

# LCCに基づく地中RC構造物の耐震設計に関する研究

A study on the aseismic design of the underground reinforced concrete structures based on life-cycle cost

吉田郁政\*, 原田光男\*\*, 福本幸成\*\*\*, 鈴木修一\*\*\*\*, 安中正\*\*\*\*\*

Ikumasa YOSHIDA, Mithuo HARADA, Yoshinari FUKUMOTO, Syuichi SUZUKI and Tadashi ANNAKA

- \*工博 東電設計(株) 原子力土木部 次長 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)
- \*\* 東京電力(株)建設部 土木建築技術センター 課長 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号)
- \*\*\* 東京電力(株)建設部 土木建築技術センター 主任 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号)
- \*\*\*\* 東電設計(株) 原子力土木部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)
- \*\*\*\*\* 東電設計(株) 地震技術部長 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)

In this paper, the optimal design of underground reinforced concrete structures is discussed in the sense of life-cycle cost(LCC). This study is composed of two parts, 1)a set of optimal design with wide range of safety levels, 2)reliability analysis and LCC estimation. In the first step, the optimal design, which means minimum initial cost under a certain safety level, is performed based on ordinary design practice by using Genetic Algorithm. In the second step, the reliability analysis is performed to estimate the failure probabilities of considered limit states. Then the LCC is estimated and optimal design in the sense of LCC is discussed.

*Key Words: underground structures, genetic algorithm, life-cycle cost*

キーワード: 地中構造物, 遺伝的アルゴリズム, ライフサイクルコスト

## 1. はじめに

近年, 土木構造物は性能照査型設計法を採用し, 設計の合理化を図る方向にある。今後更なる合理化を目指し構造物を設計するには, 安全性と経済性のバランスを何らかの判断に基づき評価する必要がある。そのためには安全性の水準と経済性, すなわち建設や損傷に関連するコストについての定量的評価が必要である。安全性水準を定量的に表す量として損傷確率や信頼性指標が, また, 関連する経済性としては建設コスト, 損傷時の補修コスト, 再構築コスト, さらに損傷によって生じる他の施設や社会への影響コスト等が考えられる。損傷確率と損傷により生じるコストの積の総和はリスクと呼ばれている。リスクと初期コストの和は, ライフサイクルコスト (以下, LCCと記す), 期待総費用, トータルコストなどと呼ばれ, これにより最適な安全性レベルを議論することができる<sup>1)</sup>。建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」<sup>2)</sup>では, LCCに基づく最適な安全性レベル (目標水準) についても検討が行われており, 目標水準を設定する上で重要な要素であると述べられている。橋梁設計においてもLCCによる評価への取り組みが見られ<sup>3), 4)</sup>, 次期, 改訂される道路橋示方書では, LCCの考え方に基づく設計方法も示される方向にある。

本研究では, LCCの考え方をを用いて, 地中RC構造物(ボックスカルバート)の耐震設計に関する検討を行う。確率統計の手

法を用いた設計法(信頼性設計)により地震状態に対する構造物の安全性水準(損傷確率)を評価し, さらに建設コストや損傷時のコストよりLCCを算定して, それに基づいて設計案の評価を行う。

LCCの考え方の概念図を図-1に示す。横軸を安全性レベル, 縦軸を費用とすると, 初期コストは安全性レベルを向上させると高くなり右上がりの曲線となる。損傷時のコストと損傷確率の積で表されるリスクは安全性レベルの向上とともに低くなり右下がりの曲線となる。LCCはこの2つの曲線を足し合わせたもので, 下に凸の曲線となり, その最小値が求めるべき設計案となる。LCCを目的関数とする最適化手法を適用して, 直接その最小点を検索することも定式化上は可能であるが, LCCの算定には損傷確率が必要となり計算時間が膨大となるため非現実的である。

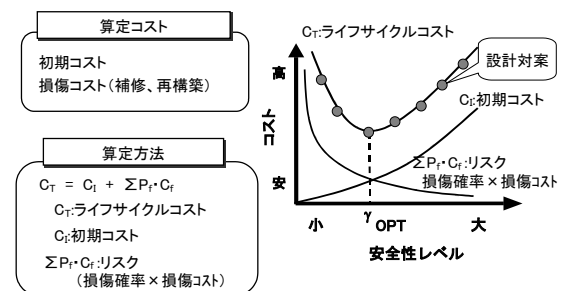


図-1 ライフサイクルコスト(LCC)の考え方

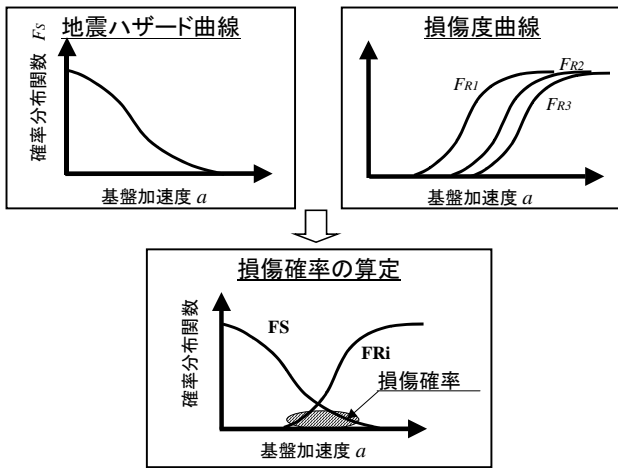


図-2 損傷確率の算定方法

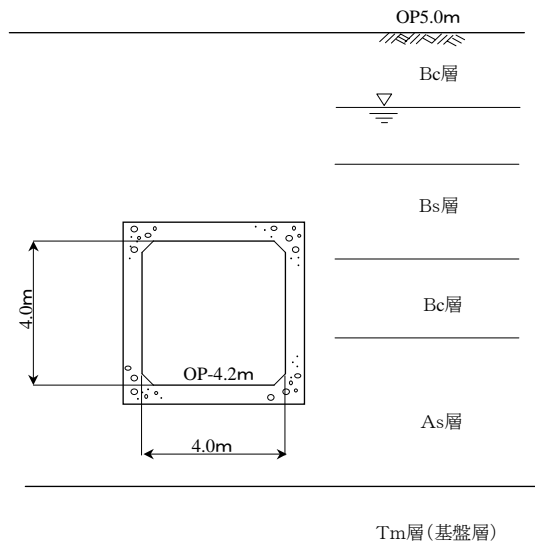


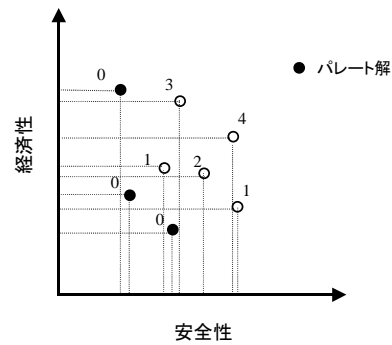
図-3 設計断面及びその周辺地盤の地層構成

そこで本研究では2ステップに分けて検討を行った。第1ステップでは、コンクリート標準示方書に準拠した通常の設計方法に従い<sup>5), 6)</sup>、遺伝的アルゴリズムを用いて様々な安全性レベルを有する設計対案の設定を行った。なお、ここでの安全性レベルは、損傷確率や信頼性指標ではなく通常の安全率で代用した。第2ステップでは、設定した各設計対案について信頼性解析を実施し、損傷確率、さらにLCCの算定、適切な安全性レベルの評価を行った。地震時の損傷確率は、図-2に示すように、地震ハザード曲線(作用の不確定性)と損傷度曲線(耐力の不確定性)のコンボリューションにより求められる。

本報告では、ある火力発電所の放水路を対象としてLCCに基づく地中RC構造物の耐震設計の検討を行う。

## 2. 設計条件

対象とする放水路の設計断面の形状とその周辺地盤の地層構成を図-3に示す。対象断面は内空4.0m×4.0mの1連のボックスカルバートである。周辺地盤の地層は、埋戻土層(粘性土: Bc層, 砂質土: Bs層), 沖積砂質土層(As層)及び砂質泥岩層(Tm層)である。



原点と解を対角線とする4角形の中の解の数で評価

図-4 最適設計におけるパレートランキングの概念図

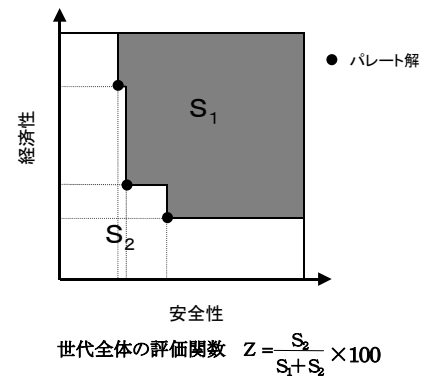


図-5 パレート解集合の評価の概念図

使用材料は、呼び強度24~60N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを用い、鉄筋は主鉄筋がSD295、せん断補強筋はSD345を用いる。

## 3. 設計対案の作成方法の検討

### 3.1 最適化手法の概要

LCCが最小となる設計対案を適切に選択するには、高い安全性から低い安全性を有する設計対案をバランス良く設定する必要がある。さらに各設計対案は同じ安全性を有する設計の中で最小のコストとなっている必要がある。こうした設計対案の探索は、経済性と安全性に関する2目的最適化問題として定式化することができ、その解はパレート解集合となる。

実設計に対応した最適問題を解く場合、多峰性(局所解が複数存在する)の問題や、離散値をとる設計変数(鉄筋径, 部材厚等)に対処できる最適化手法を用いる必要がある。このような問題に適用できる手法の一つに遺伝的アルゴリズム(GA; Genetic Algorithm)<sup>7), 8)</sup>と呼ばれる手法がある。これは、生命の進化, 遺伝子の働きをシミュレーションするアルゴリズムであり、工学分野では大域解を探索する手法として近年注目されている。土木の分野においても、橋梁や鉄塔の設計<sup>7)</sup>及びそれらの補修・補強計画<sup>9), 10)</sup>への適用等、多くの試みが行われている。

本研究では、適応度を評価する方法としてパレートランキングの考え方<sup>7)</sup>を用いた。図-4にパレートランキングの概念図を示す。パレートランキングとは、原点と解を中心とする4角形の中の解の数によってランク付けを行う方法である。4角形の中に他の解が存在しない場合は、その解はパレート解であり最も適合度

表-1 材工費

種別	設計基準強度 $f'_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	単価 円/m <sup>3</sup>
コンクリート	24	15,200
	40	17,500
	60	24,900
種別		単価 円/t
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強筋 ハンチ筋, 配力筋)		107,000

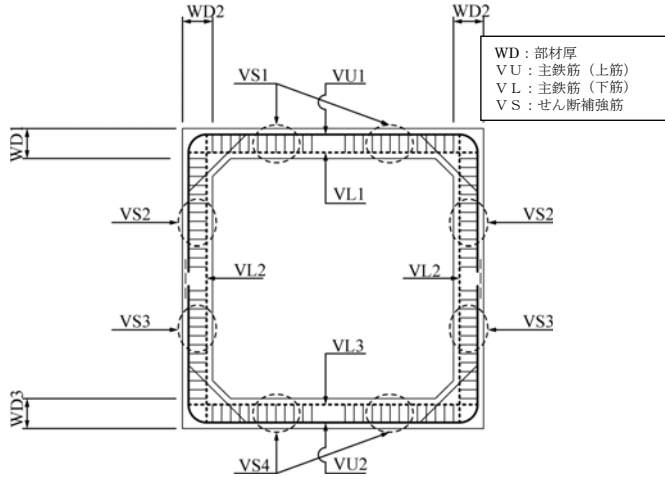


図-6 設計変数の説明

が良いと評価し、4角形の中の解が多くなるほど適合度が低いと評価する。また、得られたパレート解集合を評価する指標として、図-5に示すような目的関数空間における面積比を導入した。

### 3.2 設計対案の作成

経済性と安全性に関する2目的最適化問題としてパレート解探索を行うに当たり、経済性は初期コスト(躯体コスト)、安全性は通常の設計手法に基づき照査し、その安全余裕度の最も低いもので表す。

#### (1) 設定条件

躯体コスト算定用の材工費を表-1に示す。設計変数は部材厚、主鉄筋・せん断補強筋とする。図-6に設計変数の説明図を示す。図中の記号はWDが部材厚、VUが主鉄筋の上筋、VLが主鉄筋の下筋、VSがせん断補強筋である。また、設計変数の設定範囲を表-2に示す。

#### (2) 照査方法

検討すべき限界状態及びその照査方法は、コンクリート標準示方書<sup>5), 6)</sup>に準拠した。常時の検討は終局限界状態、使用限界状態を、地震時の検討では、レベル1地震動に対する検討(耐震性能1)、レベル2地震動に対する検討(耐震性能2)を行う。それぞれの限界状態に対する照査項目を表-3に示す。構造解析は、常時の検討では線形モデルによる二次元平面骨組解析を、地震時の検討は応答変位法による非線形二次元骨組解析を行う。地震時の検討に用いる地震動は、対象とする火力発電所土木構造物の設計のために作成されたものである<sup>11)</sup>。二次元骨組に作用させる地

表-2 設計変数の説明範囲

設計変数	数	対案	
部材厚	WD1	6	30,40,50,60,70,80 (単位:cm)
	WD2		
	WD3		
主鉄筋(上筋)	VU1	13	D13,D13K*,D16,D16K,D19,D19K,D22,D22K,D25,D25K,D29,D29K,D32
	VU2		
主鉄筋(下筋)	VL1	13	D13,D13K,D16,D16K,D19,D19K,D22,D22K,D25,D25K,D29,D29K,D32
	VL2		
	VL3		
せん断補強筋	VS1	8	D10,D13,D16,D19,D22,D25,D29,D32
	VS2		
	VS3		
	VS4		

\*:表中の記号Kは交互配筋を表す。

例えば、D13KはD13とD16を交互に配置する。

表-3 各限界状態に対する照査項目

限界状態	常時		地震時	
	終局限界状態	使用限界状態	耐震性能1	耐震性能2
照査項目	曲げ終局耐力	ひび割れ幅	鉄筋降伏	モードの判定
	せん断耐力		せん断耐力	変形性能

震外力は、これらの検討用入力地震動を用いて次元地盤応答解析(レベル1地震動では全応力解析、レベル2地震動では有効応力解析)を行い算定する。

#### (3) GAによるパレート解探索

GAを用いた設計対案の候補(パレート解)の探索を、コンクリート強度24,40及び60N/mm<sup>2</sup>の場合について実施した。本研究では、GAの各パラメータを、人口100、世代数12、エリート保存数10、突然変異率0.1として計算を行った。

GAによる計算結果の例として、コンクリート圧縮強度24N/mm<sup>2</sup>の場合の結果を図-7に示す。図には、パレート解集合の評価値(図-5)の推移と、第1,5,12の3世代について個々の解の目的関数を示した。世代が進むにつれてパレート解集合の評価値も改善され、コストと安全性(1/F.S.;表-3に示した照査項目に対するの照査値の最大値)に関するよりよいパレート解が求まっている。

コンクリート圧縮強度40,60N/mm<sup>2</sup>の場合についても同様の探索を行い、3ケースの各世代のパレート解を図-8に示す。24,40N/mm<sup>2</sup>のケースはほぼ同程度の結果が得られているが、60N/mm<sup>2</sup>は他の2ケースに比べて全体的に劣る結果となった。これは、60N/mm<sup>2</sup>のケースの場合、耐力の増加に伴い安全性は向上するものの、コンクリート単価が高いためコストの上昇が大きくなり、解の適合度が悪くなったものと考えられる。

#### (4) 設計対案の選定

最終世代のパレート解(設計対案の候補)より8つの設計対案(A~H)を選定した。それらのコストと照査値の関係を図-9に、断面諸元を表-4に示す。なお図中には、従来のように設計者の試行錯誤により求めた設計対案(以後、従来案と呼ぶ)も併せて示した。また図中の破線は、3つのケース全体のパレート解の照査値と初期コストの関係を示すイメージ線である。以下、これらの設計対案について信頼性解析、LCC評価を行う。

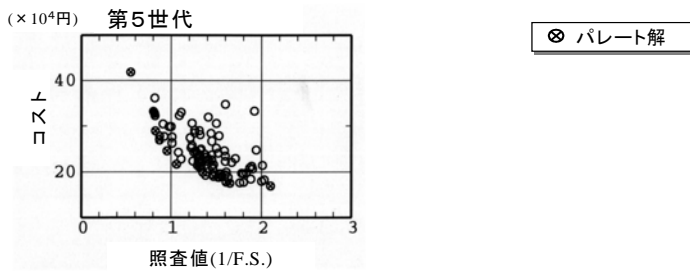
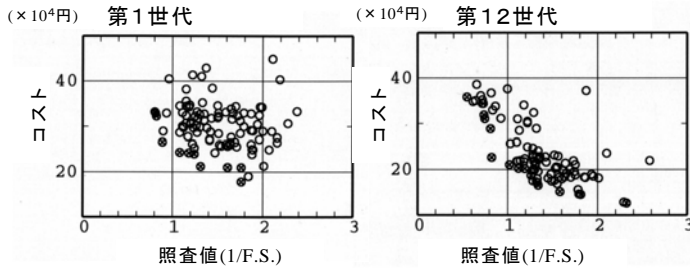
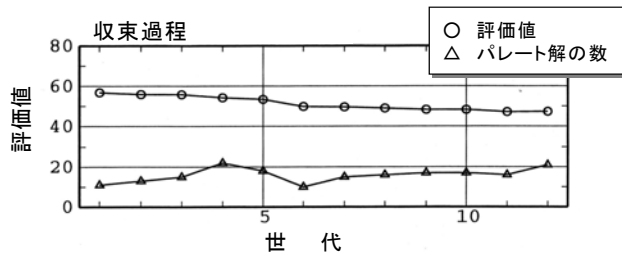


図-7 GAを用いたパレート探索結果  
コンクリート圧縮強度 24N/mm<sup>2</sup>の場合

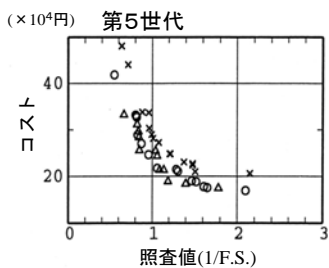
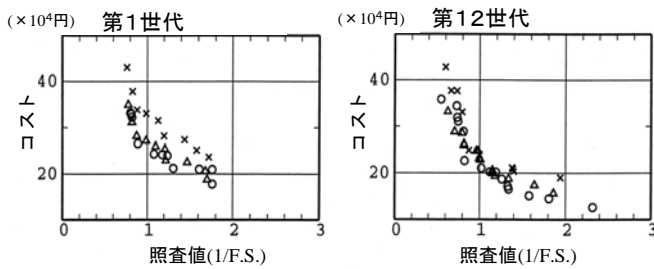
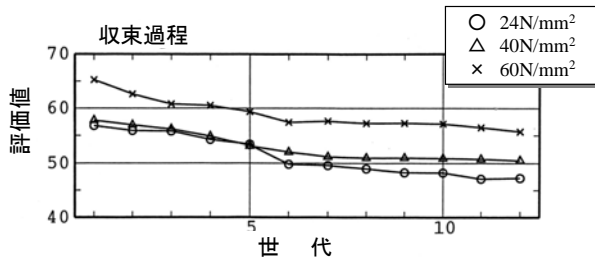


図-8 GAを用いたパレート解探索結果

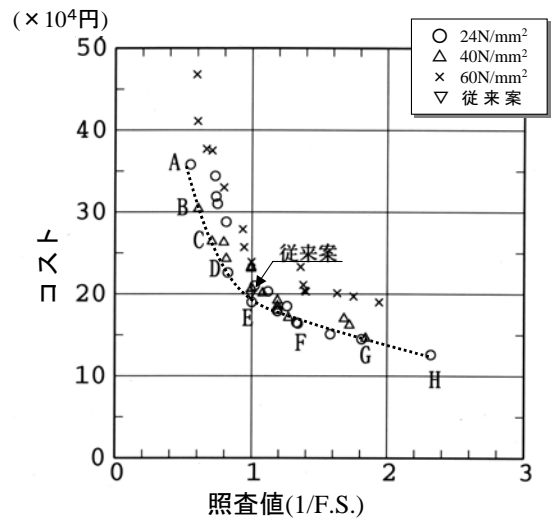


図-9 設計対案の算定結果

表-4 設計対案の断面諸元

		設計対案 A	設計対案 B	設計対案 C
断面諸元	部材厚	70	50	40
	主鉄筋	D25K D22 D25K D19K D19K D25K D32	D25K D22K D25K D16K D16K D25K	D29 D25 D29 D16K D16K D25K
	せん断補強筋	D29 D19 D29 D19	D22 D22 D19 D19	D22 D22 D19 D19
コンクリート強度		24N/mm <sup>2</sup>	40N/mm <sup>2</sup>	40N/mm <sup>2</sup>
		設計対案 D	設計対案 E	設計対案 F
断面諸元	部材厚	40	40	30
	主鉄筋	D25K D25 D19K D13K D13K D25	D22 D19 D22 D13 D13 D19K	D22K D16K D13 D13 D13 D19
	せん断補強筋	D19 D19 D16 D16	D13 D13 D16 D16	D16 D16 D10 D10
コンクリート強度		24N/mm <sup>2</sup>	24N/mm <sup>2</sup>	24N/mm <sup>2</sup>
		設計対案 G	設計対案 H	従来案
断面諸元	部材厚	30	30	40
	主鉄筋	D19K D16 D19K D13 D13 D16K	D16 D13 D13 D16 D13 D13	D22 D19 D16 D16 D22
	せん断補強筋	D16 D16 D10 D10	D10 D10 D10 D10	D22 D22 D13 D13
コンクリート強度		24N/mm <sup>2</sup>	24N/mm <sup>2</sup>	24N/mm <sup>2</sup>

表中の記号K: 交互配筋を表す。

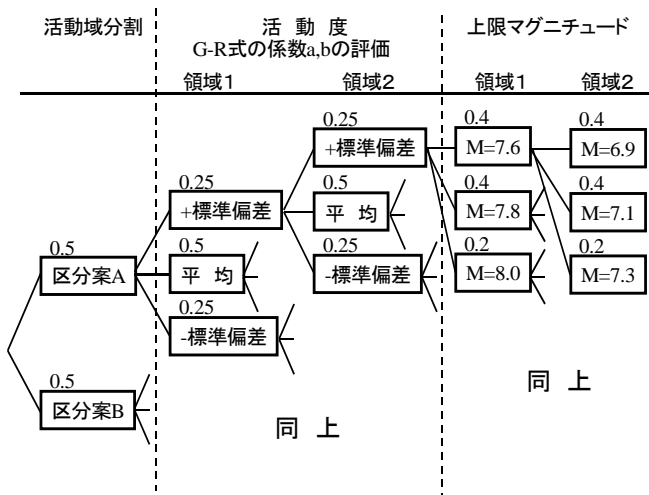


図-10 プレートに関連した活動域に関する分岐

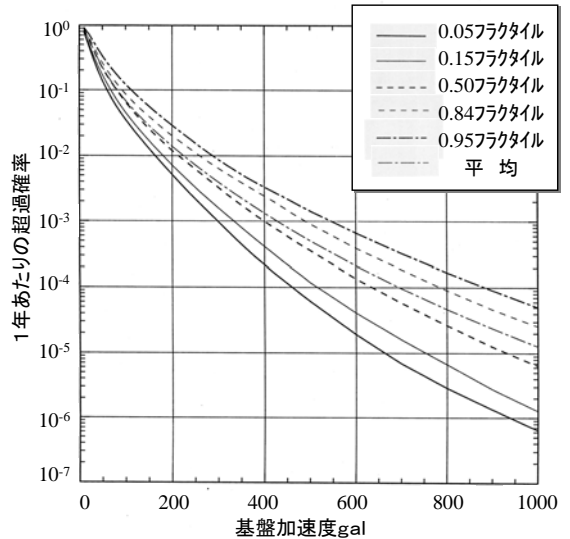


図-12 最大加速度に対するフラクタイルハザード曲線

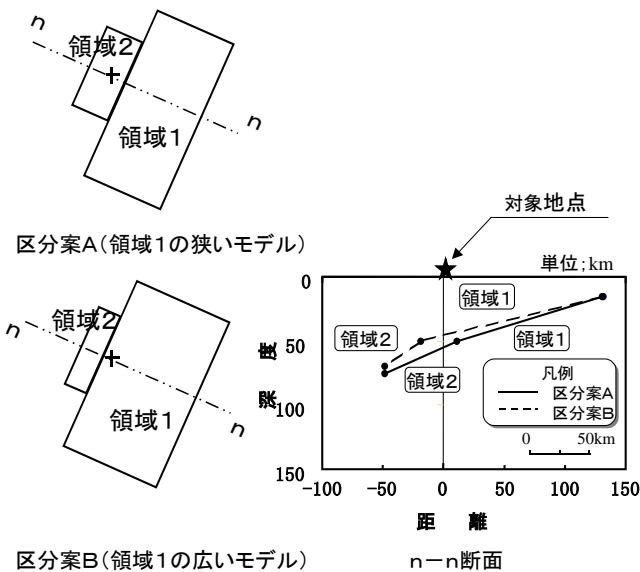


図-11 活動域の区分モデル

#### 4. 地震危険度解析

##### 4.1 地震危険度解析の不確定性

モデル設定の不確定性を含めて地震ハザード曲線を評価する手法としてロジックツリー手法がある。ロジックツリー手法では、判断が分かれる事項に関して複数の選択肢（分岐）を設定し、各分岐に対して将来の正しさの可能性に基づいた重みを設定する。通常、活動域の組合せ、地震活動度、上限マグニチュード、最大地震動推定式に対して分岐が設定される。

本研究においても上記項目について分岐を設定しており、プレートの沈み込みに直接関係した活動域については、図-10に示すように活動域の区分に関する2つの分岐、活動度の評価に関する9つの分岐、上限マグニチュードに関する9つの分岐を考慮し計162の分岐を考えた。図中の数値はそれぞれの分岐に対する重みを表している。活動域の区分はプレート間地震（領域1）と稍深発地震（領域2）の境界の曖昧さに関して図-11に示すような2つの区分案を設定した。活動度に関しては領域1、2のそれぞれ

について、Gutenberg-Richter式の係数 $a, b$ を大きめ、平均、小さめに設定した3ケースを考えており、計9つの分岐とした。図-10では+標準偏差、平均、-標準偏差と記した。上限マグニチュードについても図-10に示すように領域1、2それぞれについて3つ、計9つの分岐を設定した。同様にして、地点周辺の活断層について4つの分岐、活断層以外の地殻内地震について6つの分岐を考えた。さらに、地震動の距離減衰式のばらつき設定に関して3つの分岐を考え、計 $162 \times 4 \times 6 \times 3 = 11664$ 個の分岐総数となった。

##### 4.2 地震ハザード曲線の設定

地震ハザード曲線は、地震活動モデルと推定式を組み合わせることにより算定される。本研究ではモデル設定に関して分岐を考慮しているので、多数の地震ハザード曲線が算定され、その統計処理により、得られた地震ハザード曲線の不確定性の大きさを評価することが可能となる。

算定した1万本以上の地震ハザード曲線を統計処理した例を図-12に示す。最大加速度について、0.05, 0.16, 0.50, 0.84, 0.95フラクタイルと平均のハザード曲線が図示されている。フラクタイルハザード曲線は、ハザード曲線の集合に対して、等非超過確率レベルを示すものである。例えば、図中の0.84フラクタイルの曲線はこの曲線を超過しないハザード曲線の確率が各最大加速度に対して0.84であること示している。平均は、全ハザード曲線の期待値である。

なお、設計基盤より深い地盤構造も特定サイトの地震動特性に影響することから、本研究では対象地点での地震観測記録から地点補正係数を求めて用いている。地震動の距離減衰式は安中・野沢の推定式<sup>12)</sup>を用いた。

#### 5. 構造物耐力の不確定性検討

LCCの算定に際しては、限界状態が損なわれた場合の損傷コストを定量化しておく必要がある。そこで、表-3の照査項目の

表-5 限界状態の設定

限界状態	照査方法	事象
<長期の限界状態> 鋼材が腐食するようなひび割れが発生し、極端な構造物の劣化が生じる。	ひび割れによる損傷 (補修により修復可能)	・鉄筋降伏照査 1部材に1カ所塑性ヒンジが発生する。 E <sub>1</sub>
<短期の限界状態> 部材断面の損傷により構造物が不安定になる。	曲げによる損傷 (補修により修復可能)	・曲げ耐力照査 1部材に2カ所塑性ヒンジが発生する。 ・変形性能照査 塑性率がじん性率を越えない。 E <sub>2</sub>
	曲げによる損傷 (再構築必要)	・曲げ耐力照査 1部材に3カ所以上塑性ヒンジが発生する。 ・変形性能照査 塑性率がじん性率を越える。 E <sub>3</sub>
	せん断による損傷 (再構築必要)	・せん断力がせん断耐力を越える。 E <sub>4</sub>
		E <sub>5</sub>

表-6 不確定要因一覧表

不確定要因		平均値(μ)	標準偏差(σ)	変動係数	
構造物の材料特性	コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	31.0	1.20	0.040
	呼び強度 24.0(N/mm <sup>2</sup> ) の場合	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t=0.58f_c^{2/3}$ $f_c'$ :圧縮強度	0.093 μ	0.093
		弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	$E_c=40000f_c^{1/3}$ $f_c'$ :圧縮強度	0.12 μ	0.12
	鉄筋 SD295の場合	降伏強度 設計値 300(N/mm <sup>2</sup> )	370	18.5	0.050
弾性係数 設計値 210(kN/mm <sup>2</sup> )		195	2.0	0.010	
耐力算定式	曲げ終局耐力	1.0*計算値	0.11 μ	0.11	
	曲げ降伏耐力	1.0*計算値	0.10 μ	0.10	
	靱性率	1.2*計算値	0.51 μ	0.51	
	せん断耐力	1.0*計算値	0.08 μ	0.08	
施工性	鉄筋かぶり	1.04*設計値	0.06 μ	0.06	
	部材厚さ	1.01*設計値	0.03 μ	0.03	

見直しを図り、新たに損傷事象を設定し、それらと損傷コストとの関連付けを行った。そして、3章において選定した9つの設計対案(A~H, 従来案)に対して、設定した損傷事象についての損傷度曲線を求めた。

### 5.1 損傷モードの設定

放水路の機能は、循環水管からの冷却水を放水口へ通水することである。放水路内部の海水が大量に外部に流れ出すと、周辺地盤が洗い出され構造物は不安定な状態になる。したがって、放水路の要求性能は、冷却水が外部へ大量に流れ出さないこととした。

本研究では、放水路の要求性能に対して、長期及び短期の2つの限界状態を考え、それに対して5つの照査方法(事象E<sub>1</sub>~E<sub>5</sub>)を設定した。事象E<sub>1</sub>は長期の限界状態に対する構造物の損傷事象を判定する照査であり、それ以外

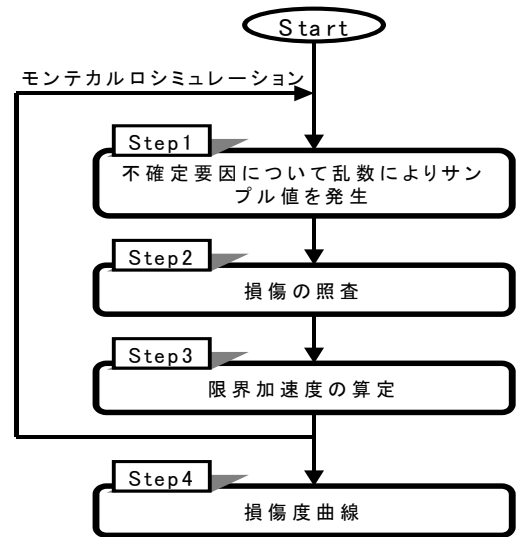


図-13 耐力の不確定性算定フロー

は短期の限界状態に対する構造物の損傷事象を判定する照査である。これらのうち事象E<sub>1</sub>及びE<sub>2</sub>は対象構造物が補修により修復可能な状態であり、事象E<sub>3</sub>~E<sub>5</sub>は補修による修復が不可能で、再構築を必要とする状態である。

### 5.2 不確定要因の抽出とそのモデル化

耐力の不確定性の要因には、構造物の材料特性、耐力算定式、施工方法、地盤の特性等が考えられる。それらの項目に関して、文献<sup>13)~20)</sup>や収集データに基づき統計的特性を設定した。本研究で考慮した不確定要因のうち、構造物の材料特性、耐力算定式、施工性に関する統計的特性を表-6に示す。

### 5.3 損傷度曲線の算定

構造物の耐力の不確定性は、耐力の不確定要因に関するモンテカルロシミュレーションより評価する。耐力の不確定性の算定フローを図-13に示す。まず、設定した不確定要因について乱数によりサンプル値を発生させる。その値を用いた損傷度解析を行い、各損傷事象ごとに構造物が損傷する最小の入力地震動の最大加速度(以後、限界加速度と呼ぶ)を算定する。損傷の照査方法は基本的に3章の設計対案の作成の場合と同様であり、地震時の損傷事象には応答変位法を用い、入力地震動の加速度波形はレベル2地震動を用いている。これをn回繰り返すことにより、限界加速度のばらつきが求められる。結果は対数正規分布に従う損傷度曲線(限界加速度の確率分布曲線)として整理する。3章で設定した9つの設計対案に対して、図-13の算定フローに従い損傷度解析を実施し、損傷度曲線を算定した。図-14に設計対案の損傷度曲線を示す。

## 6. LCCによる設計対案の評価

### 6.1 損傷確率の算定

構造物の年損傷確率P<sub>f</sub>は、地震ハザード曲線と損傷度曲線により次式を用いて算定することができる(図-2参照)。

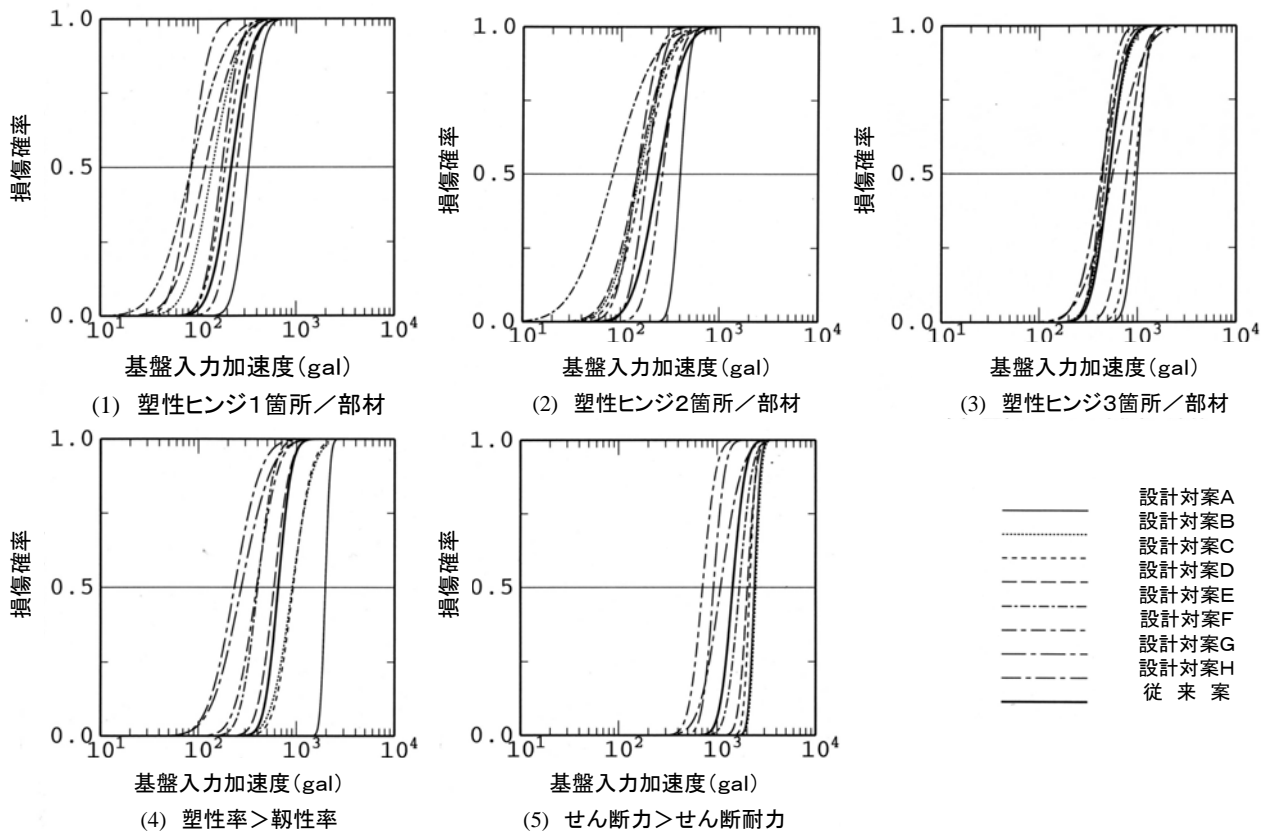


図-14 全設計対案の損傷度曲線

$$P_f = \int_0^{\infty} F_r(x) \frac{dF_S(x)}{dx} dx \quad (2)$$

ここで、 $F_r(x)$  : 損傷度曲線  
 $F_S(x)$  : 地震ハザード曲線

4章で算定した地震ハザード曲線と5章で算定した損傷度曲線を用いて各設計対案の年損傷確率を算定した。そのうち図-15に地震ハザード曲線として平均的なハザード曲線を用いた場合の各設計対案の年損傷確率を示す。

## 6.2 初期コスト及び被害時コストの算定

初期建設コストは、本設工事費と仮設工事費を考慮した。本設工事費は、3章での設計対案を作成する際に用いた躯体コストに、均しコンクリート工、基礎砕石、型枠工及び足場工を加えたものである。仮設工事費は、放水路を構築する上で必要となる山留工に対するもので、工種として掘削・埋戻工、鋼矢板打抜、山留支保工及び残土処理工を考慮している。補修コストは、補修工事に亀裂補修工法（低圧式エポキシ樹脂注入）を用いるものとして算定した。

再構築コストは、本設工事費、仮設工事費及び撤去工事費を考えた。本設及び仮設工事費は初期建設コストと同様とした。再構築を計画する場合、ルート変更案も考えられるが、ここでは同一地点における撤去、再構築とした。撤去工事はコンクリート躯体を取り壊しながら撤去するものとして算出した。

本研究でのコスト算定では、初期建設コストに対して、事象E<sub>1</sub>

の補修コストは0.6~0.7倍、事象E<sub>2</sub>の補修コストは0.7~0.8倍、再構築コストは1.2~1.3倍となった。

## 6.3 LCCの算定

LCCは損傷確率、初期コスト及び損傷コストより次式を用いて算定することができる。

$$C_T = C_1 + \sum P_f \cdot C_f = C_1 + \sum P_f (E_1 \cap \overline{E_2} \cap \overline{E_4} \cap \overline{E_5}) \cdot C_{f1} + \sum P_f (E_2 \cap \overline{E_3} \cap \overline{E_4} \cap \overline{E_5}) \cdot C_{f2} + \sum P_f (E_3 \cup E_4 \cup E_5) \cdot C_{f3} \quad (3)$$

ここで、 $C_T$  : LCC  
 $C_1$  : 初期コスト  
 $C_{f1}$  : 補修コスト(E<sub>1</sub>事象)  
 $C_{f2}$  : 補修コスト(E<sub>2</sub>事象)  
 $C_{f3}$  : 再構築コスト(E<sub>3</sub>~E<sub>5</sub>事象)  
 $P_f(E)$  : 事象Eの生じる確率  
 $E_1$  : 1部材に1箇所塑性ヒンジが発生する事象  
 $E_2$  : 1部材に2箇所塑性ヒンジが発生する事象  
 $E_3$  : 1部材に3箇所以上の塑性ヒンジが発生する事象  
 $E_4$  : 塑性率が靱性率を上回る事象  
 $E_5$  : せん断力がせん断耐力を上回る事象

3章において選定した設計対案に対して、3種類の地震ハザード曲線、0.95フラクタイル曲線、平均的なハザード曲線及び0.05フラクタイル曲線を用いて、構造物の供用期間を30年と設定した場合のLCCを算定した。これらの算定結果を図-16に示す。これらの図の横軸は、再構築を必要とする事象(E<sub>3</sub>~E<sub>5</sub>)のうちどれが生じる事象の確率であり、縦軸はLCCである。

用いる地震ハザード曲線の違いにより各設計対案のLCCにも違いが生じており、0.95フラクタイル曲線を用いた場合の方が

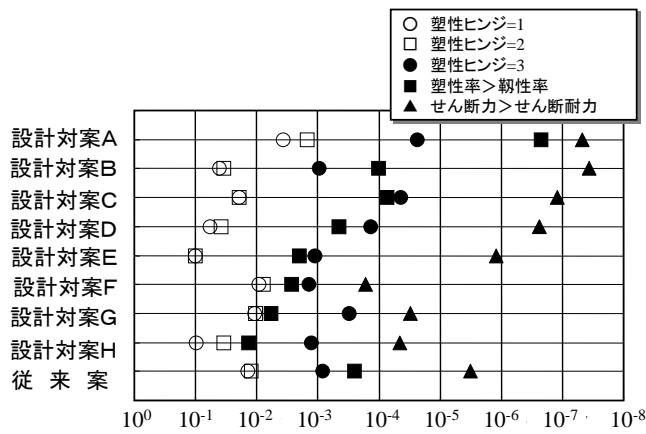


図-15 設計対案の年損傷確率

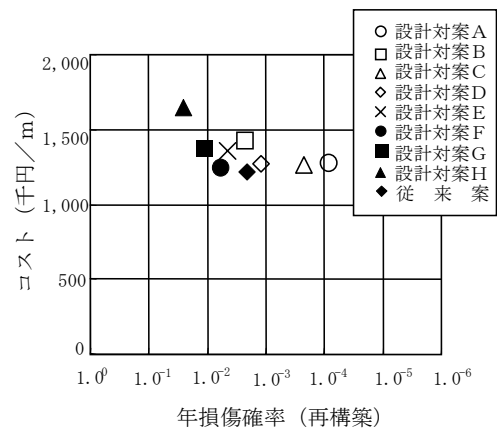
0.05 フラクタイル曲線を用いた場合に比べ全体的に高くなっている。耐震性の低い案ほど違いが大きく、最も違いの大きい設計対案Hで約30%、最も小さい設計対案Aで約3%高くなった。高いフラクタイル値のハザード曲線を用いることは、より大きな地震荷重を想定することに相当するため、当然のことながら耐震性の高い設計対案が有利になってくる。しかし、いずれの地震ハザード曲線を用いた場合にも、設計対案A-C-D-従来案-F-G-Hの並びで、従来案または設計対案Fを極小とする下に凸の曲線関係が得られており、地震動の不確定性を考慮した場合にも、LCC最小化の観点からは、設計対案Fあるいは従来案が求められるべき設計となった。

設計対案F及び従来案の再構築を必要とする年損傷確率 $P_f$ は、0.95フラクタイル曲線を用いた場合には $6.0 \times 10^{-3}$ 及び $2.0 \times 10^{-3}$ であり、0.05フラクタイル曲線では $8.0 \times 10^{-4}$ 及び $1.7 \times 10^{-4}$ である。地震ハザード曲線の相違により $P_f$ は約1オーダー異なることとなる。これらの結果より、対象構造物の最適安全性レベルをLCC最小化の観点から考えると、地震ハザード曲線算定に伴う不確定性を考慮しても $6.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ の範囲にあることがわかる。一般に構造物の信頼度を表す指標として、信頼性指標 $\beta$ が良く用いられ、これらの $P_f$ を $\beta$ で表すと、正規分布にしたがう場合には、3.2~4.1程度となる。星谷ら<sup>1)</sup>によるレビューによると土質・基礎構造物の安全性レベルは $\beta$ でおよそ3~4となっており、本研究で得られたLCC最小化の観点から考えた安全性レベルは、一般的な土質・基礎構造物の安全性レベルともほぼ整合する結果となった。

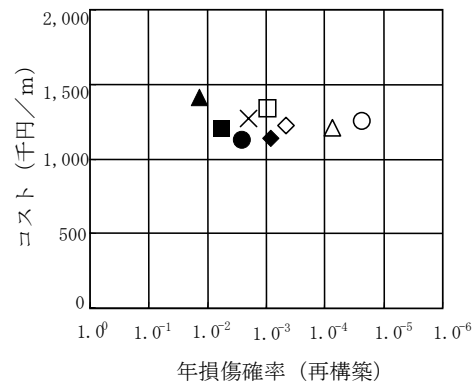
## 7. あとがき

本研究では、LCCの算定方法についての検討を行った。その主な結果を要約すると以下のとおりである。

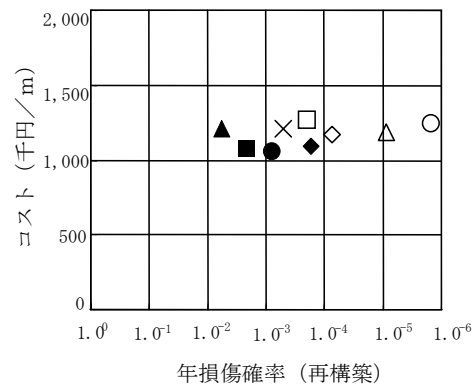
- 1) 遺伝的アルゴリズムを用いて設計対案を設定する方法を示した。本手法は通常の最適設計法としての有効性もあり、発展性が期待できる。
- 2) 地震危険度解析では、ロジックツリー手法を用いてモデル設定の不確定性を考慮し、地震ハザード曲線の不確定性の大きさを評価した。



(1) 0.95フラクタイル曲線を用いた場合



(2) 平均的なフラクタイル曲線を用いた場合



(3) 0.05フラクタイル曲線を用いた場合

図-16 LCC算定結果

- 3) 損傷度解析では、構造物の耐力に関する不確定要因をモデル化し、耐力への影響を評価して損傷度曲線を求めた。
- 4) 現行の設計基準による放水路の設計案は、LCCの観点からほぼ妥当なレベルであることが示された。

本研究で用いた最適化手法による設計対案の作成方法は非常に多くの計算時間を要した。今後、本手法を実際的设计業務に導入していくためには、計算効率を改善する必要がある。本研究でのLCCは、初期コストと損傷に対する対象構造物の補修、再構築のみを考慮したものである。今後は、土木構造物の損傷・再構築時に発生による波及効果、例えば火力発電所の放水路の場合には発電所休業損失等、を考慮したLCCについての検討も実施していきたい。



## 参考文献

- 1) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986
- 2) 建設省建築研究所, (財) 国土開発技術研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」総合報告書, 目標水準分科会報告書, 1998.
- 3) 大住道生, 運上茂樹: トータルコストに基づく土木構造物の要求耐震性能の設定法に関する一考察, JCI-C, NO. 52, pp. 393-400, 1999.
- 4) 斉藤展生, 西川和廣, 上仙康: 鋼道路橋のライフサイクルコストの概念に基づく簡易評価法, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第6部, VOL. 54<sup>th</sup>, pp368-369, 1999.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書(平成8年制定) 設計編, 1996
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(平成8年制定) 耐震設計編, 1996
- 7) 三宮信夫, 喜多一, 玉置久, 岩本貴司: 遺伝アルゴリズムと最適化, システム制御情報ライブラリー17, 朝倉出版, 1998
- 8) 古田均, 杉本博之: 遺伝アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997
- 9) 近田康夫, 城戸隆良, 小堀為雄, 橋謙二: GAによる既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集/I-31, No513, pp151-159, 1995.
- 10) 小野正樹, 宮本文穂, 中村秀明, 山岡健一: 既存橋梁の最適補修・補強計画への遺伝的アルゴリズムの適用, 土木情報システム論文集, VOL. 6, pp181-188, 1997
- 11) 土木学会: LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針, コンクリートライブラリー98, 土木学会, 1998.
- 12) T. Annaka and Y. Nozawa: A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proc. 9<sup>th</sup> WCEE, II-107- II-112, 1988.
- 13) 武山康, 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回年次学術講演会講演概要集, pp7- 8, 1981.
- 14) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 1997.
- 15) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造系の安全性評価研究委員会 報告集・論文集, 1999.
- 16) 岡村甫: コンクリート構造の限界状態設計法 第2版, 共立出版, 1986.
- 17) 石橋忠良, 千田富雄, 山崎安弘: 鉄筋の品質に関する調査, 研究, 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集, pp1-2, 1981.
- 18) 柴田拓二: 鉄筋コンクリート部材の脆性破壊時耐力推算式の検討, コンクリート工学 Vol. 18 NO. 1, pp26-37, 1980.
- 19) 土木学会: 阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式, コンクリート技術シリーズ No. 12, 1995.
- 20) 二羽潤一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度の再評価, 土木学会論文集/V-5, No372, pp167-176, 1986.

(2000年9月14日 受付)