

Shifted Integration法に基づく線形有限要素による空間骨組構造の最終耐力解析

Ultimate Strength Analysis of Space Frames by Using Linear Finite Elements Based on the Shifted Integration Technique

都井 裕*・原田 宏一**・弓削 康平*

Yutaka TOI, Kouichi HARADA and Kouhei YUGE

1 序

空間骨組構造の有限要素解析において、せん断変形を考慮する場合は線形チモシェンコはり要素、無視する場合はBernoulli-Eulerの仮定に基づく3次はり要素が頻りに用いられるが、これらの最も単純かつ基本的な有限要素の数値的性質も十分に解明されていたとはいえない。

有限要素の剛性マトリックスは通常、数値積分により評価され、線形チモシェンコはり要素では1点積分、3次はり要素では2点積分公式が使われる。これらの数値積分点の位置と物理的な応力評価点の位置、あるいは弾塑性崩壊解析における塑性ヒンジ発生点の位置との間の関係は、計算の実際において重要な問題である。

著者の一人は、応力評価点あるいは塑性ヒンジ発生点の位置が明確な物理モデルである剛体・ばねモデル¹⁾とこれらの有限要素モデルにおけるひずみエネルギー近似式の等価条件を考察することにより、有限要素における数値積分点位置と物理的な応力評価点位置の関係を初めて見いだした²⁾。

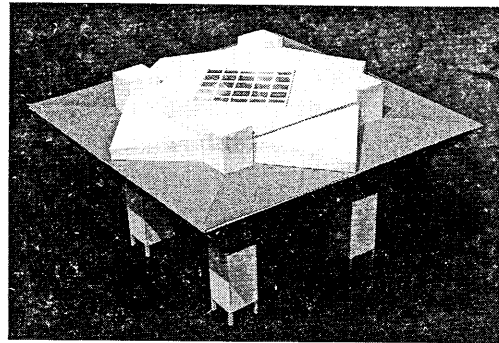
この関係を用いると、有限要素における応力評価点を精密にホットスポットに合わせたり、塑性ヒンジを厳密に部材結合部あるいは集中荷重点に発生させることが可能となり、骨組構造・非弾性解析の合理化、効率化につながる。Shifted Integration法³⁾と命名したこの方法は、通常、デフォルト値として仮定されている数値積分点座標を入力データとするだけでよいので、既存のプログラムに簡単にインプリメントできる特長がある。

著者らは、Shifted Integration法を用いた線形チモシェンコはり要素により、Updated Lagrangian Jaumann stress rate formulationに基づく、空間骨組構造のクラッシュ解析プログラムを開発し、同時に実施した多数の実験例により、数値計算結果を検証した³⁾。

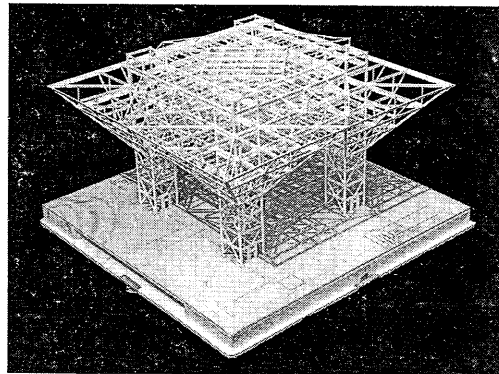
このプログラムは、クラッシュ解析を念頭に開発され

*東京大学生産技術研究所 第2部

**㈱クボタ 技術開発研究所



(a) 意匠モデル



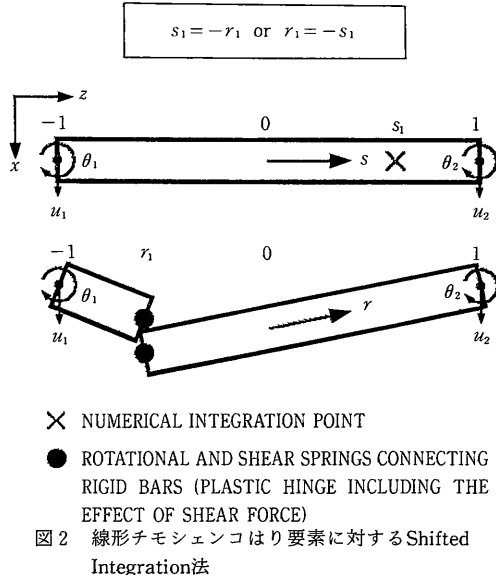
(b) 構造モデル

図1 建設計画中の建築構造物

たが、Shifted Integration法および断面力表示のひずみ硬化型構成式の採用により、最終耐力解析に対しても効率的な解析コードとなっている。図1は、現在、建設計画途上にある某建築構造物の意匠モデルおよび構造モデル写真（鉄骨造ブレース付きラーメン構造）であり、上記のクラッシュ解析コードを最終耐力解析用に若干改変したプログラムにより耐震解析が行われた。本報告では、その概要を紹介したい。

2 解 析 手 法

解析アルゴリズムの要点を以下に記す。すなわち、
 ①Reduced Integration法 (この場合は1点積分) に基づく線形チモシェンコはり要素を一般的な3次元有限変形問題に拡張して用いた。すなわち、各部材の曲げ変形、軸変形、ねじり変形 (サンブナンねじりのみ) が考慮されている。せん断変形が無視できる場合、この要素はかならずしも効率的とはいえないが、せん断変形を考慮した要素としては、Shifted Integration法が使える唯一の有限要素である。
 ②Shifted Integration法を用いた。すなわち、数値積分点位置をあらかじめ移動しておくことにより、塑性ヒンジ発生点位置をコントロールした。両者の関係は図2に示すとおりであり、数値積分点と塑性ヒンジ発生点は要素中央点に関し対称な位置にある。塑性ヒンジ発生点は、予測困難な場合もあるが、本解析では、すべての部材結合点が正確に塑性ヒンジ発生点となり得るように、数値積分点位置をあらかじめ移動した。
 ③増分理論として断面力表示のTotal Lagrangian formulationを用いた。すなわち、各部材の有限変形および座屈が考慮されている。
 ④構成式は、一般化応力 (断面力) と一般化ひずみ (曲率など) の関係式として与え、ひずみ硬化を考慮した。断面力表示の構成式において厳密にひずみ硬化を考慮するのは不可能であるが、本解析では、空間骨組の崩壊挙動において通常支配的な曲げ挙動に対する近似度が高くなるように、一般化応力・一般化ひずみ関係におけるひずみ硬化率を仮定した。



3 耐 震 解 析 結 果

3.1 解 析 モ デ ル

解析対象である建築構造物は、地下1階、地上8階の建造物である。その形状の概略は以下のとおりである。すなわち、エレベータ・シャフト (9m×9m) の4隅に柱を建て組柱とし、これを45mスパンで4本設けて、28.8m上方 (6階より上) に位置する、組柱から斜め45°方向に跳ね出した逆4角錐の建造物を支えている。平面形は8階床部分で最大であり、90m×90mの正方形となっている。

構造形式は2階の柱より上部が鉄骨造ブレース付きラーメン構造、2階の床梁より下部が鉄骨鉄筋コンクリート造のラーメン構造および耐震壁付きラーメン構造である。柱断面鉄骨は遠心力 casting 鋼管 (800φ) および溶接箱型鋼管であり、最大板厚は70mmである。大梁断面鉄骨は溶接組立H型鋼であり、梁せいは2200~700mm、最大板厚は38mmである。また、ブレース材は溶接箱型鋼管 (500~400角) であり、最大板厚は25mmである。鋼材材質は、SCW490-CFおよびSM490Aである。

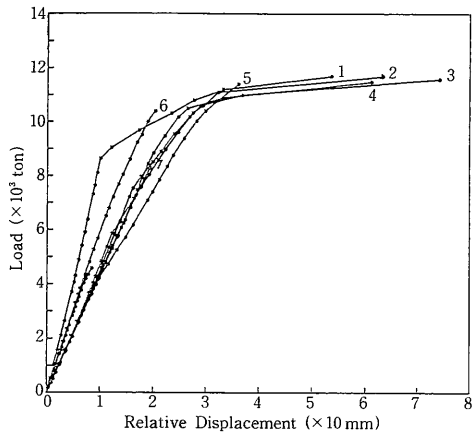
本解析では、2階の柱より上方の鉄骨造ブレース付きラーメン構造部分を解析対象としている。解析モデルは2種類であり、すべての部材を2要素に分割したモデル1と、部材の圧縮座屈の影響を把握するために柱脚部分の部材のみ3要素に分割したモデル2である。モデル1は2152要素、1764節点から成り、モデル2は3244要素、2840節点から成る。仮定した材料定数は、 $E = 21000 \text{ kg}_f / \text{mm}^2$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $\sigma_y = 33 \text{ kg}_f / \text{mm}^2$ であり、ひずみ硬化は無視した。

境界条件として、構造下端の全自由度を拘束し、自重を負荷した状態を初期条件として、地震力 (水平荷重) を増分的に加え、崩壊挙動を追跡した。鉛直方向の荷重分布を表1に示す。

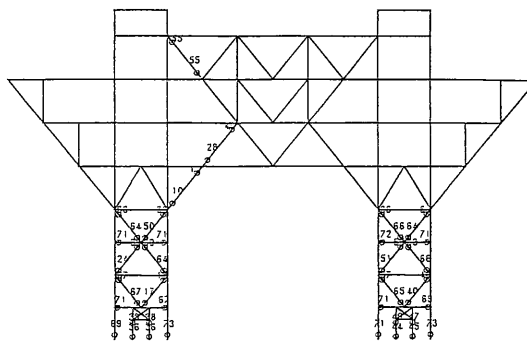
表1 設計用水平荷重分布

層	荷重 (ton)
最上層	0.0
第8層	2061.7
第7層	1668.8
第6層	983.0
第5層	411.0
第4層	54.5
第3層	39.0
第2層	37.1
第1層	40.7
総和	5295.8

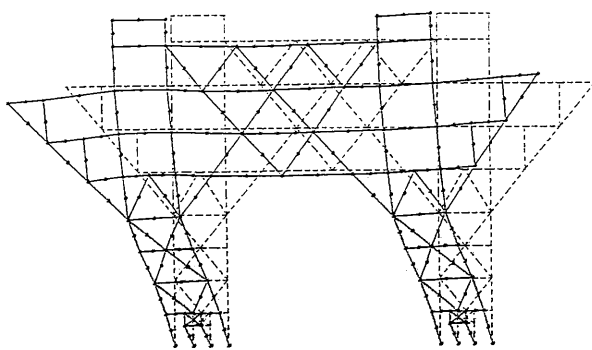
研究速報



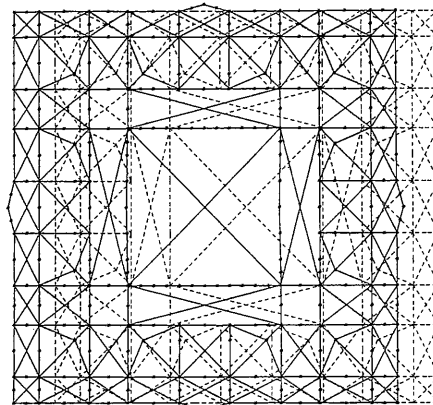
(a) 水平せん断力・層間変位関係



(b) 塑性ヒンジ発生状況 (y = -18m)



(c) 立面変形 (y = 27m)



(d) 平面変形 (z = 43.2m, 8階)

図3 モデル1の解析結果

3.2 解析結果

モデル1およびモデル2の解析結果をそれぞれ図3および図4に示す。図(a)は水平せん断力・層間変位関係である(図中の番号は層番号である)。計算結果より、建築基準法施行例に基づく1次設計用せん断力に対し、モデル1およびモデル2はそれぞれ、2.23倍および2.14倍の終局耐力を有することが判明した。この結果によれば、座屈による耐力低下率は約4%である。また、崩壊メカニズムとしては、圧縮力によるブレースの塑性崩壊あるいは座屈崩壊、およびこれに引続く柱脚の倒壊が観察された。これらに関しては、図(b)の塑性ヒンジ発生状況、あるいは図(c)および(d)の変形図を参照されたい。なお、座標系は最下面中央に原点を置き、水平方向にx、y軸、鉛直方向にz軸を設けている。また、水平荷重方向は図において左向きである。

これらの解析結果により、この構造物は負荷した水平地震力に対し、十分に大きな終局耐力を有しており、局

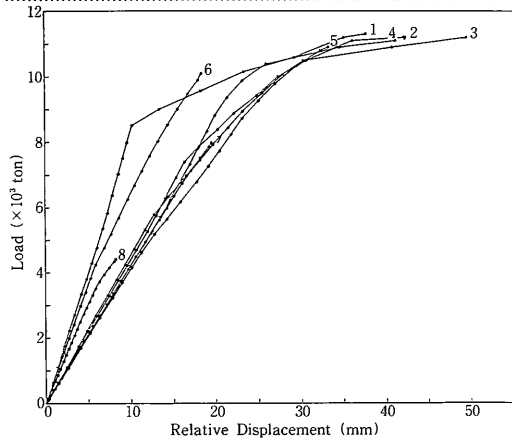
所的な崩壊もなく、ブレースの圧縮座屈が急激な変形を誘発することもない、十分に粘り強い構造体であると考えられることができる。

なお、本解析は都井研究室のSTELLAR-GS1000により実施され、モデル1およびモデル2に対する計算時間はそれぞれ、約10時間(86増分ステップ)および約20時間(134増分ステップ)を要したが、この計算時間は後述のように今後大幅に短縮化される見込みである。

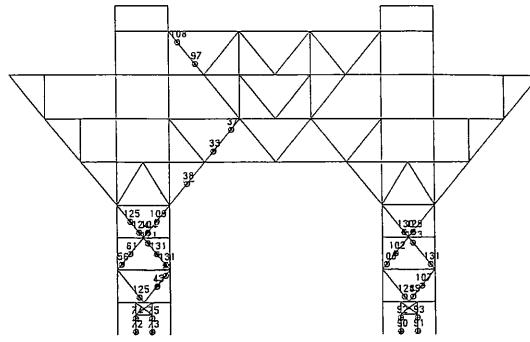
4 結 言

Shifted Integration法に基づく線形有限要素による大規模・空間骨組構造の最終耐力解析例として、現在、建設計画途上にある建築構造物の耐震解析結果の一部を紹介した。この解析の結果、Shifted Integration法は、空間骨組構造の最終耐力解析の合理化・効率化に十分に有用であることが確認された。

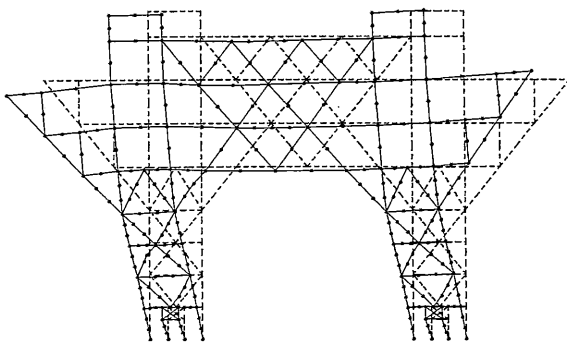
最後に、本解析手法のより一層の効率化に関し、付言



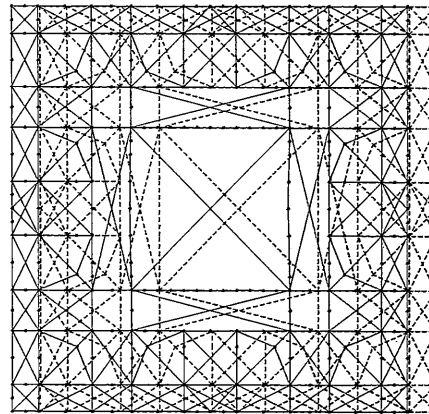
(a) 水平せん断力・層間変位関係



(b) 塑性ヒンジ発生状況 (y = -18m)



(c) 立面変形 (y = 27m)



(d) 平面変形 (z = 43.2m, 8階)

図 4 モデル 2 の解析結果

しておく。まず、2 節でも触れたように、各部材が十分に細長く、せん断変形の影響を無視できる場合には、線形チモシェンコはり要素の使用はかならずしも効率的ではない。文献2)で理論的および数値的に立証したように、Bernoulli-Eulerの仮定に基づく3次はり要素は、半分以下の要素数で、線形チモシェンコはり要素と同等精度の解を与えることがわかっている。すなわち、Shifted Integration法に基づく3次はり要素の使用により、大幅な計算時間の短縮化が期待される。さらに、部材の弾塑性性状に応じ、数値積分点位置を最適化する、すなわち、Shifted Integration法をアダプティブ化することにより、より一層の高精度化が実現する。これらに関しては、文献4)および5)を参照されたい。

謝 辞

本研究に関し、種々のご助力・ご助言をいただいた㈱織本匠構造設計研究所・山本和夫社長、楠原信一部長に

謝意を表します。

(1991年11月13日受理)

参 考 文 献

- 1) 都井：鋼構造の離散化極限解析，コンピュータによる極限解析法シリーズ3，培風館，(1990)。
- 2) Y. Toi: Shifted Integration Technique in One-Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 31, (1991), 1537~1552.
- 3) Y. Toi and H.-J. Yang: Finite Element Crush Analysis of Framed Structures, Computers and Structures, Vol. 41, (1991), 137~149.
- 4) 都井・磯部：骨組構造の塑性崩壊解析のためのShifted Integration法におけるアダプティブ手法，生産研究，第44巻，第3号，(1992)。
- 5) Y. Toi and D. Isobe: Adaptively Shifted Integration Technique for Plastic Collapse Analysis of Framed Structures, submitted to the Int. J. Numer. Methods Eng., (1991)。