

# ヒューマンエラーが複層立体トラス構造の 力学的性質に与える影響に関する研究

## A STUDY OF THE INFLUENCE OF HUMAN ERROR ON THE BEHAVIOR OF DOUBLE-LAYER GRIDS

和田 章\*, 王 竹\*\*  
Akira WADA and Zhu WANG

Human error is recognized as the major cause of structure failure. In this paper, the authors simulate human error in the process of structural design, manufacture, assembly and erection, and investigate statistically the influence they have on the structure's behavior.

A 6×6 square plan double-layer space truss is designed and used as an example.

A computer program is written to analyze the truss structure, with the ability to realistically simulate member buckling and to automatically adjust the displacement increment.

The Monte Carlo method is used with trial number set to 100.

The fully intact truss, and groups of trusses with either design errors, assembly errors, or variations in member strength, are analyzed and investigated statistically.

It is found out that human error has a much bigger influence on the behavior of double-layer grids than member strength variation, and for the standard deviation of the structure strength, the influence of these two factors is shown to differ at least by a factor of 6.

**Keywords** : Space Structure, Human Error, Safety Evaluation

### 1. 序 論

構造物の破壊は計画・設計ミス、施工ミス等のヒューマンエラーに起因するものが非常に多いことが多数の論文または報告によって指摘されている<sup>1)~3)</sup>。一方、近年確立されてきたLRFD法では荷重・外力の不規則性および構造物の材料強度のばらつき、寸法精度、建方誤差等を確率統計論的に評価しているが、ヒューマンエラーについてはその原因の複雑さ、データの不足および取扱い難さにより、LRFD法の考えの範疇から取除かれている<sup>4),5)</sup>。ヒューマンエラーの幾つかを立体トラス構造の場合について考えると、例えば設計ミスとして必要な部材より断面形の小さいものが図面上に書かれてしまう場合、組立ミスとしてボルトの締め忘れ、部材が正確にノードと接合されない場合等があり得る。このようなヒューマンエラーは明らかに構造系の力学的挙動に大きく影響を与え、構造物の破壊の原因となることが考えられる。このようなヒューマンエラーについて、原因を究明し、データベースを作り、それを防ぐ方法や対策を考えることは構造物の安全性を確保するために必要であるが、それには長時期にわたるデータの収集等の作業が必

要である。本論文ではこのようなヒューマンエラーが発生し得ることに注目し、それが発生した場合に生じる構造系の力学的性状の変化を数値シミュレーションによって明らかにし、ヒューマンエラーが構造物の力学的性状に及ぼす影響と、LRFDで考えられている部材耐力のばらつきが構造物のそれに及ぼす影響と比較し、検討を行う。

著者らの前掲論文<sup>6)</sup>ではヒューマンエラーを立体トラス構造の多数の部材の中の1本の部材が早期破壊した場合について考えたが、それはヒューマンエラーの特別な一つの場合をシミュレートしたにすぎない。また、部材が座屈した後も耐力を保持すると仮定しているため、実現象を忠実にとらえたとは言えない。現実性を高めるため本論文では座屈後の耐力低下を考慮するとともに不良な部材の本数をパラメータにして統計的に考察を行う。モンテカルロ法を用いるため、大量なケースの解析が必要となるので、そのためには、部材の座屈現象を含む力学的性状を忠実に表現することができ、しかも解析時間の短い非線形解析法、解析における増分を自動的に調整しながら進めていく解析法が必要である。本論文ではこ

\* 東京工業大学 教授・工博

\*\* 東京工業大学 大学院生

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

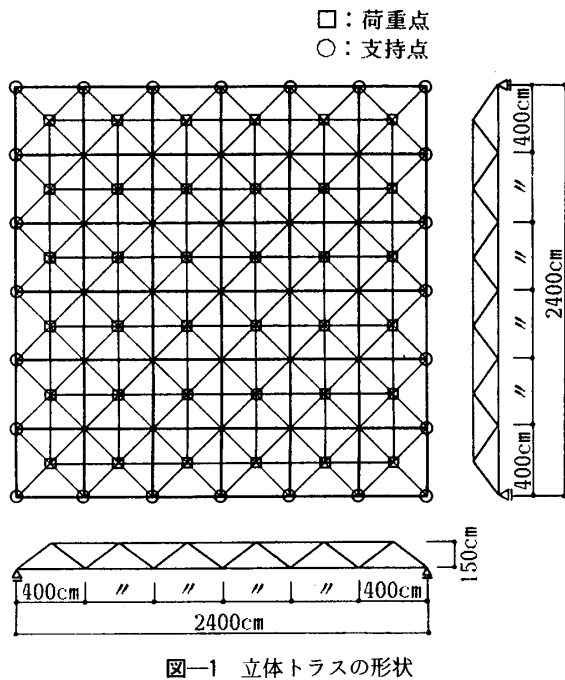


図-1 立体トラスの形状

これらの方法についても述べる。

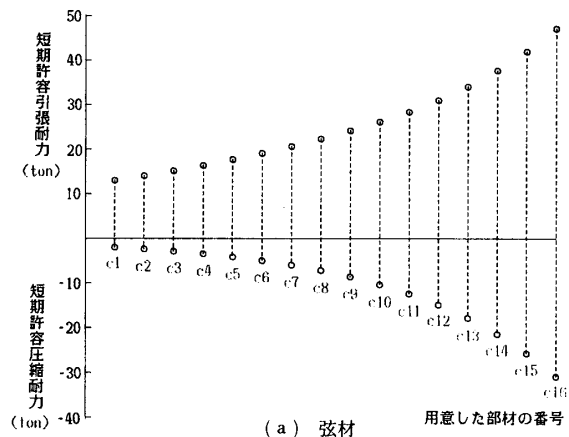
2. 立体トラス構造

本論文では2層6スパンの正方形プラン立体トラスを解析に用いた<sup>6)</sup>。その形状を図-1に示す。下層の周辺上のすべての節点を鉛直方向にピンローラー支持し、上層のすべての節点に一律な鉛直荷重を作用させた。鋼管部材の外径と厚さが線形関係に従い連続的に存在するものと仮定し、短期許容圧縮軸力(日本建築学会鋼構造設計規準)が1.2の等比級数となるように使用可能な部材を弦材, 斜材別に用意した。用意した部材の短期許容引張軸力と短期許容圧縮軸力を図-2に示す。弦材を(a)に, 斜材を(b)に示す。トラス構造に長期設計荷重(2.5 ton/節点)を作用させ、弾性解析を行い、求められた各部材の発生軸力に応じて、長期許容軸力(=短期許容軸力/1.5)を越えない範囲で最も近い値を持つ部材を用意した部材リストから選択し、部材配置を決めた。ただし、発生軸力が小さい部材については最小部材として、弦材にはc1, 斜材にはd1を使用した。図-3に部材の配置図を示す。

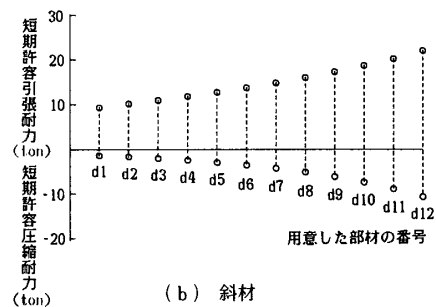
3. 部材の力学的性質

3-1 健全な部材の軸力-軸変形関係

健全な部材の軸力-軸変形関係については、引張側では降伏現象を考慮してバイリニアとした。圧縮側では座屈現象を表すため材料の応力-ひずみ関係に基づき、初期変形を部材中央でのたわみが  $L/1000$  ( $L$ は部材長を示す)となる正弦波として与え、部材の弾塑性有限変形解析<sup>7)</sup>(以下部材解析と称する)を行い、座屈後の荷重-変位関係を求め、これをもとにこの関係を細長比  $\lambda$  の関数として柴田らの方法<sup>8)</sup>を用いて定式化し、さらに柴田らの方法<sup>9)</sup>に従って関数式を区分線形化し近似的に表



(a) 弦材



(b) 斜材

図-2 用意した部材の短期許容軸力

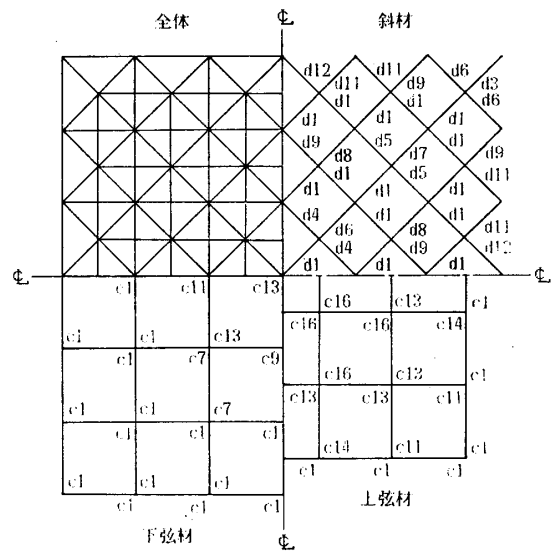


図-3 トラスの部材配置図

した(以下近似関数と称する)。ただし、近似関数の最大耐力  $N_{max}$  を決めるに当たっては、オイラー座屈耐力  $N_{cr}$  と降伏耐力  $N_y$  のうち小さい値と短期許容圧縮耐力  $N_c$  を参考に

$$N_{max} = 0.2 \min(N_{cr}, N_y) + 0.8 N_c \dots\dots\dots (1)$$

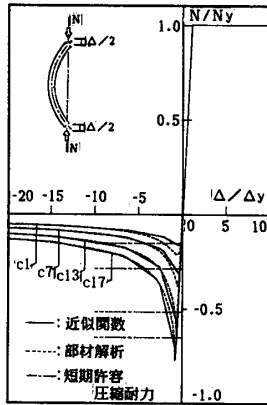
に従って決めた。図-2(a)から4種類の部材を選び、表-1にその断面形状と耐力を示し、図-4にこれらの部材の短期許容圧縮耐力を鎖線で、部材解析の結果を点線で、それを表した近似関数の結果を実線で示す。

3-2 設計における部材の選択ミス

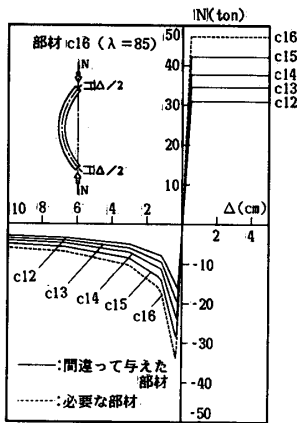
設計の段階において、設計者が設計に対する理解の過

表一 代表部材の一覧表

部材	外径 (cm)	厚さ (cm)	細長比 $\lambda$	短期許容圧縮軸力 $N_c$ (ton)	短期許容引張軸力 $N_t$ (ton)
c1	6.05	0.30	196	-2.01	13.01
c7	8.23	0.35	143	-6.00	20.81
c13	11.31	0.42	104	-17.90	34.49
c16	13.82	0.47	85	-30.93	47.30



図一四 健全な部材の軸力—軸変形関係



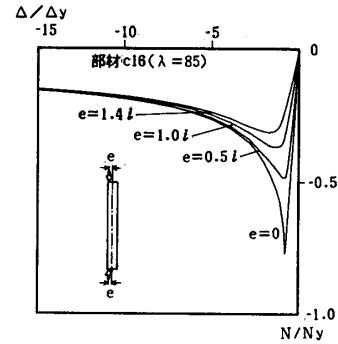
図一五 設計ミスした部材の軸力—軸変形関係の一例

ち、仮定の間違い、図面の記載ミス等の不注意による間違いによって必要な断面形の部材が用いられていない場合が考えられる。間違いによって必要な断面形より大きいものが与えられる場合も、小さいものが与えられる場合もあるが、後者の場合が構造を不安全な状態に導くので、本論文では必要な断面形より1から4ランク小さい断面の部材が使われた場合について考察する。1例としてc16部材が必要である場合に、間違っでc15~c12の部材が用いられたとしたときの軸力—軸変形関係を図一5に示す。4ランク小さい断面の部材では必要な部材に比べ、最大耐力が半分程度になってしまうことになる。

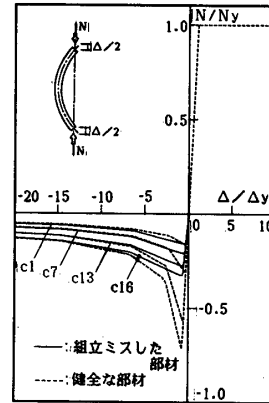
### 3-3 組立不良な部材の軸力—軸変形関係

組立不良な部材の場合は、引張材については不良ボルトが使用された場合またはボルトの締め忘れの場合等を考え、最初から耐力が発揮できないと仮定する。

圧縮材については、部材をノードと接合させる時に大きな偏心を残したような場合を想定し、健全な部材より



図一六 大きい初期偏心による座屈曲線の変化



図一七 組立ミスした部材の軸力—軸変形関係

低い耐力で座屈すると考えてモデル化する。表一に示すc16部材について初期偏心が $e=0, 0.5i, 1.0i, 1.4i$  ( $i$ :断面2次半径)の4ケースについて部材解析を行い、その結果を図一6に示す。本解析では組立不良な圧縮材の場合には $e=1.0i$ の初期偏心があるとした。3-1に示す方法と同様な方法に従って、区分線形化した関数で座屈後荷重—変位関係を表した。図一7に健全な部材の場合を点線で、組立不良な部材の場合を実線で軸力—軸変形関係を示す。断面が大きい部材ほど耐力の低下が激しいことが分かる。

## 4. 自動増分調整を行う非線形解析

### 4-1 解析法

部材の引張降伏、圧縮座屈性状および有限変位を考慮した非線形解析は増分変位法によって進める。しかし座屈現象を伴う増分解析の場合では、増分の与え方によって解が得られるか否かが決ることが多く、非線形解析を自動化することは難しい。一般的に用いられる方法では、増分計算が収束しなかったステップで計算を止め、継続計算のために必要な情報をファイルに保存し、増分値を小さく変更し解析を再度進ませることの繰り返しを人間が介入して行わなければならない。本研究の目的は構造物の不確定的な性質を統計的に調べるところにあるので、大量な非線形解析を行う必要がある。そのために人間が増分を確認しながら解析を行う方法では非常に効率が悪い。ここでは人間が確認し、判断を下すプロセスを

できるだけ忠実にプログラミング化し、非線形解析の増分調整をコンピュータによって自動制御させることを試みた。増分量を定めるに当っては次のような方法を展開

した。

① 標準的な増分変位量に対する1ステップの増分倍率として1, 2/3, 1/3, 1/6, 1/12, 1/100の6種類を用意する。

② 増分を与え、収束計算を行い、収束判定Ⅰとして決めた高い精度で収束したか否かをチェックする。収束判定Ⅰに対して収束した場合には計算を再開するのに必要な情報を記憶Ⅰに保存する。記憶Ⅰについては精度よく収束した最新の情報が一組だけが保存されるように、ファイルの内容を更新する。

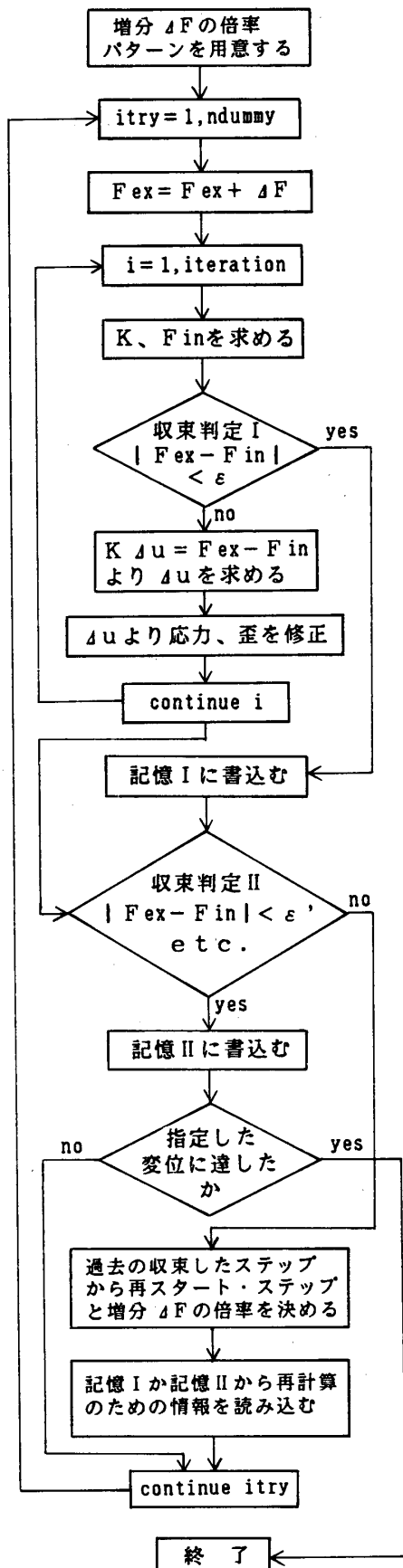
③ 収束判定Ⅰの結果に関係なく、収束判定Ⅱを行う。収束判定Ⅱは主に発散していないかどうかのチェックであるため、収束判定Ⅰに比べゆるい判定としている。収束精度のほか剛性マトリックスの行列式、座屈した部材の本数、全外力の増減もチェックする。発散していないと判断した場合には記憶Ⅱに計算を再開するのに必要な情報を記録する。記憶Ⅱについては常に記憶Ⅰと同じかさらに進んだステップの情報一組だけが保存されるようにファイルの内容を更新する。

④ さらに先の計算を行い、解が発散した場合には増分値を前もって用意した増分倍率から1ランク小さいものを選び、計算を再開するステップを決め、それに応じて記憶Ⅰまたは記憶Ⅱから必要な情報を読み込み、再計算を行う。

この②から④の3段階を繰返しつつ必要な変位に達するまで計算を進める。図-8に自動増分調整のためのフローチャートを示す。

#### 4-2 自動増分調整の解析例

上述した方法を用いて本論文で扱う立体トラス構造について解析を行った。ここではすべての部材が健全であるとした時（以下健全な場合と称する）の結果を用いて説明する。図-9に示す荷重-変位曲線によって求解の軌跡を示す。図中の丸番号は計算のステップを表す。ステップ3まではよく収束した解が求まり、記憶Ⅰ、記憶Ⅱ両方に再計算のための必要な情報が書き込まれている。ステップ4, 5は増分の倍率が大きすぎたため発散した。ステップ3に戻り、増分倍率を1/3とし計算を再開したところ、安定した解を得ることができ始めた。しかし、ステップ8を終了した後から、いくら増分倍率を小さくしても収束した解が求まれなくなってしまったの



- ndummy : 仮増分計算回数
- iteration : 収束計算回数の上限
- K : 全体剛性マトリックス
- ΔF : 荷重増分ベクトル
- Δu : 変位増分ベクトル
- Fex : 節点外力ベクトル
- Fin : 節点内力ベクトル
- ε、ε' : 収束判定基準、ε < ε'

図-8 自動増分調整法のフローチャート

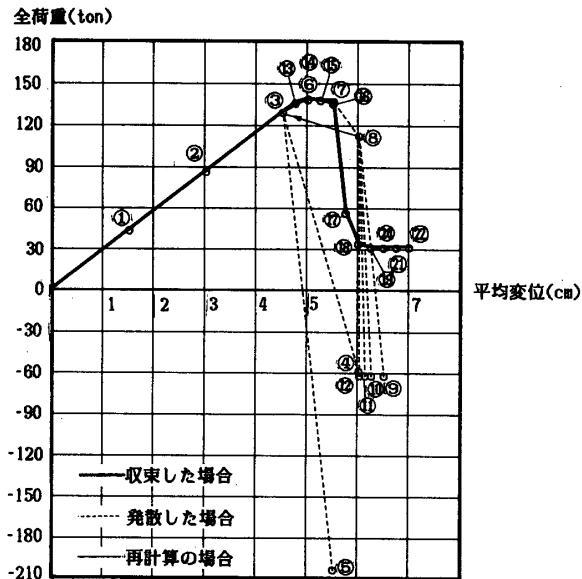


図-9 自動増分調整法による求解の軌跡

で、再びよく収束したステップ3に戻り、増分倍率を1/6として再計算を行った。その結果耐力が最大に達し、さらに低下していく性状をよく表せる解を求めることができた。

### 5. ヒューマンエラーによる立体トラス構造の力学的性状の変化

上述した設計ミス、施工ミスによる部材の不健全さが立体トラス構造の力学的性状に及ぼす影響を統計的に調べるために、モンテカルロシミュレーションを行った。乗積合同法<sup>10)</sup>で一様乱数を発生させ、部材の不健全な性質を決め、非線形解析を行った。各場合のモンテカルロシミュレーション試行回数は100とした (Appendix 参照)。

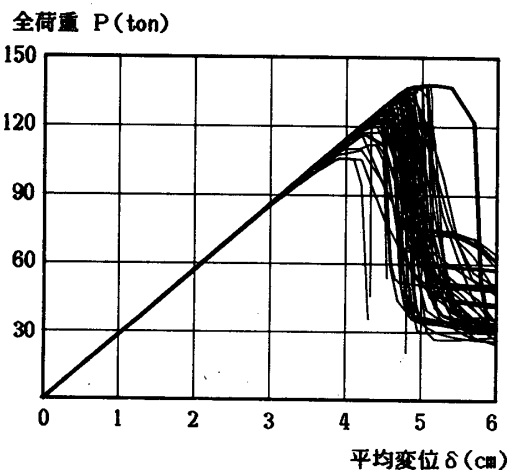
#### 5-1 設計ミスにより不適な部材が用いられた場合 (Case A)

3-2 で述べた場合について、設計ミスする部材を1本から4本までの任意本数とし、間違っで与えた部材は設

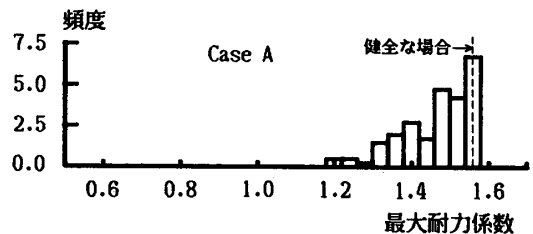
計で要求したものより1ランクから4ランク下までの任意部材とした。モンテカルロシミュレーションで解いた100ケースの解析結果の全荷重—全加力点の鉛直方向平均変位関係 (以下  $P-\delta$  関係と称する) を図-10(a)に示す。この図から長期設計荷重 (90 ton) まではほとんどすべてのケースが同じ性状を示すが、それを越えたところから、最大耐力に達し、座屈によって部材が連続的に破壊を起こし、トラス構造全体の耐力が急落するまでの領域では、各ケースの計算結果が大きく異なってくる事が分かる。各ケースの最大耐力を長期設計荷重で正規化した量 (以下最大耐力係数と称する) を求め、頻度を計算し、図-10 (b) にそのヒストグラムを示す。最大耐力係数が1.46の周りでおおよそ1.20から1.56の範囲内ではばらついている。健全な場合の最大耐力係数が1.56であるが、それに近い値を示す場合が全体の27%を占める。次に、耐力が最大耐力を越えた後のトラス構造の変形能力を調べるために、耐力がそのケースの最大耐力の80%まで低下したときの全加力点の鉛直方向平均変位を求め、それをそれ自身が最大耐力に達したときの平均変位で正規化し (以下変形能力係数と称する)、頻度を計算し、図-10(c) にそのヒストグラムを示す。この図から変形能力係数は1.00と1.12の間ではばらついているが、1.12のところでは1つの集中点がある。完全である場合の変形能力係数が1.12となっていることから、設計ミスした部材が4本までの場合の25%は変形能力がほぼ低下しないことが言える。

#### 5-2 組立ミスにより部材の力学的性状が正常でない場合 (Case B)

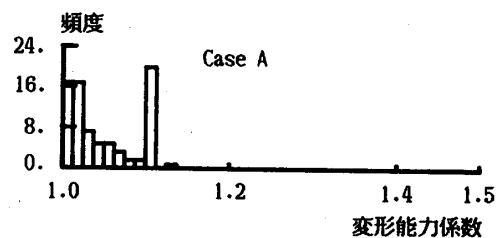
3-3 で述べた場合に対して、組立ミスする部材を1本とした場合から4本とした場合の計4つの場合について、モンテカルロシミュレーションを行った。これらを Case B-1, B-2, B-3, B-4 と呼ぶ。解析結果の  $P-\delta$  関係をそれぞれ図-11~14(a) に示す。初期剛性から降



(a) 荷重—平均変位関係

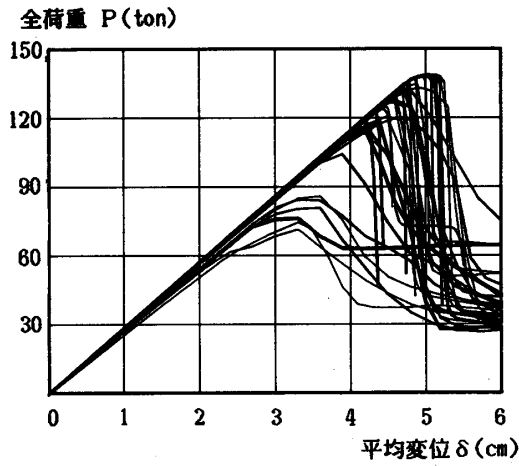


(b) 最大耐力係数のヒストグラム

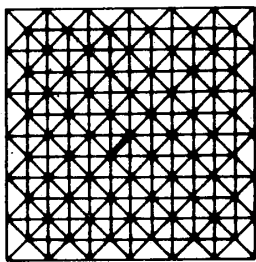


(c) 変形能力係数のヒストグラム

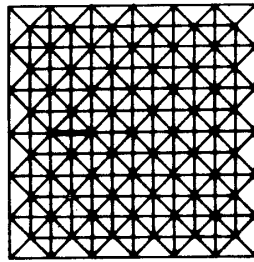
図-10 設計ミスによる部材不適な場合のモンテカルロ解析結果



(a) 荷重—平均変位関係

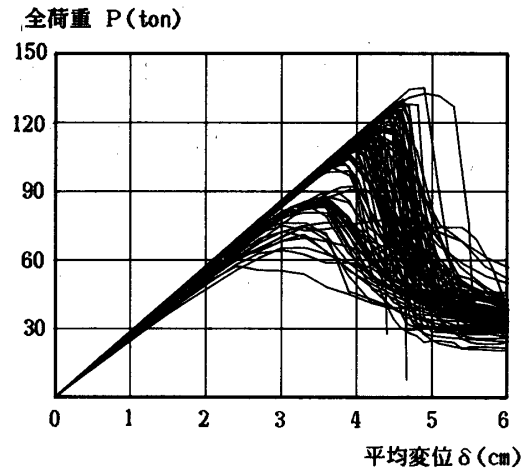


(b) 最大耐力の低下が最も小さい場合の不良部材の配置

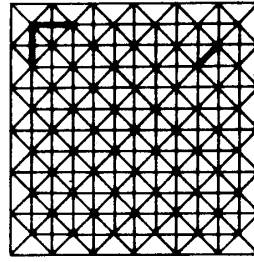


(c) 最大耐力の低下が最も大きい場合の不良部材の配置

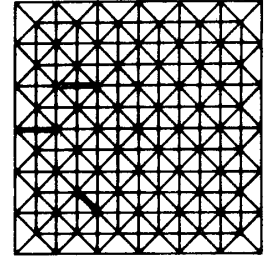
図—11 組立ミスする部材が1本とした場合のモンテカルロ解析結果



(a) 荷重—平均変位関係

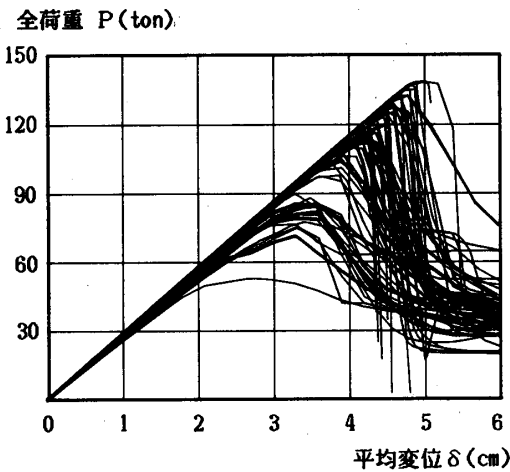


(b) 最大耐力の低下が最も小さい場合の不良部材の配置

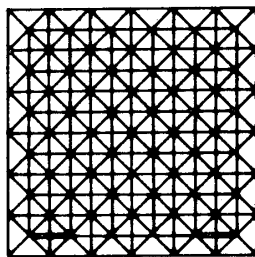


(c) 最大耐力の低下が最も大きい場合の不良部材の配置

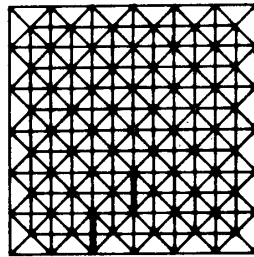
図—13 組立ミスする部材が3本とした場合のモンテカルロ解析結果



(a) 荷重—平均変位関係

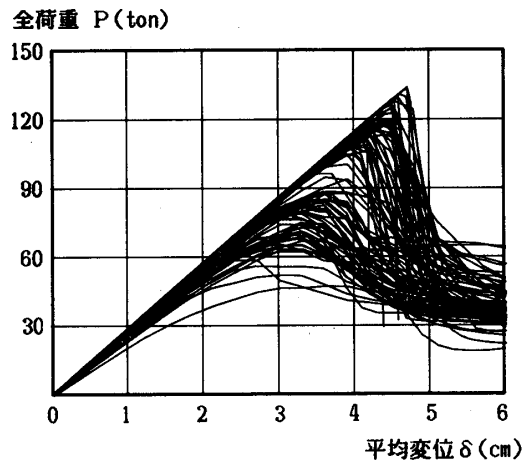


(b) 最大耐力の低下が最も小さい場合の不良部材の配置

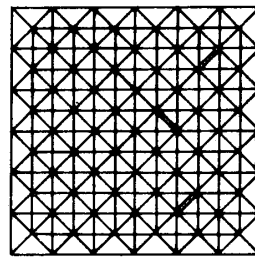


(c) 最大耐力の低下が最も大きい場合の不良部材の配置

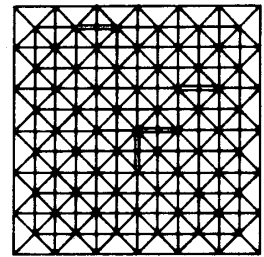
図—12 組立ミスする部材が2本とした場合のモンテカルロ解析結果



(a) 荷重—平均変位関係

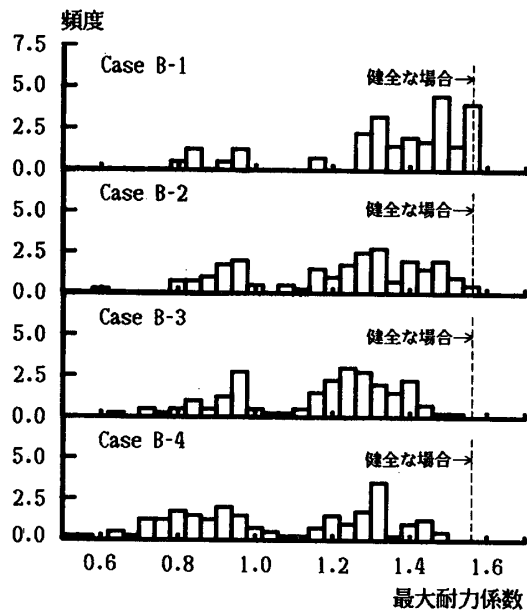


(b) 最大耐力の低下が最も小さい場合の不良部材の配置

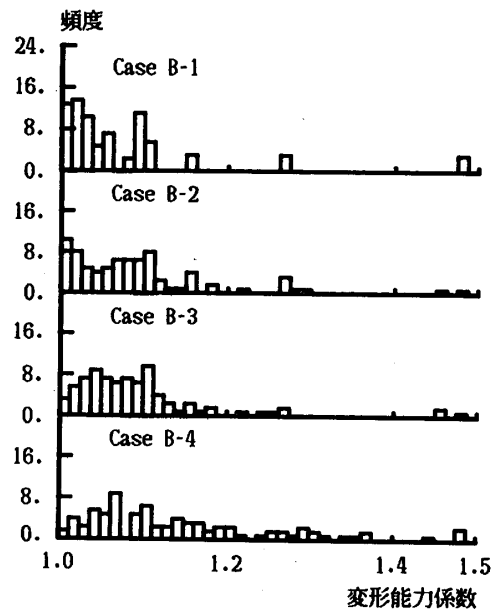


(c) 最大耐力の低下が最も大きい場合の不良部材の配置

図—14 組立ミスする部材が4本とした場合のモンテカルロ解析結果



図一五 組立ミスによる部材不適の場合の最大耐力係数ヒストグラム



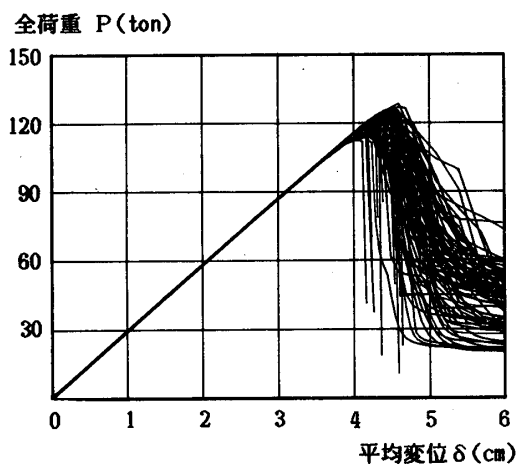
図一六 組立ミスによる部材不適の場合の変形能力係数ヒストグラム

伏した後までの広範囲にわたって、計算結果が大きくばらついていることが分かる。組立ミスする部材が1本とした場合ではトラスの対称性から  $P-\delta$  関係は限られた種類 (42種類) しかないが、2本かそれ以上とした場合になると  $P-\delta$  関係の数が急増する。Case B-1~B-4 について最大耐力の低下が最も小さい場合と最も大きい場合の組立不良な部材の配置をそれぞれ図一11~14(b), (c) に示す。二重線で示す部材が組立不良な部材である。これらの図から斜材または周辺に位置する弦材が組立不良である場合では最大耐力の低下が少ないが、中央に位置する弦材が組立不良である場合では最大耐力の低下が大きいことが分かる。5-1と同様に各場合の最大耐力係数のヒストグラムを図一15に示す。組立ミスする部材が増えるにつれ最大耐力係数が小さくなっていく傾向があることが分かる。組立ミスする部材が1~4本とした場合に最大耐力が長期設計荷重を下回る確率がそれぞれ0.14, 0.26, 0.28, 0.47となり、次第に大きくなっていく。5-1と同様に変形能力係数を図一16に示す。組立ミスする部材が増えるにつれ、変形能力はややよくなる傾向を示している。これは組立ミスする部材が多くなるほど最大耐力が下がり、 $P-\delta$  曲線全体が緩やかになったためであると考えられる。

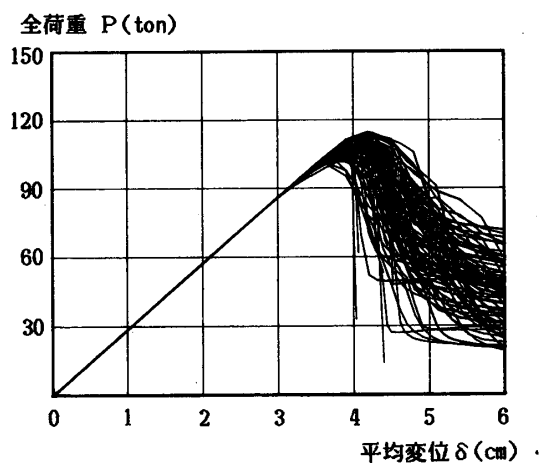
### 6. 部材耐力のばらつきによる立体トラス構造の力学的性状の変化 (Case C)

LRFD で考えられている構造の不確定性を部材耐力のばらつきで代表させ、それがトラス構造の力学的性状に与える影響について考察する。部材耐力のばらつきは対数正規分布に従うとし、平均値は5. の結果と比較を行うため引張側では短期許容耐力に設定し、圧縮側では (1) 式に示す最大耐力  $N_{max}$  に設定した。ばらつきは

部材耐力を統計的にまとめた論文<sup>11), 12)</sup>等を参考にして、変動係数をばらつきが小さい場合 (Case C-1) と大きい場合 (Case C-2) の2 Case にした。Case C-1 の場合では変動係数を引張側で0.10, 圧縮側で0.15とし、Case C-2 の場合では引張側で0.15, 圧縮側で0.225とした。図一17(a), (b) にこの2 Case 各々について100ケースの解析を行った結果より  $P-\delta$  曲線を示す。2 Case とも長期設計荷重である90 tonを越えてからばらつき始めたことが観察される。最大耐力が長期設計荷重を下回することは1ケースもなかった。最大耐力係数のヒストグラムを図一18に、変形能力係数のヒストグラムを図一19に示す。最大耐力係数はCase C-1では平均値  $\mu=1.336$ , 標準偏差  $\sigma=0.035$ , Case C-2では平均値  $\mu=1.209$ , 標準偏差  $\sigma=0.035$  の正規分布によく当てはまる。部材耐力のばらつきによるトラス構造の最大耐力の変動は比較的規則的であることがわかる。部材耐力にばらつきを与えず引張は短期許容耐力、圧縮は  $N_{max}$  とした場合の最大耐力係数が1.56であるのに比べて、Case C-1, Case C-2ともに最大耐力係数の平均値が低下しており、この2 Case で比較するとCase C-1よりばらつきの大きいCase C-2の方が小さくなっている。また、最大耐力係数のばらつきは部材耐力に与えたばらつきより小さくなっていることに気がつく。部材耐力のばらつきは上述したように引張は短期許容耐力、圧縮は  $N_{max}$  を中心値としているのにもかかわらず、トラス構造の最大耐力が下がり、またばらつきが部材のそれより狭まるのは、立体トラスが高次不静定構造とされている反面、弦材の力の伝達のメカニズムは、静定構造的の性質も兼ねており、静定構造では構造全体の耐力の平均値が構成要素の平均値より下がり、ばらつきが構成要



(a) Case C-1の場合



(b) Case C-2の場合

図-17 部材耐力のばらつきがある場合の立体トラス構造の荷重—平均変位関係

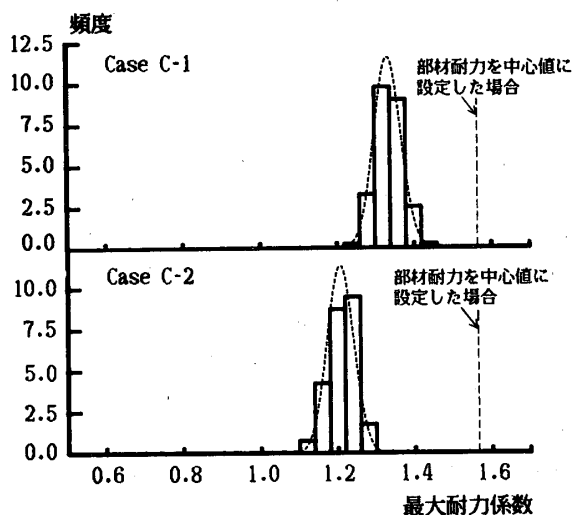


図-18 部材耐力のばらつきがある場合の最大耐力係数ヒストグラム

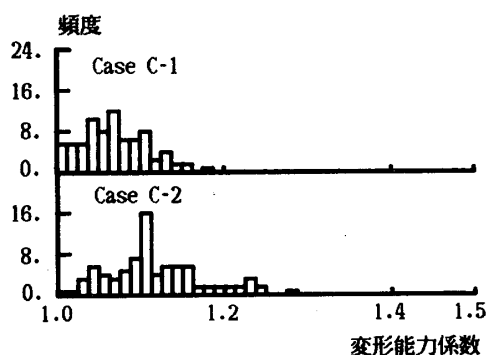


図-19 部材耐力のばらつきがある場合の変形能力係数ヒストグラム

素個々のばらつきより小さくなる性質<sup>13)</sup>があるからである。図-19より変形能力はCase C-1よりCase C-2の方がややよくなっていることがわかる。これは5-2で述べた理由と同じで、最大耐力の低下により急激な耐力落差が少なくなったためであると言える。

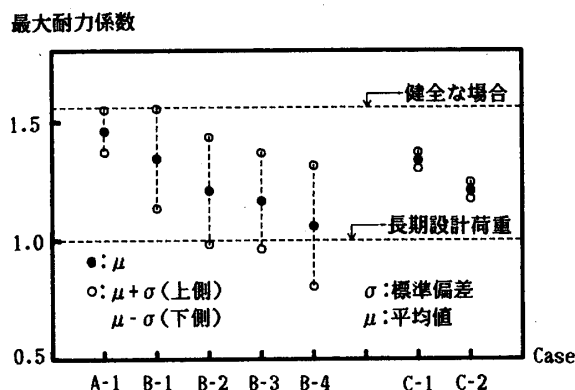


図-20 設計ミス、組立ミスの場合と部材耐力のばらつきがある場合の立体トラス構造の最大耐力の比較

### 7. ヒューマンエラーと部材耐力のばらつきが立体トラス構造に及ぼす影響についての比較

Case A, Case B-1~B-4, Case C-1~C-2の各場合の最大耐力の平均値  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  を図-20に示す。上述した設計ミスがある場合では最大耐力の  $(\mu - \sigma)$  値は長期設計荷重の1.37倍であり、組立ミスする部材が1本~4本とした場合ではこの倍率がそれぞれ1.13, 0.98, 0.96, 0.81となる。組立ミスする部材が2本かそれ以上になると  $(\mu - \sigma)$  値は長期設計荷重を下回ってしまい、構造物が崩壊する可能性が大きくなる。

5. で述べた設計ミス、組立ミスが発生するとした場合と6. で述べたLRFDで考えられている耐力のばらつきの場合によるトラス構造の最大耐力の変化を比較する。平均値についてみると、部材耐力に一般に考える程度のばらつきを与えたCase C-1の場合 ( $\mu=1.336$ ) は組立ミスする部材が1本とした場合 ( $\mu=1.344$ ) と近い値となっており、それより1.5倍大きいばらつきを与えたCase C-2の場合 ( $\mu=1.209$ ) は組立ミスする部材が2本とした場合 ( $\mu=1.209$ ) と同じ値となっている。最も注目すべき点はばらつきの大きさの違いである。標準偏差で比べると、Case C-1の場合 ( $\sigma=0.035$ ) に比



べ、組立ミスする部材が1本とした場合 ( $\sigma=0.210$ ) は6.00倍、4本とした場合 ( $\sigma=0.254$ ) は7.26倍、設計ミスした場合 ( $\sigma=0.089$ ) は2.54倍大きいことがわかる。ヒューマンエラーが発生すると、たとえそれが小さく、例えば組立ミスする部材数が全部材数288本の内約1%を占める場合としても、LRFDで考えている不確定要因、例えば全部材に10%の耐力のばらつきがある場合よりもトラス構造の終局状況に大きな影響を及ぼすことが分かる。

## 8. 結論

立体トラス部材の引張降伏と圧縮座屈性状をモデル化し、コンピュータによる増分自動調整ができるような弾塑性有限変位解析プログラムを作成した。この解析プログラムを用いてヒューマンエラーによるトラス構造の力学的性状の変化および部材耐力のばらつきによるトラス構造の力学的性状の変化をモンテカルロシミュレーションによって統計的に解析し、比較した。本論文で考察した立体トラス構造の解析より次の結論が得られた。

1) 設計における部材選択ミス、組立ミスはトラス構造の力学的性状に大きな影響を及ぼす。構造におけるミスする部材の位置の違いによって、その最大耐力、最大耐力以降の変形状が大きく変化する。

2) 288本の部材の中、2本かそれ以上の部材が組立不良であると、トラス構造の最大耐力の ( $\mu-\sigma$ ) 値が長期設計荷重を下回ってしまい、構造物が崩壊する可能性が大きくなる。

3) LRFDで考えられている不確定要因の1つである部材の耐力変動により立体トラス構造の最大耐力の平均値は健全な場合のそれより下がるが、ばらつきは部材のばらつきより小さくなる。

4) 設計ミス、組立ミスが発生し、その部材数が全部材数の約1%を占める場合と全部材に10%の耐力のばらつきがある場合と比べ、立体トラス構造の最大耐力の平均値は同程度に低下するが、ばらつきは6倍以上大きい。

設計ミス、組立ミスという類のヒューマンエラーは人間が構造物の設計、施工にかかわっている限り完全に無くすことのできないものである上、それが発生すると構造物に与える影響が著しいことが以上の結果より明らかになり、ヒューマンエラーが過去における構造物の破壊の主な原因になっていることが十分に理解できる。

## 謝辞

立体トラス構造だけに限らず、鉄骨構造の安全性に関する考え方、研究への取り組み方等について常に有益な示唆を与えて下さっている東京工業大学鈴木敏郎教授へ心から感謝致します。部材の軸力-軸変形関係は摂南大学柴田道生教授のプログラムを参考にさせていただきました。御礼申し上げます。

研究費の一部に文部省科学研究費を使用しました。関係者各位に御礼申し上げます。

## Appendix

### モンテカルロシミュレーションにおける標本サイズ決定の妥当性

設計、組立のプロセス中に含まれるヒューマンエラーがトラス構造の力学的性状に及ぼす影響をモンテカルロシミュレーションによって統計的に考察するために、総部材数288本から構成されるトラス構造を用いたが、部材が不良となる母集団の数はミスする部材が1本の場合ではトラス構造の対称性を考えて42となり、ミスする部材が2本となると急激に大きくなり、10000を越えてしまう。母集団のサイズに合わせた標本サイズの決定の基準はないが、標本サイズを大きくすることによって母集団に関する推測の信頼性が高くなることはわかっている<sup>14),15)</sup>。本論文では各場合についてモンテカルロシミュレーションの回数を一律に100としたが、以下その妥当性について検討を加える。

#### 1) 組立ミスする部材が1本の場合

この場合では標本サイズより母集団のサイズの方が小さい。不良部材が1本であるすべての場合について非線形解析を行い、それぞれの場合のあり得る数を乗じて最大耐力係数の頻度を求め、この結果を本論中に行った100ケースのモンテカルロシミュレーションの結果と比較する。2つの方法で求めた最大耐力係数のヒストグラムを図a-1に示す。両者の傾向は良く一致しており、平均値の差は0.019であり、モンテカルロシミュレーションの標準偏差0.21の1/10未満であることがわかる。

#### 2) 組立ミスする部材が2本の場合

組立ミスする部材が2本の場合は母集団が非常に大きくなり、それに比べ100という標本サイズは相対的に小さくなる。標本サイズが小さいため、標本の選択法によって解析結果の傾向が変る恐れが生じる。ここでは組立ミスする部材が2本の場合について、本論中の100ケースのモンテカルロシミュレーション(グループA)の他に、別の標本で100ケースのモンテカルロシミュレーション(グループB)を行い、その統計的結果の傾向につい

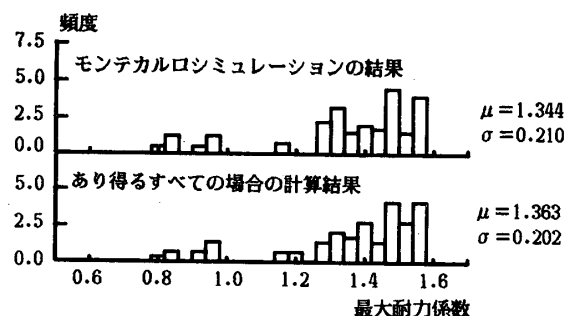


図 a-1 不良部材が1本の場合についての検討

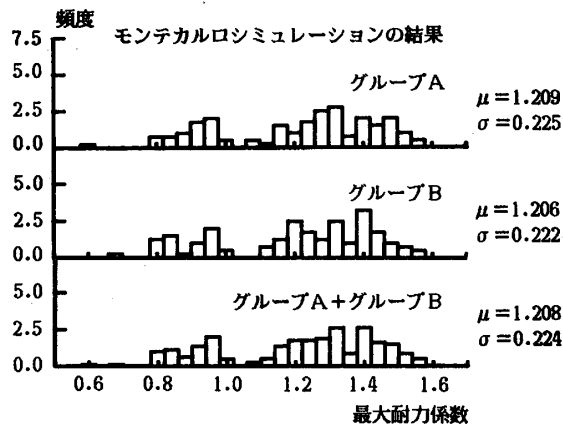


図 a-2 不良部材が2本の場合についての検討

て考察する。グループA、グループBおよび両グループを合わせたものの最大耐力係数のヒストグラムを図 a-2 に示す。3者の結果はともに同様な分布を示しており、平均値で比較すると相違が0.003以下となっていることがわかる。標本の選択の違いによって解析結果の傾向はほとんど大きく変化しないことが確認できた。

以上の考察により、モンテカルロシミュレーションの試行回数を100と設定することは妥当であると判断する。問題点としては、標本の中に最も耐力が低下する場合が取上げられていない可能性が残ることである。そのため、本論文では最大耐力係数の  $(\mu - \sigma)$  値について考察を行い、最低値についての考察は行わなかった。

参考文献

- 1) D.I. Blockley : Analysis of Structural Failures, Proc. Instn. Civ. Engrs, Partl. 62, pp.51~74, February 1977
- 2) Ruediger Rackwitz : Human Error in Design and Structural Failure, Modeling Human Error in Structural Design and Construction, ed. Andrzej S. Nowak, ASCE pp.216~224, 1986
- 3) R.E. Melchers : Human Error in Structural Design

- Tasks, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.7, pp.1795~1807, July 1989
- 4) 日本建築学会構造委員会鋼構造分科会編：鋼構造荷重・耐力係数設計法試案, 1986
- 5) 星谷 勝, 石井 清著：構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986
- 6) 和田 章, 王 竹：不慮の部材破壊による不静定複層立体トラスの耐力低下に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第402号, pp.121~131, 1989年8月
- 7) 藤本盛久, 和田 章, 白方和彦, 小杉 立：筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性解析に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第209号, pp.41~51, 昭和48年7月
- 8) 柴田道生, 中村 武, 若林 實：鉄骨筋違の履歴特性の定式化—その1 定式化関数の誘導—, 日本建築学会論文報告集, 第316号, pp.18~23, 昭和57年6月
- 9) 柴田道生, 荒木秀幸：区分線形化された復元力関数を用いた筋違付架構の弾塑性解析 (その1), 日本建築大会学術講演梗概集, pp.989~990, 昭和61年8月
- 10) 亀田弘行, 池淵周一, 春名 攻共著：新体系土工学2 確率・統計解析, 技報堂出版, 1981年
- 11) Theodore V. Galambos, Bruce Ellingwood, James G. MacGregor and C. Allin Cornell : Proability Based Load Criteria : Assessment of Current Design Practice, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.108, No.5, pp.959~977, May 1982
- 12) 小野徹郎, 井戸田秀樹, 河原弘明：高次積率を用いた鋼圧縮材および曲げ材の抵抗強度に関する統計論的研究, 日本建築学会論文報告集, 第370号, pp.19~27, 1986年12月
- 13) A.P. ルジャニーツィン著, 高岡宣善訳：構造物の信頼性解析, 丸善株式会社, 1980年
- 14) 近藤良夫, 舟阪 渡共編：技術者のための統計的方法, 共立出版株式会社, 1985年
- 15) Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang 著, 伊藤 學, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三共訳：土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善株式会社, 1988年 (1989年9月10日原稿受理, 1990年1月29日採用決定)