

# 土木構造物における3次元解析、動的解析、非線形解析など 解析技術適用の事例とその効果

## トラス橋の座屈解析

(株)フォーラムエイト 福岡営業所 井口 真一

### 1. はじめに

前回に引続き幾何学的非線形解析による座屈現象を考える。座屈解析が設計において重視されるようになったのは、1919年に完成したカナダのケベック橋での事件まで遡る。この当時イギリスのフォース橋など大型の鋼橋完成などで容易に想像されるが、19世紀後半から延性と靱性に富んだ鋼が大量生産されるようになった。これを背景に細長い部材が設計されるようになり、ケベック橋の設計思想もその風潮に乗った。結果として架設途中で部材の座屈が発生、架設中の橋が崩壊し、75名の作業員が犠牲となる大惨事となった。この事件をきっかけに、部材の座屈による全体系の崩壊を防ぐ設計が重要との認知が世界に広まった。

本稿では、まず、シンプルな構造系を用いて解析手法を異にした際の解の厳密性について比較、次に実際の橋梁を参考にしたモデルを用いて構成部材の座屈から全体座屈にいたるメカニズムを現象として明らかにする。

実際には、対象モデルに大変位を与え、解を得ることとする。座屈前後の部材の変形状態、全体系としての変形状態を中心に紹介する。解析は、弊社3次元非線形解析ソフト「UC-win/F-RAME(3D) Ver.1.07」を用いる。なお、解析で考慮する非線形性は、幾何学的非線形のみとする。

### 2. シンプルビームの解析

幾何学的非線形の取り扱いが異なる、単純な解の比較を行う。ここではJIS型鋼(500-250、ウェブ厚9mm、フランジ厚12mm)を用いる。

図-1のように構造系を設定し、X軸に梁部材軸方向を一致させる。梁中央部の上フランジ中央部分において、漸増荷重を鉛直方向に、攪乱力となる荷重を横方向(Z方向)に与える。この攪乱力は0.1kN、漸増荷重は1kNを単位として、最終的に130kNまで与える。

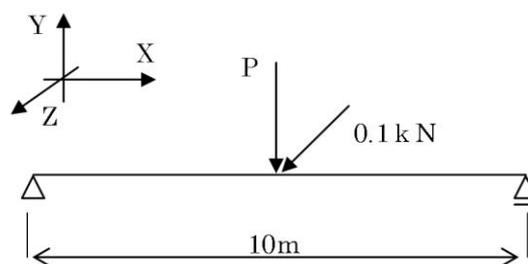


図-1 モデルと荷重载荷方法

#### 1) 線形解析の結果

線形解析の結果、理論解と同様のたわみ 30.349 (mm)と、節点回転 2.14(mrad)を得る(図-2)、初期状態を基準に計算を行うため、攪乱力による載荷位置の偏心量が、鉛直方向の変形に対して影響を及ぼさないことを意味する。

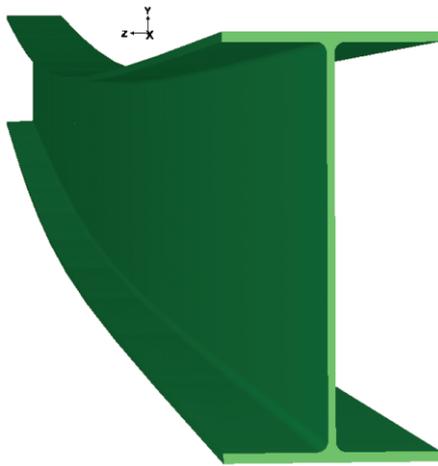


図-2 変形図(3倍拡大変形)

## 2) 幾何学的非線形解析の結果

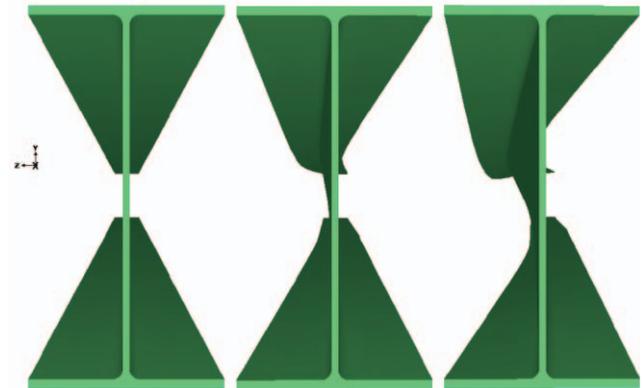
幾何学的非線形解析では、線形解析のように初期状態で構成された剛性マトリックスのみを使用するのではなく、常に接線剛性マトリックスが更新される。求解手順は、まず、外力が与えられると先行釣合状態から構成された接線剛性方程式を用いて変位が得られ、その変位に対応する部材力、釣合条件により節点力が算出される。与外力との差が収束基準に収まるまで、変位後の状態を先行状態とした接線剛性方程式を用いて収束計算がなされることによる。この収束過程を踏まえることで、節点力、部材力、部材変形、節点変位に整合性の取れた厳密な解が得られることになる。

したがって、先の線形解析で無視された横方向荷重 (= 攪乱力) による載荷位置の偏心が、接線剛性方程式に考慮され、厳密な解となり、鉛直荷重の増大に伴って載荷点が大きく面外方向へ変位する結果が得られる(図-3)。この過程を荷重-変位関係として表したのが図-4である。あわせて先の線形解の結果も併記している。線形解とは異なり、鉛直荷重



図-3 P = 75kN 時変形図(実変位)

の増大に伴ってねじれが進行し、面外方向の変位が一気に増大することが確認できる。



初期状態 → 70kN → 75kN

図-3.1 面外方向の変形過程(端部から)

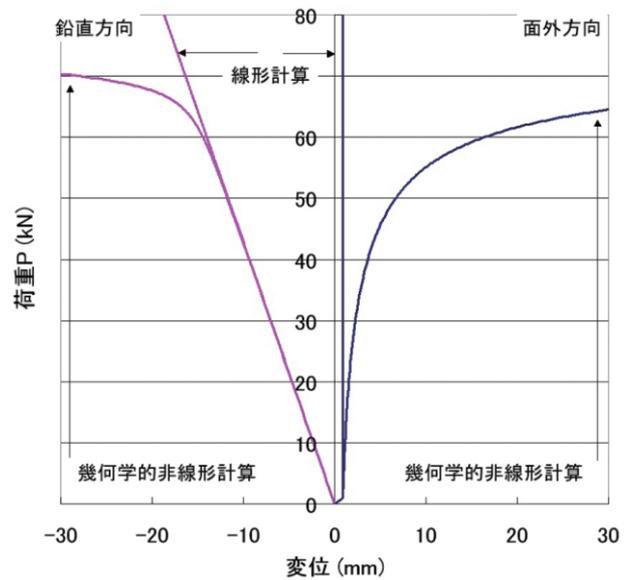


図-4 荷重-変位曲線

## 3. トラスの解析

線形解析と幾何学的非線形解析の、理論的な相違を把握したところで、複数の部材から構成される実橋モデルを用いて解析を行う。

ここでは、強制変位を与えることにより部材の座屈を発生させる。さらに、局部座屈の確認のみではなく、部材座屈により、全体としての面外方向に大きく変位する現象に着目する。

計算対象となるモデルは橋長 24m のポニートラス形式を用いる。支点条件は次のとおりとする。

ピン支承 : 支点 S1、支点 S2

(並進 3 方向 Fix、回転 3 方向 Free)

ピンローラー支承 : 支点 S3、支点 S4

(橋軸並進方向のみ Free、回転 3 方向 Free)

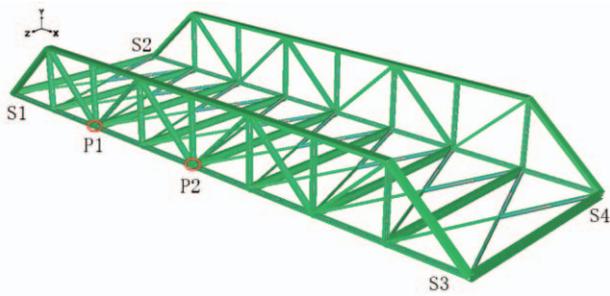
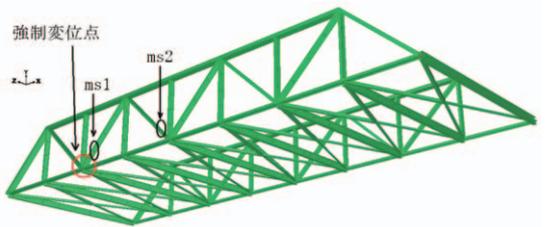


図-5 モデル鳥瞰図

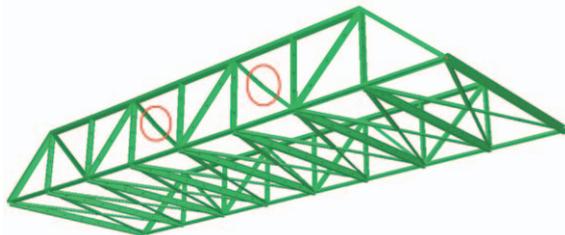
1) 節点 P1 に強制変位を与えた場合

橋長の 1/4 に位置する節点 P1 に強制変位を与える。また、変位過程における部材力に着目するため、図-6 (初期状態) に示すように、着目部材 ms1、ms2 を設定する。

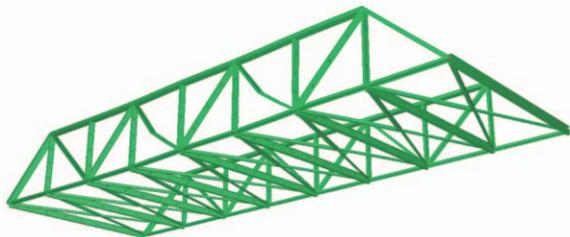
座屈の発生過程を次図に示す。なお、節点間は単純に直線表示としている。



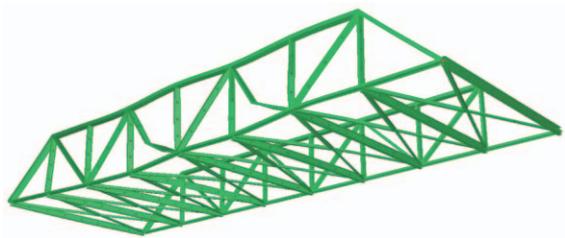
初期状態



変位量  $\delta = 90\text{mm}$  [座屈発生直後(丸印)]



変位量  $\delta = 150\text{mm}$



変位量  $\delta = 360\text{mm}$

図-6 変形過程(実変位)

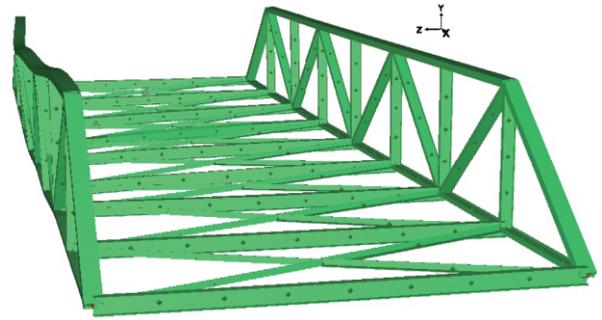


図-7  $\delta = 360\text{mm}$  支点 S3 方向から

図-6 に示すように、変形図からは、変位量  $\delta = 90\text{mm}$  で斜材の座屈現象が確認される。また、引続き強制変位によって、トラス上弦材が面外方向へ大きく変位しているのが確認できる(図-7)。

正確に座屈点を得るために、P1 に関する荷重-変位関係、ms1、ms2 に関する軸力-変位関係を図-8 に示した。この図から、変位量  $\delta = 85\text{mm}$  近傍で線形解と乖離しており、両斜材に座屈が発生したことがわかる。また、それと同時に支点部の反力-変位関係が変化しており、一部の斜材の座屈が、トラス構造全体の耐荷力機構を低下させることが確認できる。

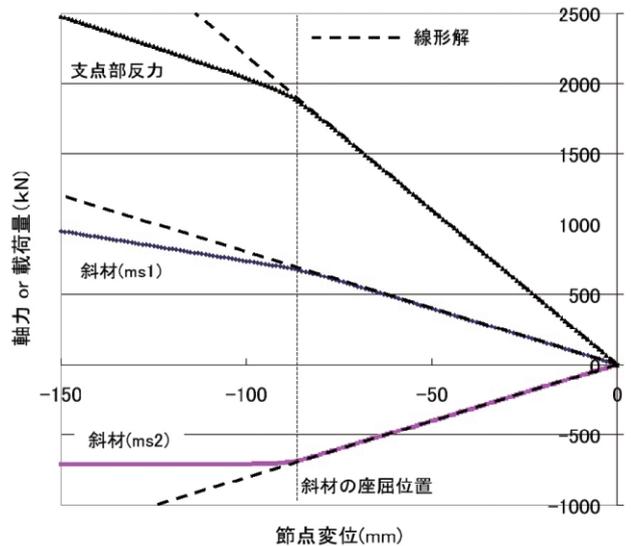


図-8 部材/支点部の荷重-変位関係

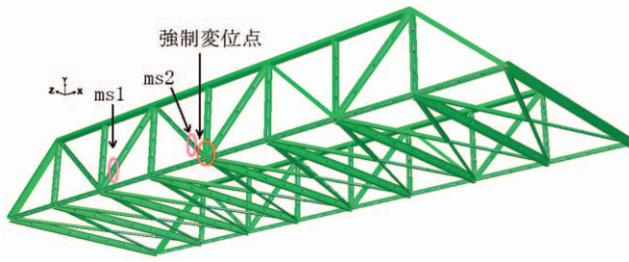
2) 節点 P2 に強制変位を与えた場合

強制変位を与える節点を P2 に変更し、先の 1) と同様の計算を行う。

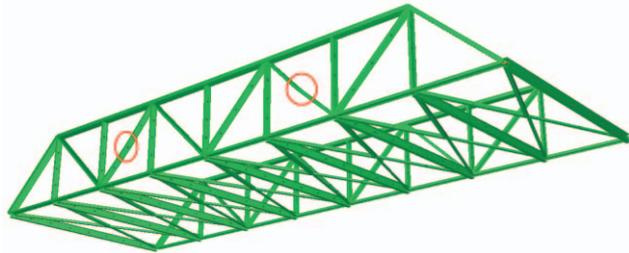
ここでも同様に、着目部材 ms1、ms2 を設定する(図-9 (初期状態))。

強制変位過程を次図に示す。

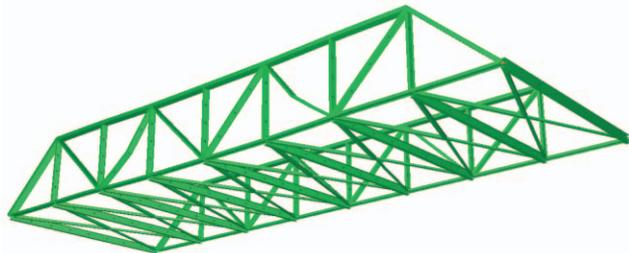
図-9 に示したように、変形図から変位量  $\delta =$



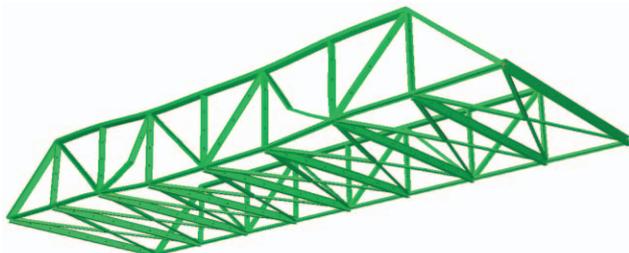
初期状態



変位量  $\delta = 90\text{mm}$  [座屈発生直後(丸印)]



変位量  $\delta = 150\text{mm}$



変位量  $\delta = 360\text{mm}$

図-9 変形過程(実変位)

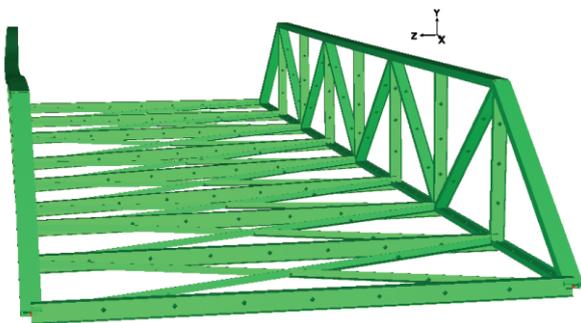


図-10  $\delta = 360\text{mm}$  支点S3方向から

90mmで斜材の座屈現象が確認される。本解析は中央部荷重であるため、対称位置の斜材が同時に座屈している。また、引続き強制変位によって、先の解析と同様に、トラス上弦材が面外方向へ変位しているのが確認できる(図-10)。

P2に関する荷重-変位関係、およびms1、ms2に関する軸力-変位関係を図-11に示した。この図から、変位量  $\delta = 76\text{mm}$  近傍で斜材に座屈が発生し、トラス構造全体の耐荷力を低下させることが確認できる。

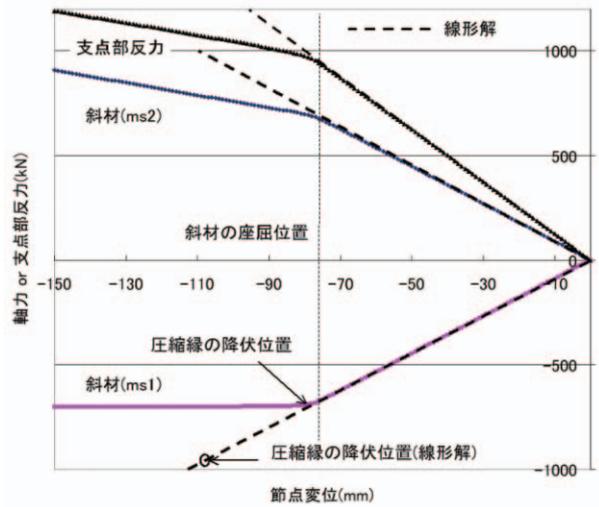


図-11 部材/支点部の荷重-変位関係

座屈した部材について、この  $\delta = 76\text{mm}$  時の応力状態を確認してみる。ここで使用している部材は、SM490 とし

許容圧縮応力度：185 (N/mm<sup>2</sup>)

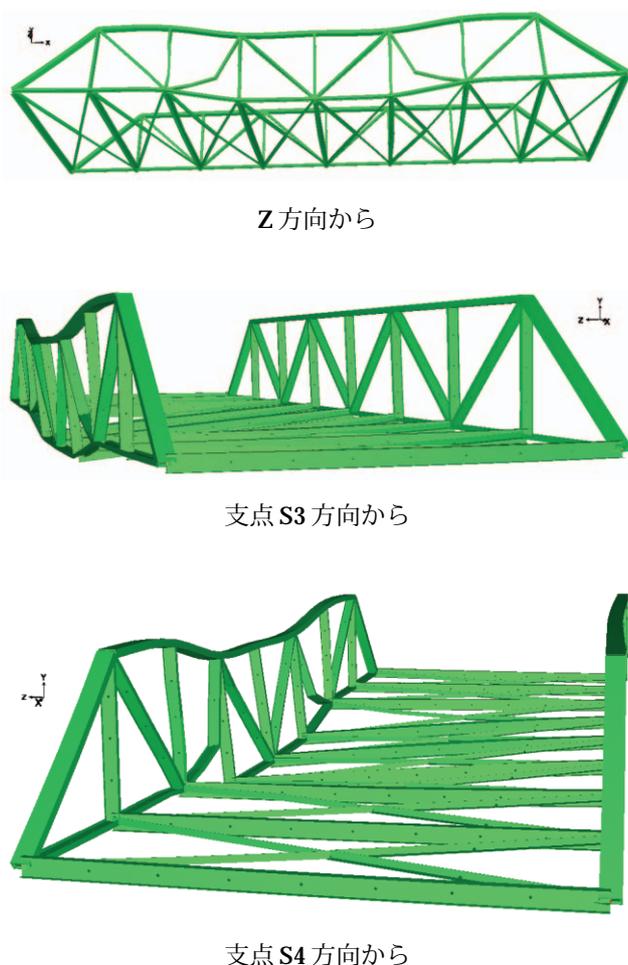
規格降伏点：315 (N/mm<sup>2</sup>)

とする。計算結果から、座屈部材となるms1の圧縮縁の応力度を求めると、

$$\sigma' = 296 \text{ (N/mm)} (< 315 \text{ (N/mm}^2\text{)})$$

となる。許容応力度は超えてはいるものの弾性範囲であり、この座屈現象が弾性座屈であることが確認できる。しかし、図-11に示すように、この斜材は座屈直後に圧縮縁応力が降伏点に達する。一方、線形解では、106mm付近までは圧縮縁応力は降伏点に達しない。部材の座屈が部材の降伏を誘発していることがわかる。

この計算では、さらに変位を与え続け750mmまで変位させた。その結果、図-12に示すように、斜材が極端に変形することで中央部3節点間が大きく沈みこむ現象が確認できる。

図-12  $\delta = 750\text{mm}$  (実変位)

## 4. まとめ

### シンプルビームの解析

3次元かつ、幾何学的非線形計算の特徴が表れた結果となった。ここでは、変位後の更新座標系により常に载荷荷重の偏心量が評価され軸周りモーメントが発生し、結果として面外方向への変形、軸周りの回転が発生するなど、実現象を再現することができた。

桁上フランジ中央部に着目した荷重-変位図からは、载荷点の偏心を考慮することで面外方向へ一気に座屈が発生することが容易に理解できた。

### トラス橋の解析

変位がすすむことで、斜材の座屈、上弦材の面内・面外変形、橋梁全体系としての耐荷力機構の変化、すなわち耐荷力低下が一連のメカニズムとして把握できた。

ここでは、座屈点を変位図からも容易に推定でき、また、荷重-変位関係を図化することで明確に座屈点を特定することができた。

さらに、応力レベルまで検証した結果、材料として線形、部材として非線形挙動を行ういわゆる弾性座屈であることを明確にし、結果として橋梁全体系としての弾性座屈を明らかにした。また、部材の座屈が、部材の降伏を誘発することも確認できた。

実際には、細長比による制限が弾性座屈を未然に防ぐポイントとなるが、今後3次元解析による高精度解析が普及するにつれて面外変形、ねじりなどの要素が複雑に関わり、今まで安全と考えられていた構造系が不安定になり得ることが十分考えられる。そのため、幾何学的非線形性評価は、今後主流となる性能設計に対して、材料の非線形性評価と同様に欠くことができない解析手法と考えられる。

### 参考文献

- 1) 倉西茂、中村俊一：橋構造、森北出版社
- 2) 後藤茂夫、羽根悟朗、田中達郎：接線剛性法による骨組構造物の大変形解析、土木学会論文報告集 No. 238、pp.31-42、1975
- 3) Iguchi, S., Goto, S., Ijima, K., Obiyo, H., : Large Deformation Analysis of Spatial Folding by the Tangent Stiffness Method, *proc. of ICCCB E VII* Volume1, pp.209-214, 1997
- 4) 門田和之、帯屋洋之、井嶋克志、井口真一、波照間弘之：接線剛性法の求解特性を用いた多分岐釣合系の追跡、KABSE 土木構造・材料論文集、第21号、2005年(掲載予定)
- 5) 株式会社フォーラムエイト：UC-win/F RAME (3D) 電子マニュアル、<ftp://ftp.forum8.co.jp/forum8lib/ucwin/frame3d/frame3d10700.exe>