

# 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

正 会 員 和 田 章\*  
正 会 員 王 竹\*\*

## 1. 序 論

構造物の力学的挙動は常に多くの不確定な要因に影響される。現在多く研究され、実用化に向けて進められているLRFD法<sup>1),2),3)</sup>は荷重および耐力の不確かさを確率統計論的な手法で評価し、荷重の確率分布と耐力の確率分布に基づき、荷重が耐力を上回る確率がある十分小さい値以下になるように設計を行う方法である。しかし、実際の構造物の被害例、破壊例を調べてみると、その原因は必ずしも設計の時点で考えた破壊モードとはならず、設計ミス、部材製作ミス、組立ミス、メンテナンスミス等多種の原因によることが少なくない<sup>4)</sup>。

### 1-1 構造物の破壊例

構造物の破壊原因を究明するために、破壊例を分析した研究が行われている。鷲尾・高橋・五十嵐ら<sup>5)</sup>は過去の破壊例を多量に収集し、それらを破壊した構造物の種類および破壊原因ごとにまとめ、分析を行い、構造設計の成功、失敗と建築の安全性について論じている。それには地震・台風・豪雪等過酷な荷重条件による構造物の破壊例以外にも、設計における仮定の誤り、部材の品質不良、ガス爆発のような突如に発生する衝撃力というような設計時点では考えていなかった原因による構造物の破壊例が多く示されている。Ellingwood<sup>6)</sup>は構造物の破壊の大部分は耐力、荷重の統計的なばらつきの大小関係によって発生するというよりも、計画・設計ミス、施工ミスおよびメンテナンスミス等によって発生することが多いことを大量な文献レビューより指摘している。ここではさらに、1987年と1988年のENR誌<sup>7)</sup>から、最近2年間に報告された構造物の破壊例を調べ、表-1にその破壊原因とともにまとめた。破壊した構造物20例の内、設計時に考えた破壊モードで壊れたのはわずか2例にとどまっており、その他の大部分は設計ミス、施工時のミス等によるものである。

### 1-2 本研究の目的

本論文では上述のような設計ミス、施工ミスあるいは突如に発生する外部変動によって構造物の一部が早期に

不慮の破壊を起こした後に、構造物が発揮し得る抵抗力について明らかにしたいと考える。しかし、上記のような不確定的な要因は数学的なモデルとして理論的に扱うことが困難である。本研究では不確定な要因に対する構造物の抵抗力の変化を調べるため、早期に不慮の部材破壊が起きたときの構造系全体の挙動を考えられる場合ごとに弾塑性解析によって調べ、耐力の低下を統計的にとらえる方法を用いる。

### 1-3 解析対象

解析対象として複層立体トラスを用いる。立体トラスは高次不静定構造であるため、いくつかの部材もしくは接合部が降伏、破壊し、効果がなくなっても、すぐには全体としての安定性を失うことはないといわれている<sup>8)</sup>。しかし、実際に立体トラスが破壊<sup>9)</sup>した事故をきっかけとして、その連鎖的な破壊性状が注目されるようになり、部材の座屈後の挙動を考慮したトラスの非線形解析法の開発<sup>10)-14)</sup>や、連鎖的な破壊についての研究<sup>15)</sup>が多くなされるようになった。しかし、これらの研究は健全なトラスを対象に、その破壊プロセスを解明しようとしたものである。本研究では、比較的早期に不慮の部材破壊が生じた場合、すなわち、他の部材が弾性域にあるときにある1本の部材が不慮の破壊を生じた場合、残存している部材で形作られる立体トラスの耐力がすべての部材が健全である場合に比べ、どの程度低下するかを明らかにすることによって、部材の早期の不慮破壊が立体トラス全体の力学的挙動に与える影響を調べる。

## 2. 本研究に用いる立体トラスの設計方法および設計例

立体トラスは不静定構造であるため、全体形状および部材の組方が決まっても、1本1本の部材の選択は一義的には決まらない<sup>16)</sup>。例えば使用する部材の種類数を多くする場合と少なくする場合、また長方形プランの立体トラスの場合にはその短辺方向と長辺方向の力の分担率の設定等設計者の設計方針によってでき上がる設計は変わる。その結果として、立体トラスが不静定構造として持っている余力の程度、部材の不慮の破壊に対する全体の抵抗力も変わることが予想できる。本研究では下記の設計方法に従って、正方形プランおよび長方形プ

\* 東京工業大学 助教授・工博

\*\* 東京工業大学 大学院生

(1989年1月10日原稿受理、1989年5月29日採用決定)

表—1 1987年1月~1988年12月の間に ENR 誌に報告された構造物の破壊例

| 破壊した構造物名  | 構造概要   | 破壊状況  | 破壊原因   | 分類*        | Ref.         |
|---|--|---|--|------------|--------------|
| Cable roof of fencing arena in Seoul Olympic Park, South Korea              | 軽量ケーブルドーム屋根。   | ケーブル及びそれを支える支柱の調整中に、数本のケーブルが切れ、コンサルタント1人と作業員2人が56ftの高さから落ちて死亡した。            | 支柱が正位置になっておらず、数本のケーブルが引っぱられ、他のケーブルが緩んでいたため、不釣り合い力が働いて、ケーブルが鋼物からぬけた。                | c 4        | Jan. 8 1987  |
| New stadium deck of Husky Stadium of University of Washington, Seattle, USA | 上層スタンドの増築。大きい断面形の鋼管で構成されるトラス構造で、大きい斜面スタンドと片持の屋根からなる。   | 鉄骨組立職人が屋根トラスとハンチの接続部に「小波」を見た1時間後に構造全体が崩壊した。                                 | 組立て中に用いた仮の屋根面ブレースが安定性を保つのに不十分だった。  | c 4        | Mar. 5 1987  |
| Roof of a roller skating rink, Richmond, Va., USA                           | 25,000ft <sup>2</sup> を覆うプレハブ鉄骨切妻屋根。   | 設計荷重の半分の荷重でだけが座屈し、隅りを引張り崩し、全体が崩壊した。   | (原因に関する記述無し)   |            | Mar. 5 1987  |
| Fabric tension roof of Shoreline Amphitheater in California, USA            | 2つの塔で支えられたシリコンコーティングガラス繊維材の膜屋根構造。面積: 21000ft <sup>2</sup>  | 突風のため、長さ15ftの継目から 200ftの屋根材が引き裂かれ、全屋根の 1/3が破壊し、構造全体に破壊が進む恐れをもたらした。          | 破壊のきっかけとなった継目は現場で接着剤で接着したものであった。破壊が発生した時の荷重はわずか設計荷重の1/10だった。                       | c 6        | Apr. 16 1987 |
| L'Ambiance Plaza under construction in Bridgeport Conn., USA                | プレキャストコンクリート造の13階建コンプレックス。約100x60ftの長方形プランの2つのタワーからなるこの建物は鉄骨柱、コンクリートのせん断壁とポストテンションのスラブから構成されている。 | 工事の 60%が完成した時点で、ひび割れの音が生じた後、爆発的に一方のタワーが崩壊した。28人が死亡した。                       | 工事中の仮ブレースが不十分だった。shearheadの設計ミス。   | c 2<br>c 4 | Apr. 30 1987 |
| A reinforced concrete apartment building in Belem, Brazil                   | コンクリートラーメン構造13階建のアパート建築。   | 3年に渡る工期の完成の間に前列の杭に水力ジャッキを設置していたところで構造物が揺れて崩壊した。                             | 地盤の不同沈下に対応できる設計になっていなかった。  | c 2        | Aug. 20 1987 |
| Gymnasium roof of Athena Elementary School Ore., USA                        | 面積4,000ft <sup>2</sup> を覆う木造 "open-web" トラス屋根。接合部は "finger-joint" を使用。                           | 突然に起きた全体崩壊。   | joint の接着が不十分であった。金属プレートによる補強がない。  | c 2        | Sep. 10 1987 |
| 2 towers in San Antonio, Tex., USA  | 大きい旗を上げるための 40ft を離れた2つの高さ150ftの鋼管タワー。   | 全体崩壊。   | 風速45mphに対して設計を行っていたが、破壊時の実際風速は 55 mphであった。   | c 1        | Sep. 17 1987 |
| A building in New York garment district, USA                                | 6階建壁式組積構造。   | 構造物の中央部分が破壊し、前部と後部残存した。   | 許可なしの補修で 20x10ftの壁レンガがはずされた。   | c 6        | Nov. 3 1987  |
| A Manhattan town house, New York, USA                                       | 平面プラン 50x25ftの5階建壁式組積構造。140年前に建設されたものである。  | 全体崩壊。   | 許可なしの補修で、組積構造の基礎壁の補強の方法が間違っていた。  | c 6        | Nov. 19 1987 |
| A print plant in Waseca, Minn., USA   | 幅130ft、長さ910ft、高さ36ftのコンクリート壁つきの鉄骨工場構造。  | 6スパンの屋根が落ちて、コンクリートの壁が外側に押し飛ばされた。  | 柱の不均等配置。積雪。  | c 2<br>c 1 | Feb. 4 1988  |
| Jack Breslin Student Events Centre, Michigan State University, USA          | 長さ 292ftのアリーナのボックス型屋根トラスはり。  | 6組のトラスはりからなるアリーナの屋根の第三組を持ち上げ、組んでいたところ、75ftの高さから落下した。                        | クレーンのオーバーロード。  | c 4        | Mar. 3 1988  |
| A supermarket near Vancouver, BC, Canada                                    | 総面積 95,000ft <sup>2</sup> の鉄骨フレーム構造。スチールデッキコンクリート屋根。   | 90x70ftの屋根が35ftの高さから崩れ落ちた。  | under-designで、30in.のせいを必要とする鉄骨はりが24in.しか与えられなかった。                                  | c 2        | May 5 1988   |
| A children's hospital in Jammu, Kashmir, India                              | 1985年竣工した鉄骨フレーム構造、コンクリートレンガ仕上げ。  | 完全崩壊。   | 標準に合わない材料の採用。  | c 3        | May 12 1988  |
| A cut-and-cover tunnel of Interstate 90 out of Seattle, USA                 | 5車道のトンネルを支持する長さ 85ft、重さ 38.5tonのはり。  | 1本のコンクリートはりスリップしたことから他の6本のはりが連鎖的に破壊し、それからなる屋根が崩れた。                          | diaphragmでつなげるような設計をしていたが、工事中でその通りにしていなかった。  | c 4        | Jun. 2 1988  |
| KTVU-TV television tower in Colony, Mo., USA                                | コンクリート基礎の鋼管トラス塔、高さ2000ftで、1100本の部材(rod)からなる。(直径は5/8-3/4in)                                       | ブレース部材を取替えたときに、下の部分が北向きへ、上の部分が西向きへ、中央の1000ftが真下へ倒れ、破壊した。                    | ブレース材の取替作業中に、安全管理をする専門家がいないかった。カーボン含有量0.14~0.15%の鋼材が0.33%のものになっていたため部材が非常に脆くなっていた。 | c 3<br>c 4 | Jun. 9 1988  |
| A bridge of interstate 10 near EL Paso, Texas, USA                          | 直径24inのコンクリート柱につく腕木に一端が支えられ、足場にも端が支えられた長さ40ft、幅26ftのコンクリートT字型はり。                                 | コンクリートの打ち込みを行っているとき、はりの中央から座屈したが、一端からこわれた。                                  | 型枠の欠陥または、足場の過ちがあった。  | c 4        | Jun. 23 1988 |
| Ceiling in a city hotel in New York, USA                                    | 厚さ1/2inの石膏ボードと木材、6-inのコンクリートと18inの断熱材からなる天井。   | 大きさ6x12ft、重さ数千ポンドの天井が落ちて、客1人が死亡した。  | 水道からの水もれによってコンクリートの補強筋が強度を失い、破壊に至った。   | c 5        | Jul. 7 1988  |
| Arena scoreboard of New Charlotte Coliseum in North Carolina, USA           | 重さ18トンのスコアボード。   | 屋根フレームから4本のケーブルで吊したスコアボードを下げる時に一台の巻上げ機が動作しなかったため、屋根フレームに衝突し、55ftの高さから壊れ落ちた。 | 機械のミスによる構造物の破壊。  | c 3        | Aug. 25 1988 |
| A prestressed concrete bridge in Aschaffenburg, W.Germany                   | 全長1183ft、長さが異なる7つの桁から構成されている。  | 長さ256ftの7番目の桁を設置した時、それかが落ち、隣の140ftの桁も落ちた。                                   | (原因に関する記述無し)   |            | Sep. 8 1988  |

\* c 1: 設計した崩壊モード c 2: 設計ミス c 3: 部材製作ミス c 4: 組立、管理ミス c 5: メンテナンスミス c 6: その他のミス

ランの立体トラスについて、使用部材の種類の数を変え、各々7種類の設計を行う。

2-1 使用部材の種類

トラスの部材には STK 41 の鋼管材を用いることにする。鋼管の外径、厚み等の寸法は JIS に決められているものを参考に、図—1 に示すように外径  $D$  と厚み  $t$  の関係を図中に示した線形単純回帰関数で近似し、外径と厚みは 1 対 1 に対応するとして使用部材の断面形を決める。トラスに用い得る最も細い使用部材として細長比

が  $\lambda=200$  になる断面形を弦材、斜材別に決める。その後この部材の許容圧縮軸力  $N_{c0}$  を起点として部材の許容圧縮軸力が等比級数となるように、部材断面形のリストを弦材と斜材のために独立に用意する。等比級数の比を  $\alpha$  とすると、 $i$  番目の圧縮材の許容圧縮軸力は (1) 式で表せる。こうして決めた使用部材を引張材としても用いる。許容圧縮軸力は細長比と断面積で決まり、許容引張軸力は断面積だけによって決まるため、同じ長さの部材で考えると、許容引張軸力は隣接する種類の間で圧縮

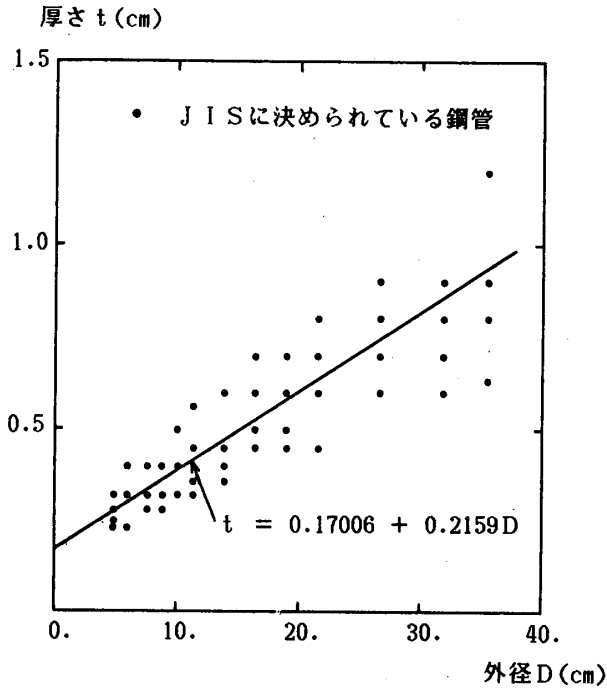


図-1 JISに決められている STK41 の鋼管の外径と厚さおよび本研究に用いる外径と厚さの関係

力を受ける場合より近接するので、引張部材の許容軸力の比は圧縮材のために考えた値より幾分小さい値になり、小刻みに使用部材の種類を用意したことになる。

$$N_{ci} = \alpha_i \cdot N_{ci-1} \quad (i=1 \sim n) \dots\dots\dots (1)$$

$N_{c0}$  : 最も細い使用部材の許容圧縮軸力

$N_{ci}$  :  $i$  番目の使用部材の許容圧縮軸力

設計荷重時に部材に生じる軸力 ( $N_a$ ) と許容軸力 ( $N_a$ ) の比 ( $S = N_a / N_a$ ) を安全率とすると、その上限  $S_{max}$  と下限  $S_{min}$  との比  $S_{max} / S_{min}$  はやはり  $\alpha$  となる。作用軸力が十分に小さく、最も細い使用部材を用いる場合を除けば、他のすべての部材は安全率が上限と下限の間に入ることになる。

2-2 設計の方法

立体トラスのすべての部材が弾性域にとどまるように十分大きな断面積を有した同一断面形の使用部材を全部材に与え、設計荷重を作用させて弾性解析を行う。求められた各部材の発生軸力に応じて、許容軸力がそれより大きく、かつ最も近い部材を 2-1 で述べた使用部材のリストから選びその位置に採用する。こうして修正された構造系について再び弾性解析を行う。この結果に基づき上と同じ方法により断面を変更する。この手順を断面形の変更が必要なくなるまで繰り返す。こうして得られた部材配置を立体トラスの設計案とする。図-2 に設計手順フローチャートを示す。

2-3 立体トラスの形状と荷重条件

2層6×6 スパンの正方形立体トラス (以下トラス SQ と称する) と2層6×9 スパンの長方形立体トラス (以下トラス RE と称する) を設計する。1 グリッドの長さ

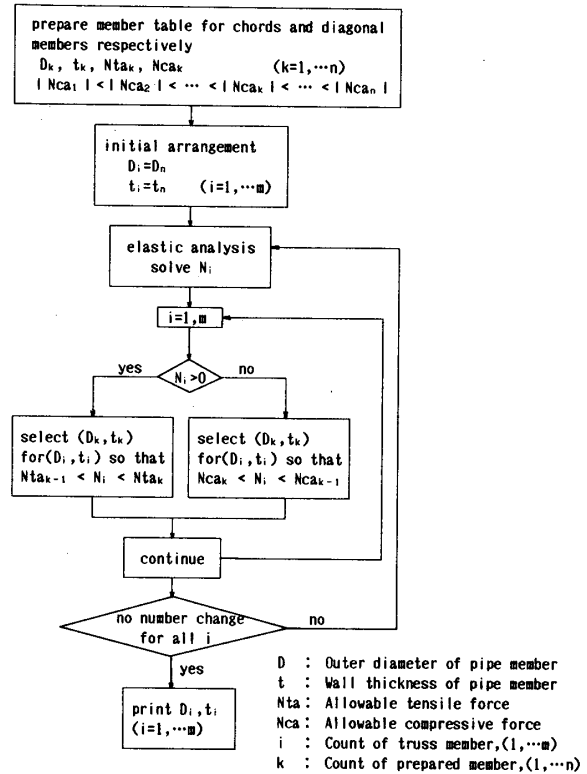


図-2 本研究に用いる立体トラスの設計手順フローチャート

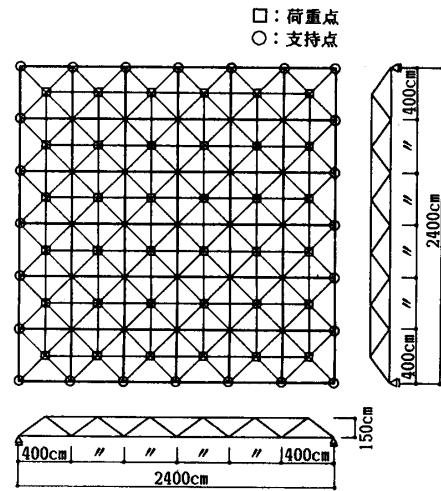


図-3 正方形プラン立体トラス (トラス SQ) の全体形状

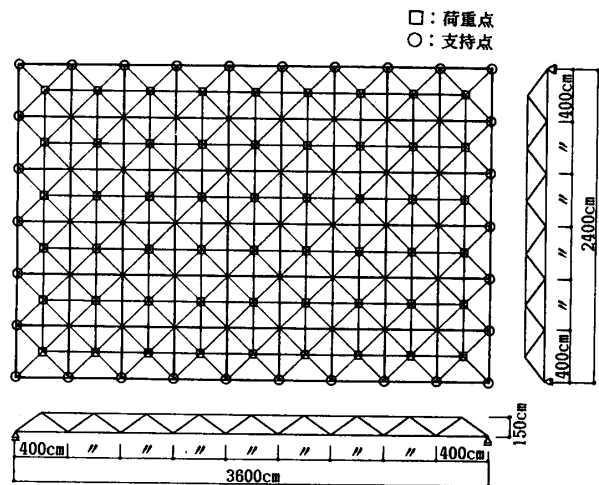


図-4 長方形プラン立体トラス (トラス RE) の全体形状

は  $x, y$  両方向とも 4 m, 高さは 1.5 m とする。下層の周辺上のすべての節点を鉛直方向に支持し, 上層のすべての節点について一様な鉛直荷重を作用させる。荷重は固定荷重, 積雪荷重等の鉛直荷重を考え, 設計荷重を 5.0 ton/節点とした。風荷重のような吹上げ荷重は考えないことにする。トラス SQ, トラス RE の形状をそれぞれ図-3, 図-4 に示す。

2-4 設計例

部材の安全率の幅を表す値  $\alpha$  が異なる 2 種類の設計をトラス SQ とトラス RE について行った。 $\alpha$  が小さいほど使用部材間の許容軸力の開きが小さく, 使用部材の種類が多い。反対に  $\alpha$  が大きいほど使用部材間の許容軸力の開きが大きく, 使用部材の種類が少ない。ここでは, トラス SQ, トラス RE について同様に,  $S_{min}=1.5$ ,

$\alpha=1.2$  を基本として使用部材を用意した。表-2 の左側に使用部材の一覧表を示す。 $\alpha=1.2$  (設計  $f$ ),  $1.2^\circ$  (設計  $r$ ) の 2 種類の設計を考えるが,  $\alpha=1.2^\circ$  の場合では最小から 2 番目の部材の選択によって, 異なる 6 種類の設計ができる ( $r1 \sim r6$ )。各設計案の使用部材の一覧を表-2 の右側に示す。各設計案のトラスについて, 節点を点として, 部材断面積  $\times$  部材長から求めた体積に比重を乗じて求めた全鋼材重量および 3.2 で述べる方法で求めた終局耐力を図-5 に示す。 $r1 \sim r6$  は  $\alpha=1.2^\circ$  の設計案であるが, 部材の選択方法が異なると, 終局耐力が大きく変化することが分る。以上の設計案から, トラス SQ については  $f, r4$  と  $r5$  を, トラス RE については  $f, r1$  と  $r3$  を選んで以後の考察を行う。以上 14 の設計案の内トラス SQf とトラス REf の部材配置をそ

表-2 設計例に用いる使用部材および各設計案において用いた使用部材の本数の一覧表

| 部材位置            | 使用部材種類 | 外径 D (cm) | 厚さ t (cm) | 短期許容引張軸力 N t (t) | 短期許容圧縮軸力 N c (t) | 使用部材の本数       |    |    |    |    |    |               |    |    |     |     |    |    |    |    |    |
|-----------------|--------|-----------|-----------|------------------|------------------|---------------|----|----|----|----|----|---------------|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|
|                 |        |           |           |                  |                  | トラス SQ の設計案番号 |    |    |    |    |    | トラス RE の設計案番号 |    |    |     |     |    |    |    |    |    |
|                 |        |           |           |                  |                  | f             | r1 | r2 | r3 | r4 | r5 | r6            | f  | r1 | r2  | r3  | r4 | r5 | r6 | f' |    |
| 弦材<br>L = 400cm | c1     | 6.05      | 0.30      | 13.01            | 2.91             | 60            | 60 | 60 | 68 | 68 | 60 | 68            | 95 | 99 | 101 | 103 | 99 | 07 | 69 | 75 |    |
|                 | c2     | 6.37      | 0.31      | 14.05(1.08)      | 3.49(1.20)       | 0             |    | 0  |    |    |    |               | 4  |    | 4   |     |    |    |    | 4  |    |
|                 | c3     | 6.70      | 0.32      | 15.17(1.08)      | 4.19(1.20)       | 8             |    |    | 0  |    |    |               | 12 |    |     | 16  |    |    |    | 8  |    |
|                 | c4     | 7.06      | 0.33      | 16.38(1.08)      | 5.02(1.20)       | 0             |    |    |    | 0  |    |               | 0  |    |     |     | 16 |    |    | 0  |    |
|                 | c5     | 7.43      | 0.33      | 17.69(1.08)      | 6.03(1.20)       | 0             |    |    |    |    | 8  |               | 6  |    |     |     |    |    | 12 | 2  |    |
|                 | c6     | 7.82      | 0.34      | 19.12(1.08)      | 7.23(1.20)       | 0             |    |    |    |    |    | 0             | 0  |    |     |     |    |    |    | 8  | 0  |
|                 | c7     | 8.23      | 0.35      | 20.67(1.08)      | 8.68(1.20)       | 8             | 16 |    |    |    |    |               | 0  | 14 |     |     |    |    |    | 0  |    |
|                 | c8     | 8.66      | 0.36      | 22.35(1.08)      | 10.41(1.20)      | 0             |    | 16 |    |    |    |               | 10 |    | 16  |     |    |    |    | 4  |    |
|                 | c9     | 9.11      | 0.37      | 24.18(1.08)      | 12.50(1.20)      | 0             |    |    | 12 |    |    |               | 4  |    |     | 14  |    |    |    | 4  |    |
|                 | c10    | 9.58      | 0.38      | 26.17(1.08)      | 14.99(1.20)      | 0             |    |    |    | 12 |    |               | 8  |    |     |     |    | 24 |    | 8  |    |
|                 | c11    | 10.16     | 0.39      | 28.67(1.10)      | 17.99(1.20)      | 0             |    |    |    |    | 12 |               | 2  |    |     |     |    |    | 20 | 2  |    |
|                 | c12    | 10.87     | 0.41      | 31.95(1.11)      | 21.59(1.20)      | 16            |    |    |    |    |    | 12            | 12 |    |     |     |    |    |    | 18 | 12 |
|                 | c13    | 11.70     | 0.42      | 35.95(1.13)      | 25.91(1.20)      | 8             | 12 |    |    |    |    |               | 8  | 44 |     |     |    |    |    | 8  |    |
|                 | c14    | 12.66     | 0.45      | 40.81(1.14)      | 31.09(1.20)      | 8             |    | 32 |    |    |    |               | 6  |    | 40  |     |    |    |    | 6  |    |
|                 | c15    | 13.74     | 0.47      | 46.73(1.15)      | 37.31(1.20)      | 8             |    |    | 36 |    |    |               | 4  |    |     | 28  |    |    |    | 8  |    |
|                 | c16    | 14.98     | 0.50      | 53.90(1.15)      | 44.77(1.20)      | 8             |    |    |    | 44 |    |               | 8  |    |     |     | 36 |    |    | 14 |    |
|                 | c17    | 16.37     | 0.52      | 62.58(1.16)      | 53.73(1.20)      | 0             |    |    |    |    | 60 |               | 0  |    |     |     |    | 40 |    | 0  |    |
|                 | c18    | 17.94     | 0.56      | 73.06(1.17)      | 64.47(1.20)      | 16            |    |    |    |    |    | 64            | 4  |    |     |     |    |    | 16 | 8  |    |
|                 | c19    | 19.69     | 0.60      | 85.72(1.17)      | 77.36(1.20)      | 4             | 56 |    |    |    |    |               | 12 | 42 |     |     |    |    |    | 20 |    |
|                 | c20    | 21.65     | 0.64      | 100.97(1.18)     | 92.84(1.20)      |               |    | 36 |    |    |    |               | 8  |    | 46  |     |    |    |    | 14 |    |
|                 | c21    | 23.82     | 0.69      | 119.33(1.18)     | 111.41(1.20)     |               |    |    | 28 |    |    |               | 6  |    |     | 55  |    |    |    | 10 |    |
|                 | c22    | 26.22     | 0.74      | 141.43(1.19)     | 133.69(1.20)     |               |    |    |    | 20 |    |               | 7  |    |     |     | 41 |    |    | 9  |    |
|                 | c23    | 28.87     | 0.79      | 168.00(1.19)     | 160.42(1.20)     |               |    |    |    |    | 4  |               |    |    |     |     |    | 37 |    |    |    |
|                 | c24    | 31.81     | 0.86      | 199.93(1.19)     | 192.51(1.20)     |               |    |    |    |    |    |               |    |    |     |     |    |    | 12 |    |    |
|                 | c25    | 35.04     | 0.93      | 238.29(1.19)     | 231.01(1.20)     |               |    |    |    |    |    |               |    | 17 |     |     |    |    |    |    |    |
|                 | c26    | 38.59     | 1.00      | 284.36(1.19)     | 277.21(1.20)     |               |    |    |    |    |    |               |    |    | 9   |     |    |    |    |    |    |
| 斜材<br>L = 320cm | d1     | 4.86      | 0.27      | 9.34             | 2.08             | 52            | 48 | 56 | 52 | 56 | 52 | 48            | 60 | 68 | 76  | 72  | 64 | 64 | 64 |    |    |
|                 | d2     | 5.10      | 0.28      | 10.18(1.08)      | 2.50(1.20)       | 0             |    | 8  |    |    |    |               | 4  |    | 0   |     |    |    |    |    |    |
|                 | d3     | 5.37      | 0.29      | 10.96(1.08)      | 3.00(1.20)       | 4             |    |    | 4  |    |    |               | 8  |    |     | 4   |    |    |    |    |    |
|                 | d4     | 5.66      | 0.30      | 11.82(1.08)      | 3.60(1.20)       | 0             |    |    |    | 0  |    |               | 8  |    |     |     | 12 |    |    |    |    |
|                 | d5     | 5.96      | 0.30      | 12.74(1.08)      | 4.31(1.20)       | 4             |    |    |    |    | 20 |               | 16 |    |     |     |    | 28 |    |    |    |
|                 | d6     | 6.27      | 0.31      | 13.75(1.08)      | 5.18(1.20)       | 8             |    |    |    |    |    | 28            | 12 |    |     |     |    |    | 48 |    |    |
|                 | d7     | 6.61      | 0.32      | 14.84(1.08)      | 6.21(1.20)       | 0             | 28 |    |    |    |    |               | 4  | 56 |     |     |    |    |    |    |    |
|                 | d8     | 6.96      | 0.33      | 16.02(1.08)      | 7.45(1.20)       | 28            |    | 36 |    |    |    |               | 16 |    | 52  |     |    |    |    |    |    |
|                 | d9     | 7.32      | 0.33      | 17.30(1.08)      | 8.94(1.20)       | 16            |    |    | 48 |    |    |               | 16 |    |     | 60  |    |    |    |    |    |
|                 | d10    | 7.71      | 0.34      | 18.70(1.08)      | 10.73(1.20)      | 0             |    |    |    | 48 |    |               | 0  |    |     |     | 72 |    |    |    |    |
|                 | d11    | 8.18      | 0.35      | 20.46(1.09)      | 12.87(1.20)      | 0             |    |    |    |    | 48 |               | 12 |    |     |     |    | 68 |    |    |    |
|                 | d12    | 8.77      | 0.36      | 22.77(1.11)      | 15.45(1.20)      | 8             |    |    |    |    |    |               | 44 | 20 |     |     |    |    | 56 |    |    |
|                 | d13    | 9.45      | 0.38      | 25.60(1.12)      | 18.54(1.20)      | 16            | 60 |    |    |    |    |               | 12 | 60 |     |     |    |    |    |    |    |
|                 | d14    | 10.24     | 0.39      | 29.05(1.13)      | 22.25(1.20)      | 0             |    | 36 |    |    |    |               | 8  |    | 68  |     |    |    |    |    |    |
|                 | d15    | 11.15     | 0.41      | 33.25(1.14)      | 26.69(1.20)      | 8             |    |    | 40 |    |    |               | 12 |    |     | 76  |    |    |    |    |    |
|                 | d16    | 12.18     | 0.44      | 38.35(1.15)      | 32.03(1.20)      |               |    |    |    | 40 |    |               | 8  |    |     |     | 68 |    |    |    |    |
|                 | d17    | 13.35     | 0.46      | 44.53(1.16)      | 38.44(1.20)      |               |    |    |    |    | 24 |               |    |    |     |     |    | 56 |    |    |    |
|                 | d18    | 14.66     | 0.49      | 52.01(1.17)      | 46.13(1.20)      |               |    |    |    |    |    | 24            |    |    |     |     |    |    | 48 |    |    |
|                 | d19    | 16.14     | 0.52      | 61.04(1.17)      | 55.35(1.20)      |               |    | 8  |    |    |    |               |    | 32 |     |     |    |    |    |    |    |
|                 | d20    | 17.78     | 0.56      | 71.94(1.18)      | 66.42(1.20)      |               |    |    | 8  |    |    |               |    |    | 20  |     |    |    |    |    |    |
|                 | d21    | 19.61     | 0.60      | 85.06(1.18)      | 79.71(1.20)      |               |    |    |    |    |    |               |    |    |     | 4   |    |    |    |    |    |

( ) の中は直前の部材の許容軸力との比である。 f' の列は 6 章に述べる設計 RE f の改良案に用いている部材本数を示す。

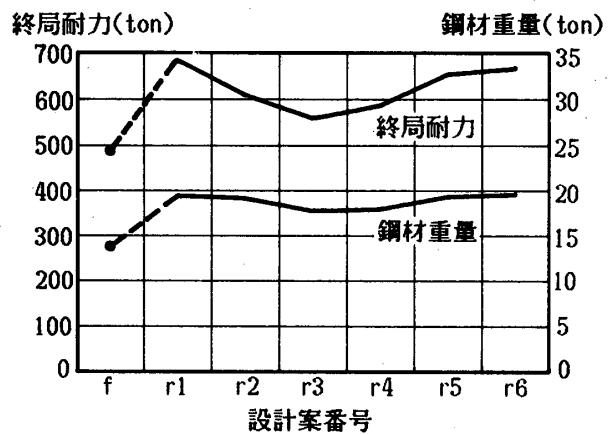
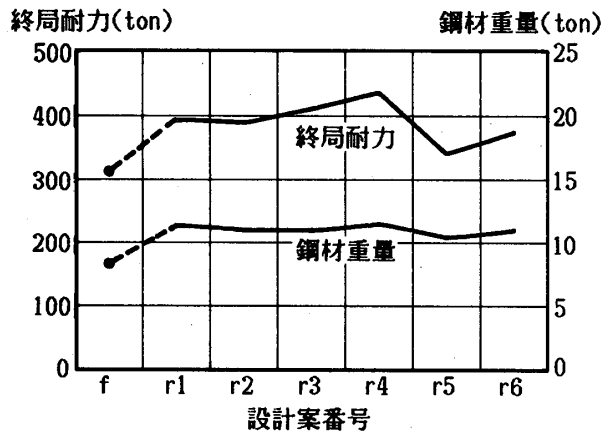


図-5 各設計案の鋼材重量および終局耐力の変化

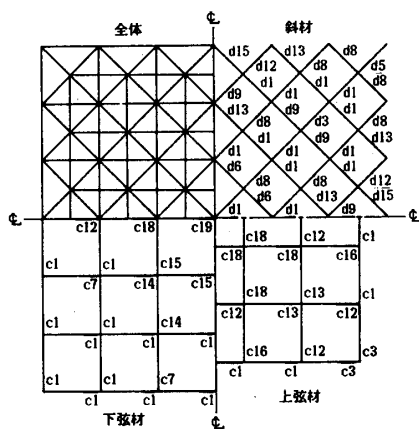


図-6 (a) トラス SQf の部材配置

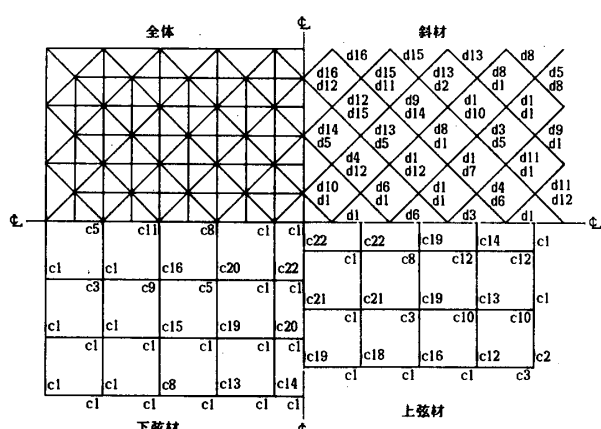


図-6 (b) トラス REf の部材配置

それぞれ図-6 (a), 図-6 (b) に示す。r1~r6 設計案の部材配置図は省略するが、先にも述べたように f 設計案より少ない種類の部材で設計したもので、部材配置は f 設計案と同じ傾向を示している。

### 3. 早期に不慮の破壊をする部材を有する構造の解析法

#### 3-1 構造のモデル化

設計、施工およびその他のミス、あるいは突如に発生する外部変動によって、立体トラスの一部が早期に不慮の破壊を起こし、その後荷重が作用した場合の性状を次に述べる方法により調べる。ある部材が不慮の破壊をするものと設定したとき、最初からその部材がないものとして、残りの構造について弾塑性解析を行い、終局耐力を求め、すべてが健全であった場合、その他の部材が不慮の破壊をした場合と比較する。

#### 3-2 弾塑性解析の方法

トラス部材が軸力を受けたときの軸力-軸変形関係は多数の実験に基づき図-7 の点線のようにモデル化できる<sup>17)</sup>。ここではトラス構造そのものの力学的挙動を分析することが目的ではなく、トラス構造を不静定構造の一つの例として、1本の部材が始めから破壊していた場合

の挙動を分析しようとしているため、および多量なケーススタディを行うため、計算時間をある程度短縮しなければならないので、座屈現象を扱う解析法ではなく、単純なトラスの弾塑性解析法を用いることとした。各部材の軸力-軸変形の関係は図-7の実線で示すように、建

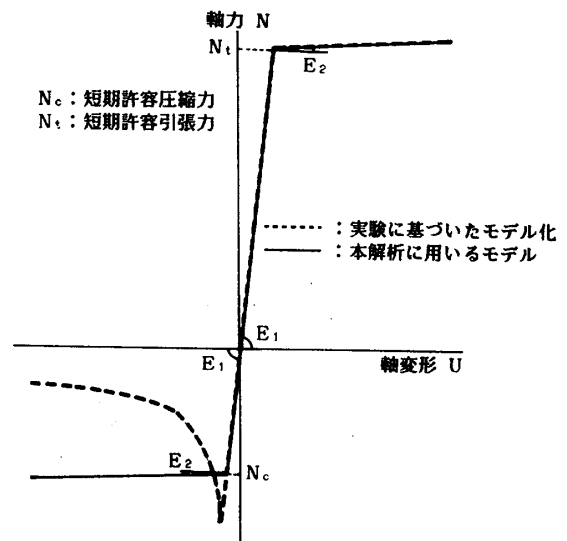


図-7 トラス部材の軸力-軸変形関係

築基準法施行令（昭和56年）に示されている圧縮材の材料強度から求められる圧縮耐力において降伏現象を起こすとしてバイリニア特性を用いる。引張力を受けた場合についても許容引張軸力で降伏するとしてバイリニア特性を用いる。立体トラスの各節点の  $x, y, z$  座標の各方向につき増分変形  $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ , 節点力  $X, Y, Z$  を考え、荷重を徐々に増加させながら（2）式を解くことによって立体トラス構造の弾塑性解析を行う。

$$f_{ex} = f_{in} + K\Delta u \dots\dots\dots (2)$$

- $f_{ex}$ : 節点に作用する全外力ベクトル
- $f_{in}$ : 部材応力につり合う節点内力ベクトル
- $K$ : 全体瞬間剛性マトリックス
- $\Delta u$ : 節点変位ベクトル

徐々に荷重を増加させる計算（step by step）法と、1 step の間で外力と内力がつり合うまで行う収束計算（iteration 計算）によって解析を進める。iteration の回数が8回になっても収束しなかった場合はその荷重増分を1/2倍にして再度荷重を増加させる。トラスの中央鉛直変位がトラスSQの場合に100cm ( $\delta_c/l_x = \delta_c/l_y = 4.17\%$ )、トラスREの場合に150cm ( $\delta_c/l_x = 4.17\%$ ,  $\delta_c/l_y = 6.25\%$ ) になったときに計算を終了し、その時点の耐力を終局耐力とする。

4. 弾塑性解析の結果

2-4 で設計したトラスSQシリーズの3種類とトラス

REシリーズの3種類について3. で述べた方法で、部材が早期に不慮の破壊したときの構造系全体の挙動について弾塑性解析を行う。本研究では1本の部材だけが不慮の破壊することを考え、部材が1本はずされた構造について弾塑性解析を行う。統計的に調べるために部材がはずされたときに残る構造の性状が異なるすべてのケースについて解析を行う。立体トラスの対称性により、トラスSQの場合では全部材数288本の内、部材1本をはずすことにより性状が変わるのが42通りあり、トラスREの場合では全部材数432の内、116通りある。立体トラスの中央鉛直変位と構造全体の耐力の関係をトラスSQシリーズ、トラスREシリーズについてそれぞれ図-8、図-9に示す。部材を1本はずすことによって生じる耐力の低下量ははずす部材によって大きく違うことが分かる。不慮の破壊をする部材の違いによって、構造全体が受ける影響が大きく違うことを表している。また、設計fは設計rより構造全体の2次勾配が小さくなっていることが観察できるが、それは使用部材の種類数が多い設計ほど、各部材の持っている余力が小さいため、降伏後構造全体の耐力が上昇しにくいからであると考えられる。

図-8, 9に示した解析結果について、各ケースの終局耐力のヒストグラムと平均値および標準偏差を図-10に示す。終局耐力は長期設計荷重で正規化し、荷重係数

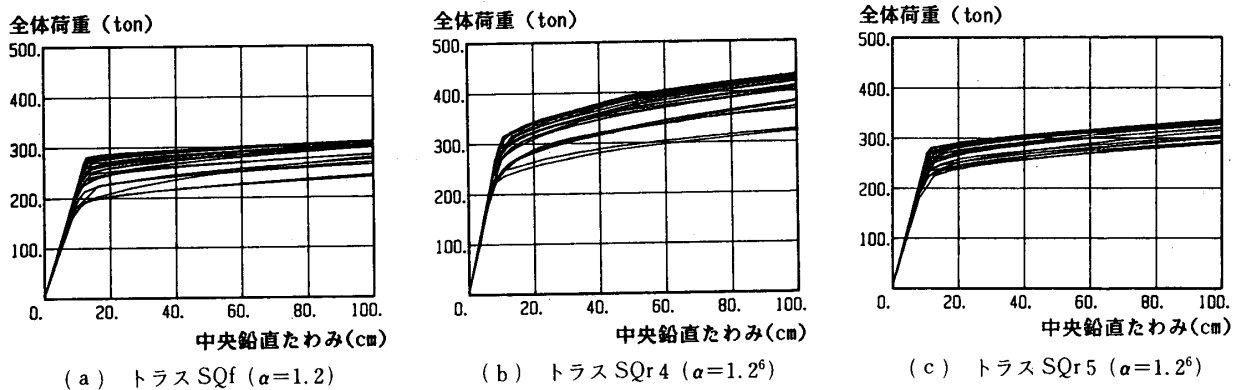


図-8 部材が1本はずされたときの荷重-中央鉛直たわみ曲線（トラスSQ）

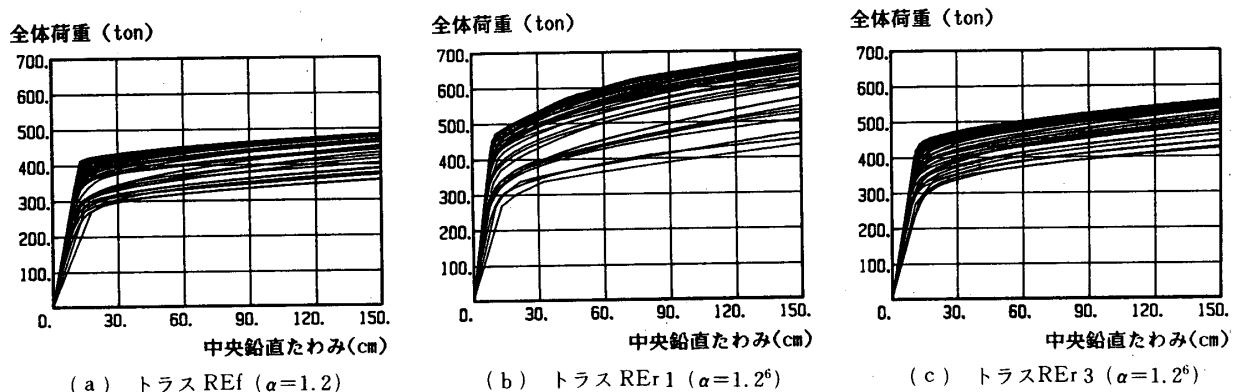
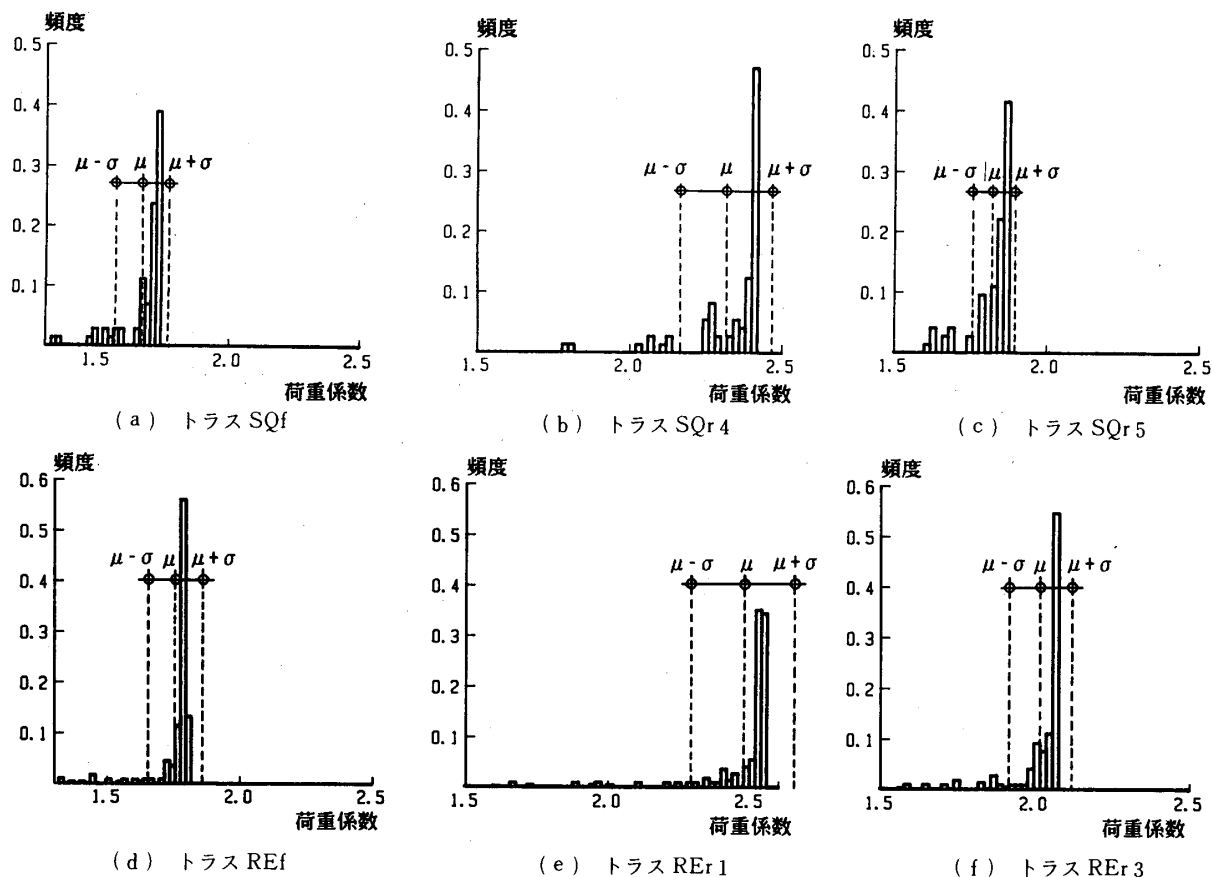


図-9 部材が1本はずされたときの荷重-中央鉛直たわみ曲線（トラスRE）



図—10 終局耐力のヒストグラム

を用いて表している。これよりトラス SQ シリーズ、トラス RE シリーズともに設計  $r$  に比べ設計  $f$  の方が大きく耐力が低下していることが分かる。また同じ設計  $r$  についてみると、トラス SQ シリーズでは、 $r5$  の方が耐力低下が大きく、トラス RE シリーズでは、 $r6$  の方が耐力低下が大きいことが示されている。同様の設計法を用いたとしても使用部材の選択方法が異なると、そのトラス構造の力学的性状が大きく変化することが分かる。

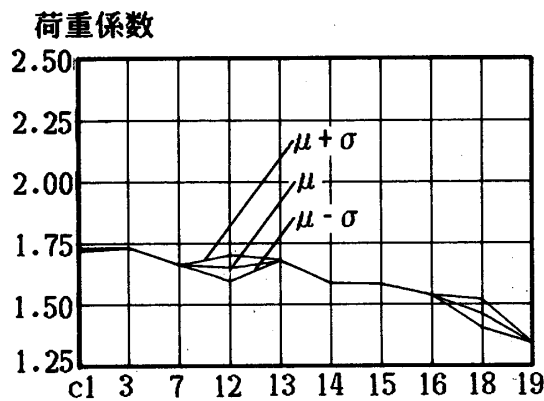
### 5. 弾塑性解析結果に対する統計的な考察

はずされる部材によって立体トラス構造の耐力の低下率が大きく変わることから、各部材に用いている使用部材の種類の違いによって耐力低下率を分類し、各種類に属する部材の破壊が構造系の耐力低下に寄与する影響を統計的に考察する。上述した設計法に従って設計を行ったため、部材に用いる使用部材の種類と、それが構造における位置の間に相関性が大きい。例えば弦材については、周辺部材には細い部材が用いられ、中央部材には太い部材が用いられている。斜材については、周辺部材には太い部材が用いられ、中央部材には細い部材が用いられている。

ここでは、はずされる部材が属する使用部材の種類によって生じる構造系全体の終局耐力の変化について考察を行う。使用部材別に終局耐力  $P_u$  の平均値  $\mu_p$  と標準

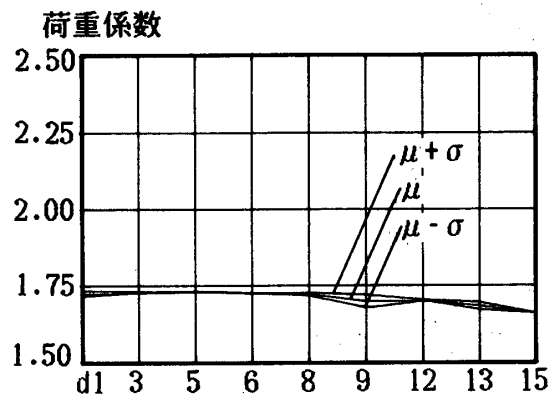
偏差  $\sigma_p$  を求め、横軸に使用部材の種類番号、縦軸に終局耐力をとってその関係をトラス SQ シリーズ、トラス RE シリーズについてそれぞれ図—11, 12 に示す。3本の折線の内中央の線が  $\mu_p$  で、両側の線がそれぞれ  $(\mu_p + \sigma_p)$  と  $(\mu_p - \sigma_p)$  である。

まずトラス SQ について考察する。弦材の場合を表す図—11.(a), (c) からは、はずされた部材の使用部材種類番号が大きくなるほど終局耐力  $P_u$  が大きく低下していく傾向が分かる。設計  $r$  の場合では部材 1 本ははずされたときに、最も耐力低下した使用部材グループでは長期荷重の 1.95 倍（すべて健全な場合 (SQr4) の終局耐力の 84%）の耐力を持っているのに対して、設計  $f$  の場合では最も耐力低下した使用部材グループでは長期荷重の 1.34 倍の耐力（すべて健全な場合 (SQf) の終局耐力の 80%）しか持っていない。c18 と c19 のグループでは耐力が短期設計荷重を下回ることになる。以上のことからはずす部材の断面形が大きくなるほど、構造全体の終局耐力の低下が著しくなり、設計における部材の安全率の幅を表す値  $\alpha$  が小さくなるほど、すなわち使用部材の種類が多くなるほど、先にも述べたように、残存部材の持つ余力が少ないため耐力の低下が大きく、危険な状態になる可能性が大きいことが分かる。斜材の場合を表す図—11 (b), (d) からは、使用部材番号が大きくなるほど耐力はやや低下していく傾向を示すが、弦



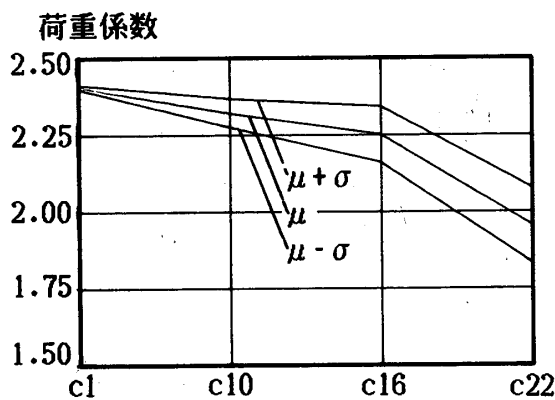
はずされた部材の種類番号

(a) トラスSQf (弦材)



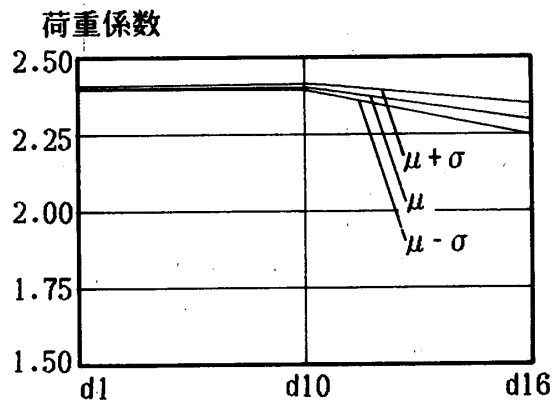
はずされた部材の種類番号

(b) トラスSQf (斜材)



はずされた部材の種類番号

(c) トラスSQr4 (弦材)



はずされた部材の種類番号

(d) トラスSQr4 (斜材)

図-11 はずされた部材の種類による終局耐力の統計値 (トラスSQ)

材の場合に比べ、はずされる部材の断面積による影響が小さいといえる。

次にトラスREシリーズについて考察する。トラスSQシリーズと同じ傾向が観測できるが、特に短辺方向の中央の弦材がはずされた場合はトラスSQよりもさらに大きく終局耐力が低下していることが分かる。設計rの場合では部材1本ははずされたときに、最も耐力低下した使用部材グループでは長期荷重の1.83倍の耐力(すべて健全な場合(REr1)の終局耐力の72%)を持っており、設計fの場合では最も耐力低下した使用部材グループでは長期荷重の1.34倍の耐力(すべて健全な場合(REf)の終局耐力の74%)しか持っていない。c20、c21とc22のグループでは耐力が短期設計荷重を下回ることになる。

### 6. 耐力低下を緩和させるための試み

長方形プランのトラスの場合で、短辺方向の部材がはずされると耐力が大きく低下する現象を取り上げ、耐力低下を緩和させる方法を考える。トラスREfを例にとって考える。設計案(図-6(b))によると、周辺部材の場合を除けば、長辺方向より、短辺方向に断面形の大きい部材が用いられており、長方形プランのスラブにおい

て短辺方向の配筋設計が重要であると同様に、力は主に短辺方向に流れ、支持点に到達していることが分かる。短辺方向の部材がはずされると、力の流れが切れ、他の部材に力が再分配されようとするが、ここで用いた設計法で設計した立体トラスは長辺方向の部材が弱く設計されているため、短辺方向の力を平行に位置する他の短辺方向部材または長辺方向部材へ伝達する役目が果たし切れない。耐力の低下を緩和させるため、長辺方向の中央弦材も短辺方向の中央弦材と同耐力レベルに設計しておくことが考えられる。ここでは長辺方向の中央部材(上弦材では中央の4行の部材、下弦材では中央の3行の部材)について、それぞれと隣接する4本の短辺方向の部材の内の最も細いものと同じ断面形の部材を用いることにした。新しい部材配置を図-13に示す。全鋼材量は現設計の14.2tonに対して変更案は16.3tonであり、15%の増加となっているが、図-5に示した設計r( $\alpha = 1.2^\circ$ )のどの設計案よりも少ない。この設計案について解析を行い、その結果を原設計の結果と比較する。図-14に弦材について、はずされた部材が属する使用部材種類による耐力の変化の平均値を示す。最も耐力低下した使用部材グループについてみると、原設計案では長



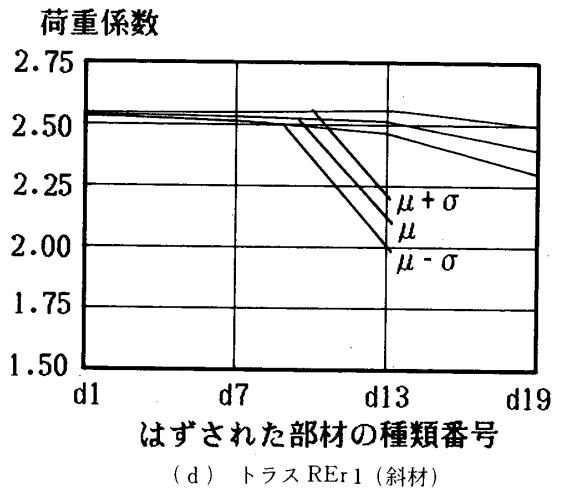
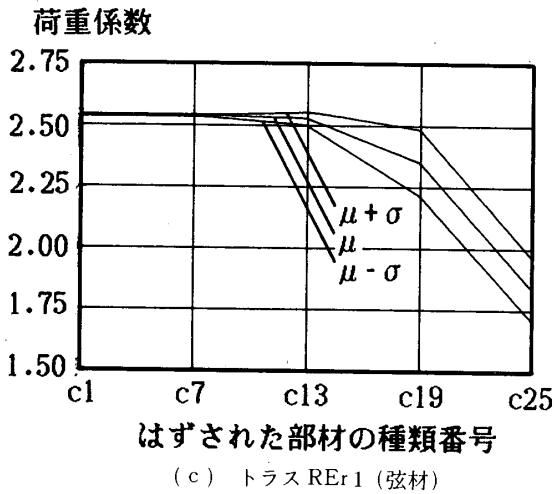
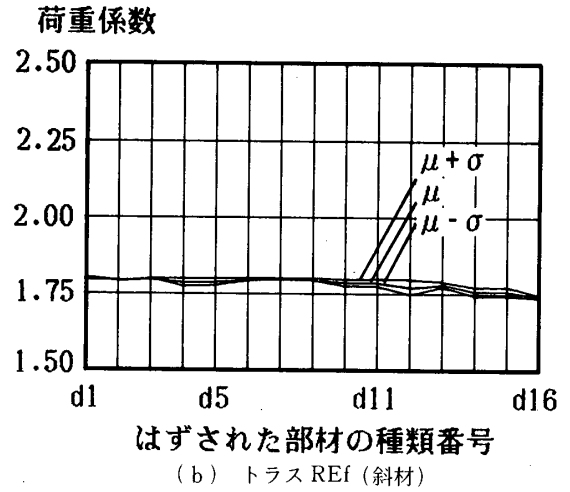
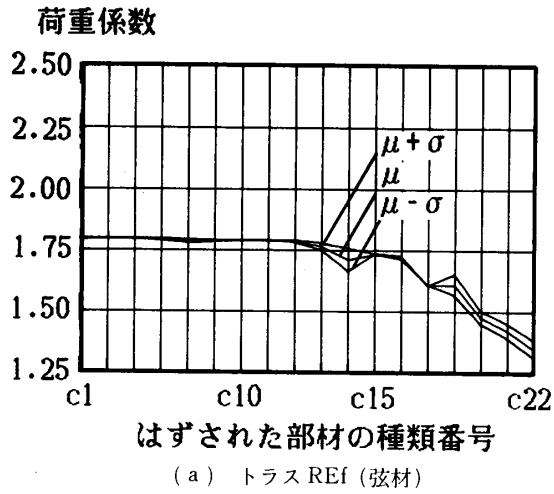


図-12 はずされた部材の種類による終局耐力の統計値 (トラス RE)

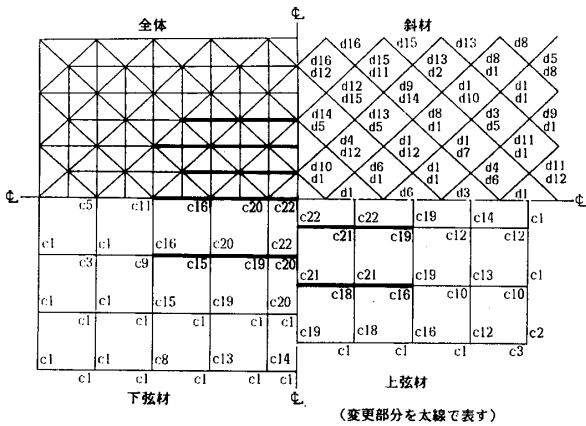


図-13 長辺方向の部材を変更したトラス REf の部材配置

期設計荷重の 1.33 倍の耐力しか持っていないのに対して、この設計案では長期設計荷重の 1.55 倍の耐力を残存させることができ、短期設計荷重を下回らないようにすることができた。したがって、不慮の部材破壊に対する構造全体の抵抗力の低下を防ぐためには、発生軸力が小さい部材についても、ある程度の耐力を持たせ、長方形プランの場合には、最適設計法によって立体トラスの 2 方向性といった利点をなくさないように長辺方向につ

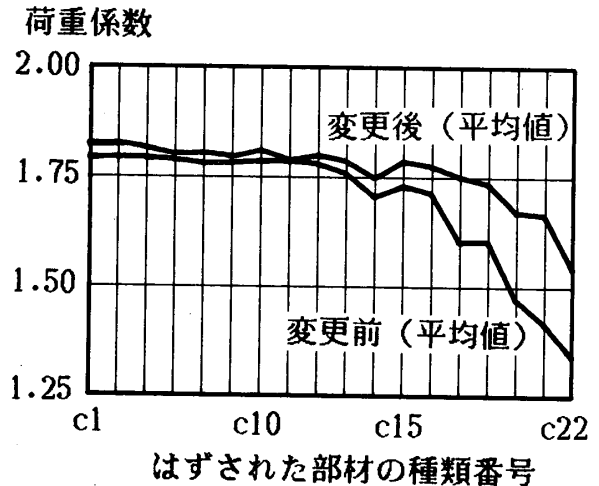


図-14 トラス REf の変更前後の終局耐力の比較

いても補強しておく方法が有効であることが確かめられた。

7. 結論

立体トラスについて自動的に部材選択、部材配置を行う設計方法を考え、それに従って、使用部材の種類数の異なる 2 種類の設計を 6×6 の正方形プランの立体トラスと 6×9 の長方形プランの立体トラスについて計 14

種類の設計を行った。各ケースについて、部材が早期に不慮の破壊をすることをシミュレートするため、部材を1本はずし、残りの構造の性状の異なるすべての場合について弾塑性解析を行い、はずされた部材の属性による構造の耐力低下の変化を考察した。結果として以下のことが分かった。

1) 設計における部材の安全率の幅の選択、すなわち設計に用いる部材の種類の数によって、部材が早期に破壊したときに構造全体の耐力低下の性状が大きく変わる。コンピュータを利用したCAD, CAM等の方法によって多品種少量生産が可能になっているが、これらを用いて設計され、徹底的に合理化された構造は、すべてが健全な場合には必要な耐力を有しているといえるが、突発的な原因による部分破壊に対しては敏感に耐力が低下することが予想される。

2) 工業製品である鋼材を構造物に用いる場合、使用しようとする部材の許容耐力が必要なものより若干不足しているために、1段階大きな断面を用いなくてはならないことがよくある。本論文で示した設計  $r$  の場合、使用できる部材の種類数は同程度でも6種類の使用部材リストができ、同じ設計荷重に対しても余裕の大きい設計と余裕の小さい設計ができることが分かった。

3) ここで扱った立体トラスの弦材については、断面積の大きい部材、つまり中央に位置する部材が破壊するほど構造全体の耐力低下が大きい。

4) ここで扱った立体トラスの場合、斜材については、はずされる部材の断面形の大きさ、構造における位置にはほぼ関係なく、構造全体の耐力低下が小さい。

5) 長方形プランの立体トラスの場合については、長辺方向の弦材に比べ、短辺方向の弦材がはずされると構造全体の耐力低下が非常に大きい。この大きな耐力低下現象は、長辺方向の部材を強くすることによって、緩和させることができる。すなわち、立体トラスが持っている利点である2方向性が最適設計によって弱められ、短辺方向に1方向トラスが平行にかけられた状態となり、静定構造的な挙動を示していたものを長辺方向の弦材を補強することによって、版としての不静定構造的な性質が復活できる。

#### 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より感謝致します。

解析に用いたプログラムの原型は元東京工業大学大学院生久保田英之氏によるものであることを記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) The Task Committee on Structural Safety of the Administrative Committee on Analysis and Design of the Structural Division: Structural Safety—A Literature Review, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 98, No. 4, pp. 845~884, April, 1972
- 2) American Institute of Steel Construction: Manual of Steel Construction—Load and Resistance Factor Design, 1986
- 3) 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
- 4) 星谷 勝, 石井 清著: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986
- 5) 鷲尾健三, 高橋慶夫, 五十嵐定義著: 建築の構造: その事故と災害, 丸善株式会社版, 1978
- 6) Bruce Ellingwood: Design and Construction Error Effects on Structural Reliability, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 2, pp. 409~422, February 1987
- 7) ENR: The McGraw-Hill Construction Weekly January 1987~December 1988
- 8) Z. S. Makowski: Space Structures of Today and Tomorrow—A Brief Review of their Present Development and a Glance into their Future Use, 3rd International Conference on Space Structures, pp. 1~8, 1984
- 9) Smith, E. A., and Epstein, H. I.: Hartford Coliseum Roof Collapse: Structural Sequence and Lessons Learned, Civil Engineering ASCE, 52(4), pp. 59~62, 1980
- 10) Erling A. Smith: Space Truss Nonlinear Analysis, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 668~705, April, 1984
- 11) W. J. Supple and I. Collins: Limit State Analysis of Double-layer Grids, Analysis, Design and Construction of Double-layer Grids, ed. Z. S. Makowski, Applied Science Publishers, London, 1981
- 12) 鈴木敏郎, 小河利行, 小崎 均: 個材の座屈, 塑性化で耐力の定まる複層立体トラス平板の大変形解析, 日本建築学会論文報告集第 359 号, pp. 26~34, 昭和 61 年 1 月
- 13) T. Suzuki, T. Ogawa and H. Ozaki: Large Deformation Analysis of Square-on-square Double-layer Grids with Member Buckling and Yielding, Proceedings of the IASS Symposium on Membrane and Space Frames, Vol. 3, pp. 81~88, 1986
- 14) 和田 章, 久保田英之: 実規模鋼構造骨組の 3 次元非線形解析へのスーパーコンピュータの応用, 日本建築学会論文報告集第 394 号, pp. 94~104, 昭和 63 年 12 月
- 15) Erling Murtha-Smith: Alternate Path Analysis of Space Truss for Progressive Collapse, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 9, pp. 1978~1999, September, 1988
- 16) 和田 章, 久保田英之, 王竹: 初期不整をもつ立体トラスの挙動に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp. 1301~1302, 昭和 62 年 10 月
- 17) 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

## SYNOPSIS

UDC : 624.074

A STUDY ON STRENGTH DETERIORATION OF DOUBLE-LAYER GRIDS  
DUE TO UNEXPECTED MEMBER FAILURE

by Dr. **AKIRA WADA**, Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, and **ZHU WANG**, Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, Members of A. I. J.

A majority of structural failures are due to errors in planning, design, construction and utilization, rather than stochastic variability in material strengths and structural loads. Concerning to this fact, a study focusing on unexpected member failure occurring in relatively early stage of loading is carried out here to investigate statistically strength deterioration of structure due to this kind of member failure.

Two types of double-layer grids— $6 \times 6$  square plan truss (truss SQ) and  $6 \times 9$  rectangle plan truss (truss RE)—are designed using a method described in Chap. 2. Two kind of safety margin value— $\alpha = 1.2^{\circ}$  (design  $f$ ) and  $\alpha = 1.2$  (design  $r$ )—are considered. Elasto-plastic analysis assuming bi-linear member force-deformation relation is performed to each intact truss and all the structures with one member removed. Statistical consideration on the rates of strength deterioration due to various member removals is performed. It can be concluded as follows :

- 1) The strength deterioration rate due to member removal varies largely depending on the member safety margin of design.
- 2) With the same member safety margin, the strength deterioration rate due to member removal may vary largely depending on the method of choosing members for use.
- 3) For the trusses discussed here, removals of chord with large section, thus located in the center part of the truss induces large strength deterioration.
- 4) For the trusses discussed here, the removals of web member has small influence to the strength deterioration.
- 5) For truss RE designed here, the strength deterioration caused by the removals of short-side chord is much larger than that caused by the removals of long-side chord. This can be improved by reinforcing the long-side chords.