともある。

施工段階における事故が多い理由は、発注者および受注者が経済性を優先するあまり仮設工事を軽視する従来の安易な姿勢にもようが、土木構造物が自然を相手に

するために本来、不確定な要因が多いこと、施工中の構造物が構造力学的にみて不安定なものである場合が多いこと、さらに、施工の進捗によりしだいに強度条件が変わることなどから決定的な設計方法が確立していないことなどが大きな理由といえる^{1)~3)}。

また、最近の土木工事の大規模化、複雑化に伴い施工条件はますます厳しさを増し、従来に例をみない施工計画が考えられることも多くなってきている。このことから、施工計画を作成する時点で、考えられるいくつかの代替案の中から安全性・経済性を加味した最適案を合理的に評価・決定する手法の開発は建設業にあって急務なものといえる。本報告では、施工中構造物の安全性、初期建設費、また事故による損失費等を考慮して、施工計画の中で考えられるいくつかの代替案の中から最適案を選び出す方法を提案するものである。提案する方法は、港湾構造物を想定して作成したものであるが、一般的の施工中構造物にも広く適用可能である。この種の研究・文献としては、施工中構造物の設計法（異常に対する対策法を含む）^{3)~5)}、施工中構造物の構造（信頼性）解析⁶⁾、また、施工時の荷重設定^{7)~10)}などに関するものがあるが、安全性・経済性を加味した評価法について主題とした研究はない。

* 正会員 技術士 清水建設（株）土木本部見積部長
(〒104 中央区京橋 2-16-11)

** 正会員 工博 清水建設（株）大崎研究室主任研究員
(〒100 千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

*** 正会員 Ph.D. 武藏工業大学教授 工学部土木工学科
(〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

2. 評価に際しての前提条件

施工中構造物の安全度を適切に評価することを困難にしている要因として次のものが考えられる。

① 目的とする構造物（本設構造物）や各種与条件により、その手段となる構造物（仮設構造物）および施工計画がその都度大きく変わること、

② 本設、仮設構造物を含む施工中構造物の耐力（強度）が、施工の進捗に従って変動すること、

③ 荷重外力の中には、季節的に、その確率統計的な特性を変えるものがあること。たとえば、風荷重には、台風、東シナ海低気圧のシーズンといったものがある。

④ 事故の回数が限定できないこと、

⑤ 事故（施工中構造物の損傷）の程度が特定しにくいこと、また、その対策・復旧方法も現状復帰ではなく抜本的な変更があり得ること、

⑥ 損傷に伴う復旧日数や損失額の予測が難しいこと、

⑦ 施工業者に納期厳守の思想があり、工事の大幅な遅れに対して突貫工事も辞さないこと、

⑧ 現行の請負制度上から、特殊な場合を除き施工方法に先行して工事金が決定されることが多い。したがって、施工方法の選択肢は予算面から限定されてくること、

⑨ 土木構造物の設計時に、施工上の入念な配慮がなされていることはまれであること、

⑩ 発注者、受注者の立場の差から、受注者である施工者が無理を強いられることが多いこと。

さらに、上に述べた各要因は、少なからず相互に関係を持っているので、すべての要因を正しく評価に取り入れることは困難である。また、評価の目的からは、各要因について基本的に正しい認識を持つものであれば、むしろ各要因の取り扱いができるだけ単純化して実用的で適用性にすぐれたものの方が良いとする考え方もある。このことから、本研究では、実用性に主眼をおき、次のような前提条件を設定することにした。

①については問題ないが、対象構造物として港湾構造物を想定した。対象とする施工中構造物は、②以降の要因による影響をすべて受ける。

②施工中構造物の耐力がもつ経時的な変化については、施工中構造物の安全度から施工段階をいくつかに分けることにより、その影響を考慮する。

③荷重強度の変化は、（月ごとの）最大値分布を用いて考慮する。本研究では、最大風速に対する月ごとの最大値分布を用いて、波浪に対する季節変動を表わしている。

④において対象とする事故は、荷重作用により施工中

構造物に生じる構造力学的な損傷によるもののみとする。すなわち、安全管理の手落ちによる事故、人身事故は含めない。また、事故の回数は、2回までとする。ここで、事故回数を2回までと限定した理由は、3回以上、事故を繰り返すようであれば、施工変更あるいは施工計画全体の見直しがあると考えられるためである。

なお、安全管理の手落ちによる構造力学的な損傷に至る事故についても、危険予知分析等から、事故に至る過程が十分に同定され、その発生確率が評価できれば、解析に考慮することができよう。ただし、本研究では、このような場合については、対象外としている。

⑤において荷重作用による施工中構造物の損傷の程度は、数種類、たとえば、軽微な損傷（補修により現状復旧する）と重大な損傷（崩壊：片付け、撤去後、再建）というようにいくつかの組に分けるものとする。また、復旧は、現状復旧のみとする。

⑥損傷に伴う復旧日数や損失額に関する評価は、適当なデータがないことから当該工事を担当している経験を積んだ設計および施工技術者による主観的な評価に基づくものとする。

⑦工事に遅れがでた場合、実際の施工では、その遅れを取り戻すように工期の短縮化がはかられるが、これにより工事費は必然的に増大する。ここでは、この影響を大幅に単純化して、工期の短縮化は考慮せず、損失額の算定についてのみ、工期の遅延日数分に比例した工事費の割り増しをペナルティーあるいは突貫費として計上することにする。

⑧、⑨、⑩は対象外とする。

3. 評価モデル

本評価法は、施工計画を作成する時点で、考えられるいくつかの代替案の中から安全性・経済性を加味した最適案を合理的に評価・決定するものである。各代替案に対する評価のフローを図-1に示す。(1)～(3)では評価モデルにおいて特徴のある部分を中心に説明し、(4)では、代替案相互を比較・評価して最適案を選択する方法を、また、(5)では評価に必要とされるパラメーターを整理した。

(1) 施工履歴インデックス

本来、工事の開始から完成に至る間の施工履歴は、事故の有無、事故の発生時期、回数、損傷の程度等、千差万別な内容をもつものであるが、2で述べた②、④、⑤に対する前提条件から、より限定されたものになる。たとえば、施工段階を2段階に、また、損傷度を軽微な損傷、重大な損傷（崩壊）の2つに分けると、施工中構造物の安全度は、事故回数を2回までとして、図-2に示される15の施工履歴（解析ケース）に分けて評価され

ばよいことになる。ここで、施工段階の数 N と損傷度の区分数 M は、対象とする施工中構造物によって適宜、変更されるものである。

解析ケースは、 N と M が与えられると、以下に示す施工履歴インデックス I を作成することにより、もなく数え上げられる。施工履歴インデックスは、解析ケースの事故履歴を表わすものであり、たとえば、図-2 の解析ケース 7 に対する施工履歴インデックスでは、施工段階 1 で軽微な損傷を受け、さらに施工段階 2 で重大な損傷を受けるという施工履歴を表わすために、



と示される。ここで、損傷の程度は、 $1 \sim M$ の整数で与える。また、施工時期が変わることによって施工中構造物に作用する荷重の確率特性が変化するので、施工履歴インデックスの順番は重要な意味をもつ。図-2では、図の右側に各解析ケースに対する施工履歴インデックス I_k を示している。解析ケース1は、損傷を受けることなく（無事故で）工事が完成することから、施工履歴インデックスは[0]としている。施工履歴インデックスは、後述する各解析ケースの生起確率、復旧日数、損失費の算定に用いられる。

(2) 各解析ケースに対する復旧日数と損失費の評価

評価において考慮される解析ケースが定まると、次のステップとして、各解析ケースの復旧日数と損失費を評価するが、数多くの解析ケースに対して相互に矛盾なく評価を行うことは困難である。そこで、この評価ができる限り機械的に行えるよ

うに、評価を2段階に分け、第1ステップとして、各施工段階における事故の復旧日数と損失費を損傷レベルごとに評価し、第2ステップとして、施工履歴インデックスを用いて各解析ケースの復旧日数と損失費を評価することとした。

また、復旧日数と損失費の評価は、当然対象とする施工内容により個々に大きく異なり、データも十分でないことから、第1ステップの評価は、当該工事を担当する経験豊かな設計および施工技術者による主観的な評価に基づくものとした。もちろん、実際の評価では、評価内容をできるだけ確かなものとするために、同種の施工事例

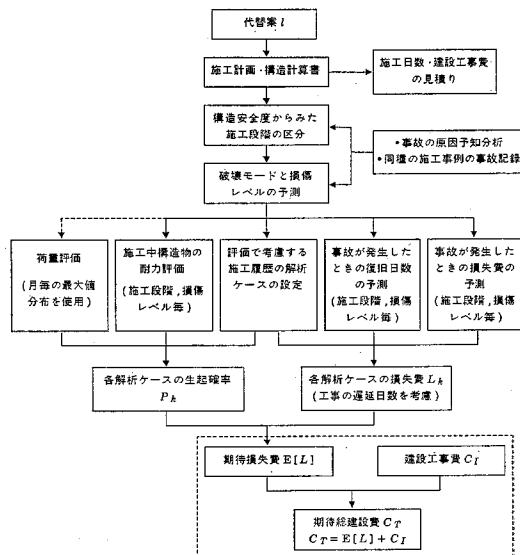


図-1 代替案の評価フロー

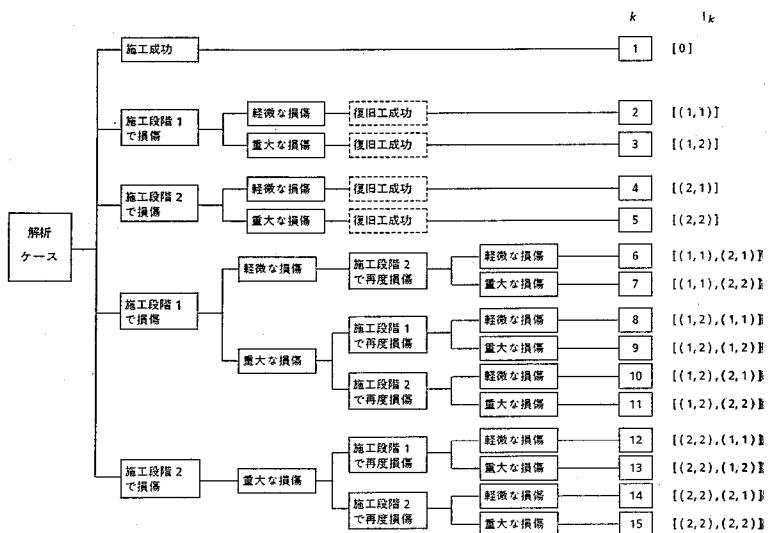


図-2 解析ケースと施工履歴インデックス
 (施工段階 $N=2$, 損傷レベル $M=2$, 事故回数 2 の場合)

にみる事故記録の分析、FTA および FMEA 等を用いた事故の原因予知分析、施工中構造物の施工計画・構造設計書等をもとに事故に至る経過を予測して損傷モードとレベルを決めている。また最終的な評価に用いるパラメーターは、評価結果の見直しを含めて、数人の技術者による話し合いにより決めたものである。

本研究では、検討の結果として、施工段階 i ($i=1, \dots, N$) において損傷レベル j ($j=1, \dots, M$) の事故にあつた場合の復旧日数 $T_{i,j}$ と損失費 $L_{i,j}$ を次式を用いて算定することとした。

復旧日数：

$$T_{i,j} = \alpha_{i,j} \sum_{l=1}^i T_l \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

損失費：

$$L_{i,j} = \beta_{i,j} \sum_{l=1}^i C_l \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここで、 T_i および C_i は、施工段階 i における工事日数と工事費であり、 $\alpha_{i,j}$ と $\beta_{i,j}$ は、評価の対象となる定数である。式(2)では、復旧日数（損失費）は、施工段階 i までの延べ工事日数（工事費）をもとに算定するものとしている。

また、事故により重大な損傷（崩壊）を受けたときは、土木工事損害保険（以下、工事保険と呼ぶ）において採用されている次のような算定式を用いることもできる^{11),12)}。すなわち、施工中構造物が破壊（崩壊）した場合、工事は片付け、撤去の後、施工段階 1 から構造物を作り直すことになる。したがって施工段階 i において重大な損傷を受けたときの損失費は、前施工段階までに要した工事費に、施工段階 i のどの時点で事故が発生するのかは不明であるので平均値として施工段階 i に要する工事費の 2 分の 1 に当たる費用を加え、さらに片付けに要した費用を付け加えることにより評価されている。

$$L_{i,M} = \sum_{l=1}^{i-1} C_l + \left(\frac{1}{2} + \beta_{i,M} \right) C_i \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、損傷レベルを表わす 2 つ目の添字は、これ以上の損傷レベルはないので損傷レベルの数である M としている。上記、式(4)は、式を変形して係数を変換すれば、式(3)と同様の表示になる。

さて、 $T_{i,j}$ が与えられれば、解析ケース k に対する工事の損失日数 T_{k*} は、次式で求めることができる。

$$T_{k*} = \sum_{I_k > (i,j)} T_{(i,j)} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここで、 $I_k > (i,j)$ は、解析ケース k に対する施工履歴インデックス I_k に含まれる (i,j) の組合せである。

各解析ケースに対応する工事の損失費 L_k は、次式で与えられるものとする。

$$L_k = \sum_{I_k > (i,j)} L_{(i,j)} + r_k * L_p T_{k*} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

$$= L_k + r_k * L_p T_{k*} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

ここで、 L_k は解析ケース k における直接的な損失費であり、式(7)の第 2 項は工事の遅延に伴う割り増し費である。この割り増し費は、工事の損失日数 T_{k*} に一日当たりの工事費の割り増し額 L_p と解析ケース k の施工履歴から経験的に定められる補正係数 r_k との積で与えられるものとしている（本研究では $r_k = 1.0$ ）。

(3) 各解析ケースの生起確率

各施工段階に要する工事日数と事故による工事の復旧日数が定まると、施工履歴インデックスを参照することにより、各解析ケースにおいていかなる施工段階がどの時期に施工されるかが決まる。さらに、施工時期が確定

することで外力の確率特性が決まり、施工中構造物の耐力との関係から事故による損傷確率、あるいは、損傷を受けない確率（非損傷確率）が算定される。そして、各解析ケースの生起確率は、損傷確率、あるいは、非損傷確率の積の形で求められる。ここでは、図-1 に示される例題について、施工履歴インデックスを参照して、各解析ケースの生起確率がどのようにして求められるのかを説明する。

解析ケース 1、すなわち、施工中構造物が全く損傷を受けずに施工が完了する確率 P_1 は、

$$P_1 = P_s = (1 - P_{f1})(1 - P_{f2}) \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

で与えられる。ここで、 $(1 - P_{f1})$ と $(1 - P_{f2})$ は、それぞれ 1, 2 の施工段階で、何ら損傷を受けない確率であり、それぞれ独立であると仮定して、次式により与えられる。

$$1 - P_{f1} = P(R_{1,1} \geq S | T_S, T_1)$$

$$= \int_0^{\infty} \int_0^{R_{1,1}} f_{1,R}(r) f_S(s | T_S, T_1) ds dr \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$1 - P_{f2} = P(R_{2,1} \geq S | T_S + T_1, T_2)$$

$$= \int_0^{\infty} \int_0^{R_{2,1}} f_{2,R}(r) f_S(s | T_S + T_1, T_2) ds dr \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

ここで、 $f_{i,R}(r)$ は施工段階 i における耐力 R の確率密度関数であり、 $R_{i,1}$ は施工段階 i における損傷を受けることのない限界の耐力を示す。また、 $f_S(s | T_k, T_l)$ は期間 $T_k \sim T_k + T_l$ における荷重 S の確率密度関数であり、 T_S は工事の開始時期を示す。

いま、耐力を確定値とすると、式(9)と(10)は次のようになる。

$$P(R_{1,1} \geq S | T_S, T_1) = \int_0^{R_{1,1}} f_S(s | T_S, T_1) ds \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

$$P(R_{2,1} \geq S | T_S + T_1, T_2)$$

$$= \int_0^{R_{2,1}} f_S(s | T_S + T_1, T_2) ds \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

4. における解析例では、式(11),(12)を用いて、荷重の確率密度関数を最大風速に対する月ごとの最大値分布で与え、耐力は確定値として荷重と同じ単位で表わすことにより計算の単純化を図っている。

解析ケース 7 の生起確率は、次のように求められる。解析ケース 7 の施工履歴は、施工履歴インデックス $I_7 = [(1,1), (2,2)]$ から、施工段階 1 で軽微な損傷を受け、その補修を済ませ施工段階 2 に進み、施工段階 2 で再度、重大な損傷を受けることになる。この場合の生起確率 P_7 は、次式で与えられる。

$$P_7 = P_{f1,1} P_{f2,2} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

ここで、 $P_{f1,1}$ は施工段階 1 で軽微な損傷を受ける確率、 $P_{f2,2}$ は施工段階 2 で重大な損傷を受ける確率である。さらに、それぞれの確率は、施工時期によって荷重の統計値が変化することから、このパラメーターを含めて表記すると次のように表わされる。

$$P_7 = P(R_{1,2} \geq S \geq R_{1,1})|T_S, T_1) \\ \times P(S \geq R_{2,2}|T_S + T_1 + T_{1,1}, T_2) \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここで、 $P_{f2,2}$ の算定では、施工段階2の工事の開始時期を施工段階1における事故の復旧日数分として($T_{1,1}$)遅らせている。なお、片付け(重大な損傷を受けた場合は片付け・撤去)の作業中に事故にあうことはないとしている。

表-1には、各解析ケースに対する生起確率を、(工事の開始時期と期間については省略した形で,)示している。各解析ケースに対する生起確率を加え合わせたものは、確率1.0になる。生起確率の計算は一見煩雑であるが、実際の計算では、コンピュータを用いて、工事日数、復旧日数、荷重に関する統計値、構造物の耐力等を入力すると、施工履歴インデックスをもとに算定するようになっている。

(4) 各代替案の期待損失費と最適代替案の評価基準
各解析ケースの生起確率 P_k と損失費 L_k が計算されると、施工中構造物の期待損失費 $E[L]$ は、次式により求められる。

$$E[L] = \sum_{k=1}^K P_k L_k \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 K は解析ケースの総数である。さらに、上で求められた期待損失費と建設工事費(初期建設費)を加えることにより、代替案の期待総建設費が求められる。

$$C_T = C_I + E[L] \quad \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 C_T は期待総建設費、 C_I は建設工事費である。いま、最適案の選択基準として、期待総建設費最小化の原則によれば、設定された代替案についてそれぞれ期待総建設費を算定し、その中で期待総建設費が最小となる

表-1 解析ケースとその生起確率(図-2の例)

k	生起確率* P_k
1	$(1-P_{f1})(1-P_{f2})$
2	$P_{f1,1}(1-P_{f2})$
3	$P_{f1,2}(1-P_{f1})(1-P_{f2})$
4	$(1-P_{f1})P_{f2,1}$
5	$(1-P_{f1})P_{f2,2}(1-P_{f1})(1-P_{f2})$
6	$P_{f1,1}P_{f2,1}$
7	$P_{f1,1}P_{f2,2}$
8	$P_{f1,2}P_{f1,1}$
9	$P_{f1,2}P_{f1,2}$
10	$P_{f1,2}(1-P_{f1})P_{f2,1}$
11	$P_{f1,2}(1-P_{f1})P_{f2,2}$
12	$(1-P_{f1})P_{f2,2}P_{f1,1}$
13	$(1-P_{f1})P_{f2,2}P_{f1,2}$
14	$(1-P_{f1})P_{f2,2}(1-P_{f1})P_{f2,1}$
15	$(1-P_{f1})P_{f2,2}(1-P_{f1})P_{f2,2}$

$$P_{f1} = P_{f1,1} + P_{f1,2} \\ P_{f2} = P_{f2,1} + P_{f2,2}$$

案を最適代替案として選択することになる¹³⁾。

実際の評価では、期待総建設費のほかにも、次に示す判断基準から総合的な評価を下して最適な代替案を選択する。

- ① 構造物の強度は、工事が完成した段階において、規準・指針等のガイドラインを満足すれば良い。したがって、施工のために完成後における構造物の耐力を大きくすることはできる限り避ける。
- ② 計算で求められた期待損失費が、工事保険の保険料と比べて著しく大きくなること。
- ③ 施工中構造物の耐力が不足すると考えられる工事日数と事故が発生したとの条件下で計算される損失日数(期待値と標準偏差で評価)が短いこと。

ここで、②は次のような理由から1つの判断基準としたものである。工事保険は、大数の法則を基本としており、その料率(工事費1円当たりの保険料)は事故統計から定められている^{11),12)}。さらに工事保険は工事の着工から完成引き渡しまでの間におよそ工事現場で起こるほとんどすべての損害をてん補するオールリスク担保形式の保険であり、保険が引き受けられれば、今回評価の対象としているリスクも当然担保されることになる。このことから、保険の引受けの対象となる安全度を1つの目安として、算定された期待損失費が保険料(損害保険の料率×建設工事費)とほぼ同額程度となるようにすれば良いであろうとの考えによる。

(5) 評価に必要なパラメーター

代替案を評価するためには、(1)~(3)で述べた多くのパラメーターが必要となる。これらのパラメーターを整理すると、次のようになる。

(a) 施工計画に関する一般情報: ①工事期間 T (日)/②工事の開始時期 T_S (日)/③建設工事費(初期建設費) C_I (千円)

(b) 施工中構造物の耐力および事故による被害算定に関する情報: ①(施工中構造物の安全度からみた)施工段階の区分数 N /②損傷レベルの数 M /③各施工段階の工事日数 T_i (日)と工事費 C_i (千円)/④施工段階 i において損傷レベル j の事故が発生したときの復旧日数 $T_{i,j}$ (日)と損失費 $L_{i,j}$ (千円)/⑤施工段階 i における損傷レベル j に対する施工中構造物の耐力 $R_{i,j}$ /⑥工事遅延に伴う工事費の割り増し費 L_p (千円/1日)/⑦工事遅延に伴う工事費の割り増し費算定における補正係数 γ_k ^{*}($k=1, \dots, K$) ここで、添字 i は($i=1, \dots, N$)、添字 j は($j=1, \dots, M$)である。

(c) 荷重の統計特性に関する情報: ①(4.に示す例では)サイトにおける最大風速に関する(月別の)最大値分布。

4. 港湾構造物の施工計画への適用

港湾構造物への適用例として、ドック建設工事のうち、ポンプ室工事の施工計画に本評価法を適用した。ドック建設工事の内容については、文献15), 16)に紹介されていることから、ここでは、評価の対象としたポンプ室工事についてのみの概略を記す。ポンプ室はドックの注排水を行うための設備を備えた地下3階建てのRC構造物（縦20.0m×横24.0m×高19.8m）であり、ドック前面の開閉式扉の鉛直戸当たりを兼ねて、右舷渠口部に配置されている（図-3、図-4）。また、通常のドックは仮締切り（二重締切り構造）を構築して、その中で工事が進められる。当工事の場合には、

各種工法を比較した結果、稼働している岸壁や公共水路に近く、船舶の航行障害となることおよび工期の関係から、一重締切りと一部水中施工により構造物を構築する

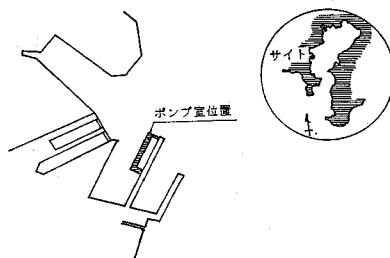
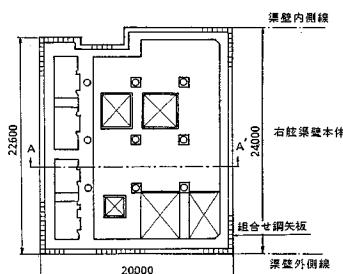


図-3 ドック位置図

平面図(A-A'断面)



立面図(A-A'断面)

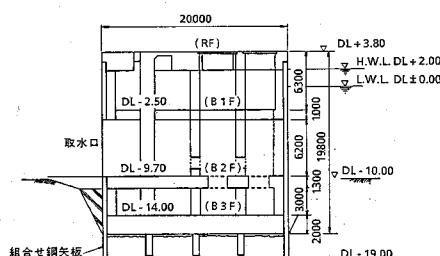


図-4 ポンプ室外形寸法

合計工事日数 365 日

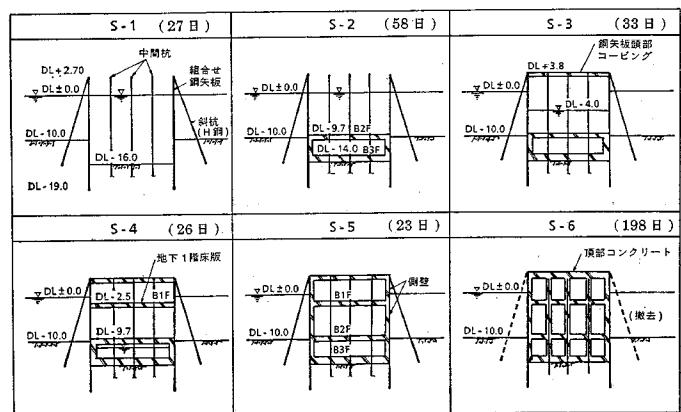


図-5 ポンプ室施工手順

工事日数は U_{20} 代替案に対するもの、カッコ内の数字は各施工段階の工事日数

という過去に例のない海上・海中施工方法が最適工法の1つとして選定されるに至った¹⁶⁾。なお、二重締切りによると、工費は10億円のプラスとなり、工期も長くなる。

ポンプ室の工事日数は、約1年であり、海上工事特有の危険要素となる台風、東シナ海低気圧のシーズンを最低1回は迎えることになる。施工中構造物が不安定となる時期は、当然このシーズンを外すが、施工中構造物の安全性は、特に重要な検討項目の1つとされた。施工検討に当たっては、施工中構造物に対していかなる設計荷重（波高を決める風速）を設定しておけば良いかということが、設計者・施工者の最大の関心事になった。施工計画書では、当初、再現期間を経験的に定めて設計風速を求め⁹⁾、過去の経験から波高を定めて施工中構造物の安全性を照査した。しかし、この方法では本設・仮設構造物を含めた施工中構造物に対する合理的な外力の設定、評価には至らなかった。

ポンプ室の施工段階は、構造力学的にみて、図-5に示される6つの段階に分けた。

(1) 施工段階1(S-1)では、海底の底面掘削、水中捨てコンクリート工に引き続き行われる組斜杭による波浪支保工と中間杭の打設、および組合せ鋼矢板による一重締切りが行われる。鋼矢板頭部は斜杭(H鋼)で固定し、波圧、水圧、潮流等の外力に抗する構造となっているが、構造的には施工中で最も不安定である。工事日数は、約1か月である。

(2) 施工段階2(S-2)では、水中コンクリート工により地下3階部分の底版・側壁と地下2階部分の床版が構築される。この施工には、大組筋型枠工法と高品質水中コンクリート(JOILUC)が用いられている。施工には、約2か月を要する。

(3) 施工段階3(S-3)では、頭部のコーピング工およ

より中間杭の中詰めコンクリート工を行った後、DL-4.0 m への水替えを行う。

(4) 施工段階 4(S-4) では、地下 1 階部分の床版を構築した後、DL-9.7 m への水替えを行う。

(5) 施工段階 5(S-5) では、地下 1 階および 2 階部分の側壁が作られる。構造的には、波浪支保工があることから、完成後の単独構造物よりも安定している。

(6) 施工段階 6(S-6) では、地下 3 階部分のほか、各階の整備、頂版コンクリート、集水栓の製作、渠壁工などが行われ、最後には波浪支保工が撤去され、右舷渠壁本体と結合される。構造的には、完成後の構造物とほぼ同様と考えられる。

さて、設計代替案としては、施工段階の 1 と 2 における施工中構造物の耐力に直接的に反映されるパラメーターとして、設計風速を 10 m/s から 35 m/s まで 5 m/s きざみに変化させて 6 つの代替案（以下、U₁₀～U₃₅ と記す）を作成した（表-2 参照）。代替案は、使用鋼矢板、H 鋼杭、腹起し等の規格を変更したもので、施工中構造物の耐力のほかに、工事日数や建設工事費が当然異なる。耐力が大きくなるに従って、建設工事費は徐々に増加するが、工事日数は使用材料の規格（大きさ）等による作業効率から単純には増加していない。図-6 には、代替案 U₂₀ に対する日程管理曲線を示している。他の代替案においても、(S-1) の工事日数と工事費が異なるだけで、(S-2) 以降は変わらない。

各施工段階の損傷レベルは、次のように想定した。施工計画における構造計算書によれば、(S-1)～(S-2) では、組合せ鋼矢板、H 鋼による斜杭、腹起しを主要構造部材として、応力度のチェックが行われ、さらに、(S-3) 以降では、頭部コーピング、床版を含めた主要構造部材の応力度の計算を行った。このことから、解析では、設計における構造計算のやり方に従って、主要構造部材の応力度が許容応力度、降伏応力度、そして、極限応力度（破断）になる最大風速を逆算により求めた（風速から波力への換算には SMB 法、合田式¹⁷⁾ を用いた）。結果として、(S-1)、(S-2)、(S-4) では、斜杭の引き抜きが支配的な損傷モードとなり、(S-3) では、組合せ鋼矢

表-2 設計代替案（設計風速をパラメーターとする）

	U ₁₀	U ₁₅	U ₂₀	U ₂₅	U ₃₀	U ₃₅
設計風速	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s	35 m/s
使用鋼矢板	III + III	IIIA + IIIA	III + IV	III + IV	IVA + IVA	IVB + IVB
H 鋼杭	H-400 × 400 × 13/21 @ 5.0	H-400 × 400 × 13/21 @ 4.0	H-400 × 400 × 13/21 @ 2.5	H-400 × 400 × 13/21 @ 2.0	H-400 × 400 × 13/21 @ 1.5	H-400 × 400 × 13/21 @ 1.3
腹起し	H-400 × 400 × 13/21	H-350 × 350 × 12/19	H-300 × 300 × 10/15			
工事日数 T	352 日	355 日	365 日	372 日	379 日	385 日
建設工事費 C	386,375 千円	387,927 千円	401,929 千円	403,593 千円	409,923 千円	410,594 千円

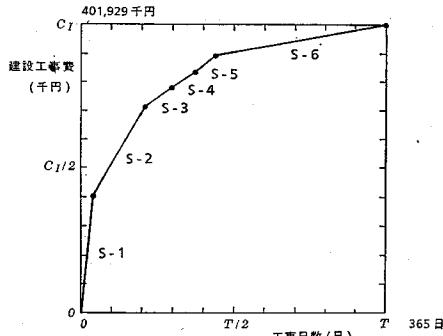


図-6 U₂₀ 代替案に対する日程管理曲線

板と鋼矢板頭部コーピングの損傷が、また、(S-5)、(S-6) では、1 階と 2 階の各側壁の損傷が主要なモードとなることがわかった。また、施工中構造物の耐力は、耐力が最小となる主要な損傷モードを各ステップごとに選定し、その耐力は降伏応力度に相当する風速には耐えられるものの、極限応力度（破断）に相当する風速では倒壊はまぬがれられないとして、事故による損傷レベルを、次に示す 3 つに分けた。

- 軽微な損傷：片付けと簡単な補修で復旧できる損傷。施工中構造物の耐力（の下限値）は、許容応力度以上と降伏応力度未満に相当する風速の間に設定した。
- 中度の損傷：片付けと復旧にある程度の復旧日数と損失費を必要とする損傷であるが、撤去することなく復旧できるものとする。施工中構造物の耐力（の下限値）は、降伏応力度以上で極限応力度未満に相当する風速として設定した。

ただし、(S-5)、(S-6) では、対象とする損傷モードが、施工中構造物の倒壊には関係なく、比較的軽微であることから、復旧日数と損失費は軽微な損傷レベルとして見積った。

- 重大な損傷：施工中構造物は崩壊したものとして、片付け、撤去の後、(S-1) から再度、復旧するもの。施工中構造物の耐力（の下限値）は、極限応力度（破断）以上に相当する風速に設定した。

表-3 には、例として施工段階 1 (S-1) における損傷レベルごとの施工中構造物の耐力を示している。設定された耐力は、降伏応力度に相当する風速を基準値として、軽微な損傷と重大な損傷に対応する耐力を、損傷モードや構造物の安全度を勘案して経験的に定めた。また、表-4 は、U₂₀ に対して設定された各施工

段階における損傷レベルごとの復旧日数と損失費である。表-4では、式(2.2)と(3.2)をもとに復旧日数と損失費を評価しており、カッコのなかの数字が、実際に評価の対象とした数字である。他の代替案に対しても、カッコ内の数字はそのまま使われている。(S-5)と(S-6)における軽微な損傷と中度の損傷に対しては、その復旧日数、損失費ともにわざかしか見込んでいない。なお、パラメーターの設定は、評価の中で実施された感

表-3 施工段階1における施工中構造物の耐力 $R_{1,j}$
($j=1, 2, 3$)

	U_{10}	U_{15}	U_{20}	U_{25}	U_{30}	U_{35}
$R_{1,1}$	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5
$R_{1,2}$	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
$R_{1,3}$	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0

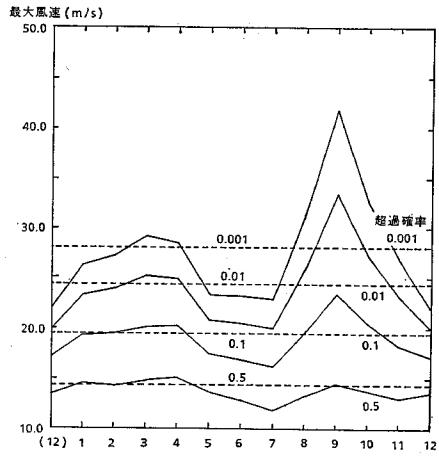
(単位:m/s)

表-4 各施工段階において損傷を受けた場合の復旧日数 $T_{i,j}$
と損失費 $L_{i,j}$ ($i=1, \dots, 6$), ($j=1, 2, 3$)

	復旧日数(日)			損失費(千円)		
	$T_{i,1}(\alpha_{i,1})$	$T_{i,2}(\alpha_{i,2})$	$T_{i,3}(\alpha_{i,3})$	$L_{i,1}(\beta_{i,1})$	$L_{i,2}(\beta_{i,2})$	$L_{i,3}(\beta_{i,3})$
S-1	3(0.1)	19(0.7)	27(1.0)	16,905(0.1)	118,334(0.7)	169,049(1.0)
S-2	9(0.1)	60(0.7)	85(1.0)	28,882(0.1)	202,524(0.7)	289,321(1.0)
S-3	6(0.05)	35(0.3)	118(1.0)	15,834(0.05)	95,002(0.3)	316,674(1.0)
S-4	7(0.05)	43(0.3)	144(1.0)	16,942(0.05)	101,652(0.3)	338,840(1.0)
S-5	8(—)	8(—)	167(1.0)	3,593(0.01)	7,186(0.02)	359,301(1.0)
S-6	8(—)	8(—)	365(1.0)	4,019(0.01)	8,039(0.02)	401,929(1.0)

度解析の結果も参考にしている。また、施工段階を $M = 6$ 、損傷レベルを $N=3$ としたことから、解析ケースは $K=217$ となる。

荷重に対する季節的な変動は、横浜における明治30年から昭和57年までの85年間(データ数86)の月最大風速から求められた最大値分布(第3種極値分布)を用いた。図-7は超過確率を0.5, 0.1, 0.01, 0.001とした月ごとの最大風速の変動を示している。統計的には、12月~2月と5月~7月の最大風速の値は小さく、3月~5月には、東シナ海低気圧が活発になり、また、8~10月は台風のシーズンであるので最大風速の値が大きくなっている。横浜における最大風速の記録は、昭和13年9月1日に観測された風速37.4



実線: 月最大風速から求めた超過確率付最大風速
破線: 年最大風速から求めた超過確率付最大風速

図-7 最大風速の月変動

m/s である¹⁸⁾。なお、計算では1か月を30日としている。

各代替案に対する評価結果を、表-5に示す。工事の開始日は、1月4日としている。表には、施工中構造物が損傷を受けることなく完成する確率 P_s (損傷を受ける確率 P_f)、期待損失費 $E[L]$ 、期待総建設費 C_T 等が示されている。また、図-8には、各代替案の設計風速を横軸にとり、縦軸に

期待総建設費 C_T を示した。この図から、 U_{10} の期待総建設費は他の代替案と比べて非常に大きく、代替案 U_{15} ~ U_{25} に対する期待総建設費が小さいことがわかる。また、期待損失費 $E[L]$ と建設工事費 C_I の比を求めると、 U_{15} で4%, U_{20} で0.7%, U_{25} で0.1%になって

表-5 評価結果

	U_{10}	U_{15}	U_{20}	U_{25}	U_{30}	U_{35}
P_s	0.0114	0.654	0.872	0.9714	0.99827	0.99960
$P_f = 1 - P_s$	0.9886	0.346	0.128	0.0286	0.0173	0.00040
C_I	386,375千円	387,927千円	401,929千円	403,593千円	409,923千円	410,594千円
$E[L]$	127,580千円	15,825千円	2,911千円	507千円	26千円	6千円
C_T	513,955千円	403,752千円	404,840千円	404,600千円	409,949千円	410,600千円
$E[L]/C_I$	0.330	0.0408	0.00724	0.00126	6.34×10^{-5}	1.53×10^{-5}
T	352日	355日	365日	372日	379日	385日
$E[T^*]$	28.2日 (47.7日)	3.4日 (10.2日)	1.2日 (7.9日)	0.26日 (3.7日)	0.014日 (0.43日)	0.003日 (0.31日)
$E[T^* Fail]$	28.5日 (47.8日)	9.8日 (15.4日)	9.3日 (20.5日)	9.0日 (19.9日)	8.1日 (6.3日)	8.5日 (13.2日)

工事開始日: 1月4日

工事の遅延に伴う工事費の増加(日額): 0.3% × 建設工事費

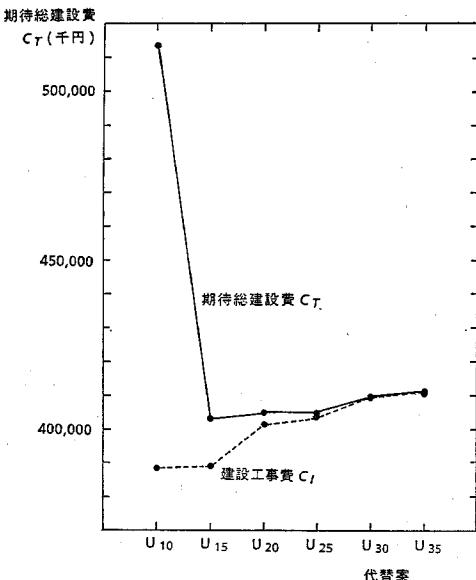


図-8 各代替案と期待総建設費

おり、工事保険の料率 (0.3~0.4%) と比較すると U_{15} の値は 1 桁大きいことがわかる。上記の考察から、設計には U_{20} あるいは U_{25} を採用すれば良いことがわかった。また、事故が発生したとの条件付きの損失日数は U_{20} と U_{25} でほとんど変わらないが、 U_{20} によれば工事日数自体が 1 週間ほど短いことから、 U_{20} を最適案（実施案）として選択することにした。なお、表-5によれば、 U_{20} の案に従って施工を行うと、工事期間中に事故に遭う確率は、0.128 と大きい。これは、解析ケースの生起確率にまで戻って調べるとわかるが、(S-6)において損傷を受ける確率が大きいためである。しかしながら、実際には (S-6) の段階になると、施工中構造物は、隣接する右舷渠壁構造物と結合され、ほとんど完成後の構造物と変わらない耐力を有することから、6か月間の損傷確率は相当に小さく、上記の評価結果は、この部分を安全側に評価しすぎているように思われた。このことから、施工中構造物がより不安定な時期である (S-1) から (S-4) までの間に限って評価をやり直した。結果として U_{20} の案が工事期間中に事故に遭う確率は、0.020 と小さくなり、期待損失費 $E[L]$ と建設工事費 C_I との比も 0.3% 程度になっており、リスクは十分に小さいと判断された。

なお、実際の工事は、2月20日から開始され、施工した年には台風の来襲もなく、日程は当初の計画 (U_{20} で 365 日) より若干、短く 359 日で完成に至った。また、工事開始日のずれによる評価結果への影響は、あまりないことが確認されている。

5. 結論

本報告では、施工中構造物の安全性、初期建設費、また事故による期待損失費等を考慮して、施工計画の中できえられるいくつかの代替案の中から最適案を選び出す方法を提案した。本来、工事の開始から完成に至る間の施工履歴は、事故の有無、事故の発生時期、回数、損傷の程度等により千差万別な内容となり得るが、本評価法では、施工の段階、事故の回数、損傷レベルの数を限定することにより、施工中構造物の安全度を実用的な範囲で評価可能なものとした。荷重についても月ごとの最大値分布を用いることにより、季節変動が考慮できるようになっている。また、計算に用いるパラメーターの中には、事故に遭った場合の復旧日数や損失費など正確に見積りにくいものも含まれるが、これらのパラメーターに対しては、設計および施工技術者による経験をもとに決められるものとした。最適な代替案は、期待総建設費（建設工事費と期待損失費との和）、期待損失費、工事日数、また、事故が発生したとして求められる期待損失日数等を総合して選択したものとした。また、期待損失費に対しては、工事保険の考え方から、当該工事の保険料を安全基準に対する 1 つの目安にすることを提案した。

本評価法を港湾構造物（ドック建設におけるポンプ室の海上・海中工事）の施工計画へ適用した。設計風速をパラメーターとして作成された代替案を評価した結果として、従来、その設定に十分な根拠をもたなかった設計風速も含めて、最適案を決定することができた。

謝 辞：本論文の現場における基礎資料については、横浜支店工事長 末延隆之、同技術課員 加治左近の両氏に労をわざらわした。ここに記して、謝意を表わします。

参考文献

- 1) Lew, H.S. : Construction Failures and Their Lessons, Build. Res. Pract., Vol. 12, No. 5, pp. 272~275, 1984.
- 2) Oberndorfer, W.J. : On the Problem of Temporary Structures, IABSE Period, IABSE Journal, pp. 29~36, 1985.
- 3) 三野 定ほか（隈元 力共著）：土木工事の施工途中の安定計算と実例、近代図書、1976。
- 4) 富樫凱一監修：建設工事の仮設計画と実例、近代図書。
- 5) 福岡正巳編：土木工事施工中の異常と設計変更例、近代図書、1979。
- 6) Karshenas, S. and Ang, A. H.-S. : A Structural Safety Analysis of Steel Buildings During Construction, Structural Safety, No. 1, pp. 239~255, 1983.
- 7) Lew, H.S. : Construction Loads and Load Effects in Concrete Building Construction, Concrete International, pp. 20~23, 1985.4.
- 8) Liu, X., Chen, W.-F. and Bowman, M.D. : Construc-

- tion Load Analysis for Concrete Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 5, 1985.5.
- 9) 栗林栄一・岩崎敏夫: 施工時の地震荷重の決め方についての一提案, 橋梁と基礎, pp. 1~4, 1973.5.
 - 10) 石井 清: 施工中構造物の地震危険度, 土木学会論文報告集, No. 281, pp. 11~16, 1979.1.
 - 11) 保険毎日新聞社編: 建設工事保険の解説, 保険毎日新聞社, 1978.
 - 12) 鹿島出版会編: 建設業における損害保険の上手な掛け方, 鹿島出版会, 1976.
 - 13) 星谷 勝・石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
 - 14) Benjamin, J.R. and Cornell, C.A.: Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, 1970.
 - 15) 照井克明ほか: 三菱重工業(株)横浜製作所3号ドック建設工事, 土木施工, Vol. 26, No. 10, pp. 11~20, 1985.5.
 - 16) 加治左近: 仮締切りなしに海上海中施工・本牧工場3号ドック建設工事について, 清水建設土木 クォータリー, No. 69, pp. 2~16, 1985.12.
 - 17) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計, 波浪工学への序説, 鹿島出版会.
 - 18) 東京天文台編: 理科年表, 昭和61年度版, 丸善, 1986. (1987.1.27・受付)

第2刷完成

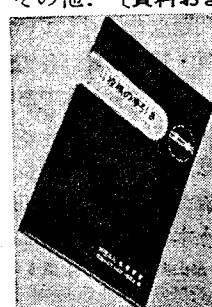
土木学会投稿の手引き・1984年版

A4判 90ページ・折込付録つき 1500円(税込300円)

1971年版を発行して以来13年、要望に応えて全面的に内容を改めた手引書。豊富な例示を中心によく解説した「発表のしかた」のテクニックを詳述した。

- 目次● 第1章 はじめに 1. 投稿の手引きを作った目的 2. 原稿審査の基本的態度 3. 標準化と情報処理 第2章 土木学会誌用原稿の編集の流れ 1. 原稿の受付事務 2. ページ数のチェック 3. 内容の査読 4. レイアウトの設計 5. 組版作業 6. 校正作業 7. 別刷 8. 原稿料 第3章 土木学会誌用原稿の作成 1. 印刷物の出来上がり仕様 2. 原稿用紙 3. 原稿の内容と投稿区分 4. ページ数の制限 5. 数式と欧文 6. 図と写真 7. 表 8. 著作権 9. 原稿の送付 第4章 土木学会論文集用原稿の作成 1. 投稿規則の変遷 2. 和文原稿の作成 3. 英文原稿の作成 第5章 土木学会論文集(第VI部門) 原稿の作成 1. 編集状況と規則等 第6章 オフセット用原稿の作成 1. 目的 2. 活字の大きさと字数 3. 日本語ワードプロセッサーの利用 4. その他。[資料および付録] 資料1. ページ数計算のための数値 2. 写真・図版の割付例 3. 写真・図版の縮少割付例 4. 原稿の長さの計算用紙 5. 標準的な作図用の下敷きと作図例 6. 著者校正 7. 土木学会誌編集方針および投稿規則 8. 土木学会論文集編集方針および投稿要項 9. 年次学術講演会用論文投稿要項 10. ワードプロセッサーを使用した原稿作成方法 11. 研究発表会用スライドの作り方 12. 英文原稿の執筆例 13. 用字・用語のガイド 14. 記号表 15. SI単位の導入および表記法 16. 写真でみる原稿が印刷されて本となるまでの工程 17. 校正記号と校正例

[付録1] 土木学会誌用論文送付票、内容紹介原稿用紙、原稿用紙 2. 土木学会論文集用論文送付票、執筆要項、原稿用紙 3. 全国大会および各種発表会用原稿用紙(ワープロ用・タイプ用・手書き用)



●申込先: 〒160 東京都新宿区四谷1丁目無番地 土木学会刊行物係 電話(03)355-3441(代) 振替東京6-16828