

UC-win/F-RAME(3D)は、2005年にVer.1.05～Ver.1.07をリリースし、設計実務で求められる機能を中心に改良、拡張を重ねています。また、当社の「UC-win/F-RAME(3D)解析支援サービス」による設計実モデルへの適用事例も多くの実績が挙がっています。ここでは、これらの適用事例やその効果について月間誌「橋梁と都市プロジェクト」(橋梁編纂委員会刊)に連載された「～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～」を最新適用事例として紹介いたします。

### 第1回 橋梁の3次元非線形解析手法の特長と適用事例

#### 1.はじめに

性能照査型の設計体系が浸透しつつある現在、3次元非線形動的解析を活用した橋梁の設計が積極的に実施されている。しかし、それに必要な技術が十分に認知されていない。今回は橋梁の耐震設計における3次元非線形解析の現状を整理し、その利用事例を紹介する。

#### 2.3次元非線形解析の現状

##### 1)橋梁の動的照査の現状

実際、地震時には様々な方向から地震力を受けるため、直線橋であっても橋脚は様々な方向に揺れることになる。しかし、現在主流の動的照査は、橋軸方向、橋軸直角方向、それぞれ別々に地震動を入力して解析した結果に基づき照査している。直線橋、あるいは直線橋と見せる橋梁を想定した照査方法となっており、橋脚が橋軸方向および橋軸直角方向に同時に大きく揺れることは想定されていない。

さらに、立体的な曲線橋の橋脚や偏心橋脚においては、橋軸方向のみに加震しても、橋軸方向および橋軸直角方向に同時に大きな揺れが発生しうる。そのため、この場合は部材が様々な方向に揺れる事を想定しなければならない。このように、3次元的な非線形挙動が想定される場合は、本来、それを表現できる解析手法が利用されるのが望ましいが、十分に利用されていないのが現状である。

##### 2)非線形解析に用いる要素モデル

コンピュータによる数値解析を利用する際に、構造物をどのようにモデル化するかという事である。橋梁を対象とした場合、骨組みモデル(図1)による解析がよく用いられるが、この時、材料非線形を考慮した骨組み部材のモデル化は大きく2種類に分けられる(表1)。

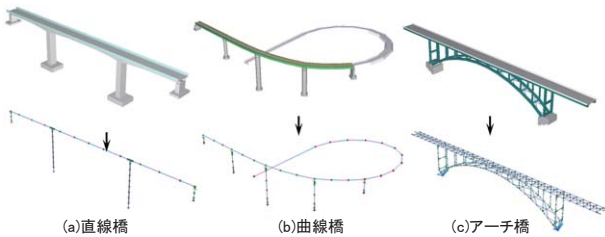


図1 骨組みモデルの例

	部材非線形モデル	材料非線形モデル
特長	材料非線形を無視した剛性マトリクスを採用。よって、2軸間の曲げ変形・軸方向変形は独立と仮定している。土木構造物では曲げ(=棒部材)の非線形性を表すことに着目される。	材料非線形を考慮した厳密な剛性マトリクスを採用。よって、2軸間の曲げ変形・軸方向変形の挙動が関連している。一般にファイバーモデル、ファイバー要素などと呼ばれる。
非線形性の考慮方法	$\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA & 0 & 0 \\ 0 & EI_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & EI_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum E_i A_i & \sum E_i A_i z & \sum E_i A_i y \\ \sum E_i A_i z & \sum E_i I_{i,yy} & \sum E_i I_{i,yz} \\ \sum E_i A_i y & \sum E_i I_{i,yz} & \sum E_i I_{i,zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix}$
適用	2次元解析	2次元および3次元解析

表1 骨組みの非線形部材に利用される要素モデル

現在主流の動的照査は、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれ別々に地震動を入力して解析した結果に基づき照査する。よって、直線橋は2次元的な挙動となるため、部材非線形モデルが十分に適用できる橋となる。しかし、曲線橋や偏心橋脚、さらには実際の地震時の挙動の多くは3次元的な挙動になるため、材料非線形モデル(=ファイバー要素)の利用が望ましい事になる。近年は、実務設計にも利用されている。

また、様々な研究機関で、実際の地震時の揺れを想定し、鉄筋コンクリート柱部材を対象にした水平2方向同時入力による静的・動的実験が実施されている。また、ファイバー要素による解析はこれらの実験をよく再現できると報告されている。今後、材料非線形モデルのより一層の活用が期待される。

#### 3.3次元非線形解析の適用事例

##### 1)水平2方向入力によるPCラーメン橋の3次元非線形動的解析

直線橋であっても、地震時には3方向から地震が作用し、橋脚などの部材は3次元的な挙動を示す。ここでは、ラーメン橋(図2)を例に、1方向入力(=現在主流の動的照査方法)による動的解析と、水平2方向入力(=実際の地震動の揺れに近い)による動的解析の結果を紹介する。

a.解析方法: 上部構造は初期剛性を有する線形部材、柱部分はファイバー要素でモデル化した。フーチング底面(直接基礎)に基礎ばねを設けている。観測波形(図3)を用いて、1方向入力と水平2方向入力による動的解析を実施する(図4)。

b.解析結果: NS成分を適用した1方向入力による解析と、橋軸方向にNS成分・橋軸直角方向にEW成分を適用した2方向同時入力による3次元解析の結果を比較する。

図5に、橋軸方向の応答変位波形を示す。1方向入力の結果と2方向同時入力の結果は、このモデルでは大きな差は生じていない。図6に、断面の各所に生じた最大ひずみの分布を示す。ここでは、最大ひずみの大きさに応じ、6段階に色分けして示している。1方向入力の結果は、かぶりコンクリートに最大圧縮応力を超えるが終局点には達しない程度のひずみが発生しており、外観上は曲げひび割れ程度の損傷と予想される。

一方、2方向同時入力の結果は、かぶりコンクリートに終局点を超えるひずみが発生しており、外観上は剥離コンクリートの剥離などが予想される。しかし、コアコンクリートは終局点に達しておらず、断面全体の剛性は大きく劣化しなかったと考えられ、応答変位にはほとんど影響を与えなかったと見られる。

2方向入力を受ける、1方向入力に比べて大きなひずみを受ける領域が広くなり、また断面内部まで損傷が進行している。すなわち、現在主流の動的照査方法では、実際よりも損傷の程度をやや過小評価する可能性がある。



図2 解析対象

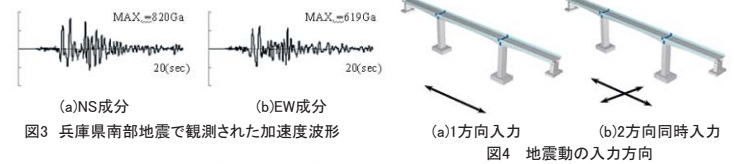


図3 兵庫県南部地震で観測された加速度波形

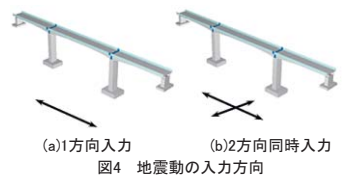


図4 地震動の入力方向

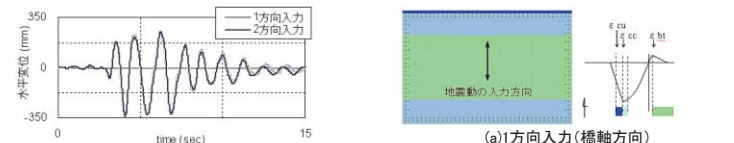


図5 P1橋脚先端の応答変位(橋軸方向)

このように、ファイバー要素を用いると、詳細な損傷状況を把握できるだけでなく、3次元解析に基づき実際の地震時挙動をより詳細に評価することもできる。

##### 2)逆L字型鉄筋コンクリート橋脚の挙動

偏心橋脚は、橋軸方向への1方向載荷を行っても、橋軸直角方向への残留変形が残る。ここでは、一定軸力下(応力レベルで1N/mm<sup>2</sup>)での偏心曲げを受けるRC柱の正負交番載荷実験である。その内、偏心直角方向に載荷を行った供試体に着目した(図7)。

偏心量eは0.5D、断面は40cm×40cmの正方形で、基部から載荷点までの高さは1.35m、せん断支間比は3.75である。

##### a.解析方法

柱基部の1要素に、長さ1.0Dのファイバー要素を設けた。なお、柱基部には、実験で観測される柱主鉄筋のフーチングからの伸び出しを考慮するため、実験から得られた降伏時の伸び出し量を参考に、線形の回転ばねを与える(図8)。載荷は、橋軸方向を変位制御により交番載荷を行う。図9に、偏心直角方向(=載荷方向)の荷重変位関係について、解析結果と実験結果の比較を示す。実験において主鉄筋の顕著な屈伏は、ドリフト量が概ね3%程度で認められている。それ以前の結果は比較的良好な結果が得られている。

また、図10に、偏心直角方向への載荷に伴って増大する偏心方向の残留変位の変化を示した。偏心曲げを受ける橋脚は、実験で確認されるように偏心直角方向の載荷に伴って、偏心方向への残留変位が増大することが大きな特徴であるが、解析結果もそれをよく評価できている。また、残留変位の大きさもよく整合している。

ファイバー要素による解析では、このような2軸曲げを受ける部材の3次元的な挙動を捉えることができるのが大きな特徴である。なお、部材非線形モデルを用いた解析では、こういった現象を再現するために2軸それぞれのM-φ特性に「相関関係」を用いて近似する手法もあるが、その材料が線形であることを仮定した剛性マトリクスを利用して、理論的に矛盾がある。

##### 4.まとめ

性能照査型設計が進み、高度解析技術を利用した設計・照査が盛んになった。その結果、従来型の設計手法の適用範囲を超えるような形式の橋の設計が可能になり、従来形式にとられない新しい形式・構造、あるいは思想を持つ橋の登場が期待される。この時、2次元解析に限定されるなど、適用範囲が限定される解析ツールでは技術者の要求に応えられないと考える。どのような構造でも手軽に適用できる3次元非線形解析ツールの開発と普及に、今後も力を注ぎたいと考えている。

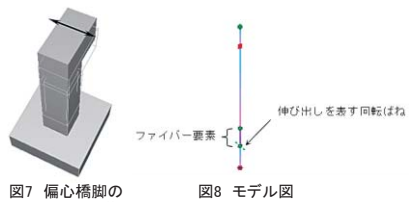


図7 偏心橋脚の外観と載荷方向

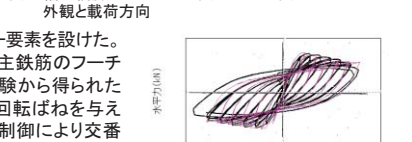


図8 モデル図

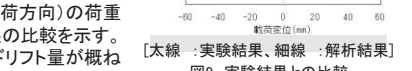


図9 実験結果との比較

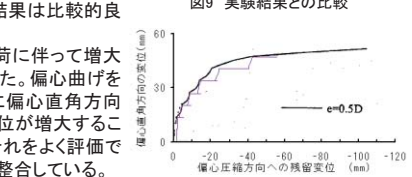


図10 偏心方向への残留変位の増大

## 第2回 幾何学的非線形解析の概論と簡単な応用としての擬似管の座屈解析 (記事概要抜粋)

### 1. 2次元部材の解析と理論解の比較

2次元部材の問題として鋼管を短く切り取った形状のリングに周囲荷重を載荷し座屈解析を試みる。

#### 1) 解析モデル

解析モデルは、図1にある直径5m、部材断面314mm×25mmの鋼材を用い、部材弱軸が円中心方向に直角となるよう配置する。また、支点条件は、主座屈モードとなる変形のみを考慮した条件としている。

2次元リングモデルも同様に計算によって、主座屈モードを発生させ、そのときの荷重-変位関係から座屈点を特定し、事前に求めた理論解との比較を行う。

ただし、図1のように、単に外力を放射線状に節点荷重として与えた場合、座屈荷重まで与えても座屈は発生せず、単純に相似形のまま押しつぶされる解析しかできない。そのため、1次元モデルと同様に、撓乱力をクラウン部(丸印)に与えている。

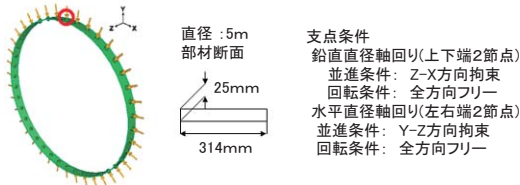


図1 2次元リングモデルと載荷状態

#### 2) 計算結果

本解析は、座屈時、座屈後の状態も安定した計算が可能であった。

図2の荷重-変位図と集中荷重へ換算した理論解の比較から、荷重-変位曲線の1次勾配領域から2次勾配へ推移し始める点と理論解が一致していることが確認できる。また、座屈後は、僅かな荷重増加で大きな変位が発生するが、図3は、実変位での変形図であり、最下端部が1230mm変位した状態を表示している。

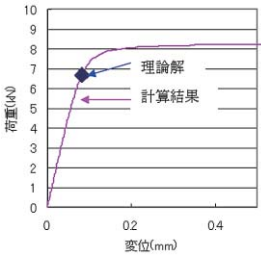


図2 荷重-変位曲線

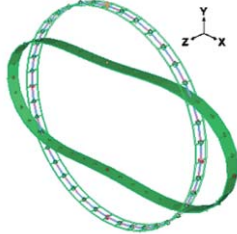


図3 変形図(実変位)

### 2. 3次元部材での座屈評価

ここでは、2次元問題で使用したリングに単純に長さを持たせた擬似管モデルの座屈解析、次に一端固定、他端自由とした境界条件下での座屈解析を行う。

#### 2) 一端完全拘束モデル

##### a. 解析モデル

解析モデルは擬似管モデルの長さ方向の格子間隔を単純に2倍した8mモデルを用いる。支点は、Z方向原点位置周囲回り全節点を全方向拘束、他端を1.1節で用いた拘束条件として設定する。荷重も同様に2次元リングモデルと同じ荷重をリング形成節点に載荷する。撓乱力は、部材両側から水压をイメージして3角分荷重を射影方向に載荷することで置き換える。

##### b. 計算結果

計算結果を以下に示す。

ここでは、図4の荷重-変位曲線から飛移りが発生していることがわかる。一端が完全固定であるため座屈荷重が大幅に上昇し一気に変形が進んだ。また、座屈直後の変形状態を図5に示している。変形自由な断面部分で、現実の構造物であれば飛移りが発生し端部要素が接触することになるが、計算上、交差した形状で収束解を得ている。

小さい変位での断面力の変化を詳細にチェックすることで座屈移行前後を推定することができる。

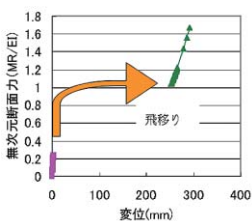


図4 断面力-変位曲線

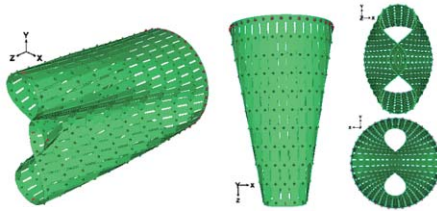


図5 変形図(実変位)

計算対象となるモデルは橋長24mのポニーラス形式を用いる。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)

#### 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。

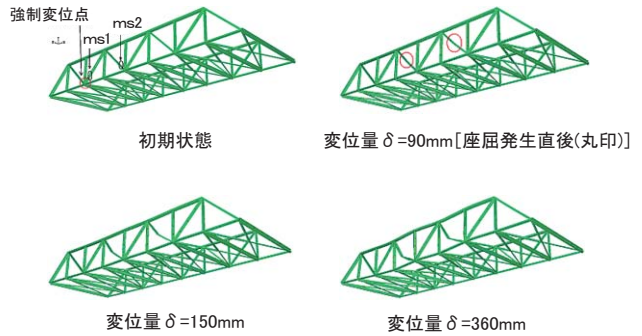


図6 変形過程(実変位)

図1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2)。

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力機構を低下させることが確認できる。

#### 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4(初期状態))。強制変位過程を次図に示す。

図4に示したように、変形図から変位量  $\delta=90\text{mm}$  で斜材の座屈現象が確認される。本解析は中央部載荷であるため、対称位置の斜材が同時に座屈している。

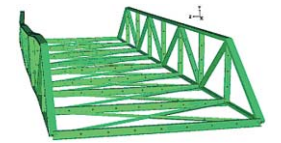


図7  $\delta=360\text{mm}$  支点S3方向から

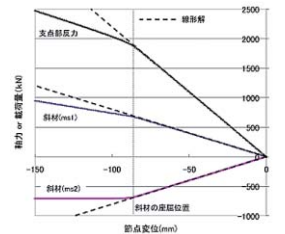


図8 部材/支点部の荷重-変位関係

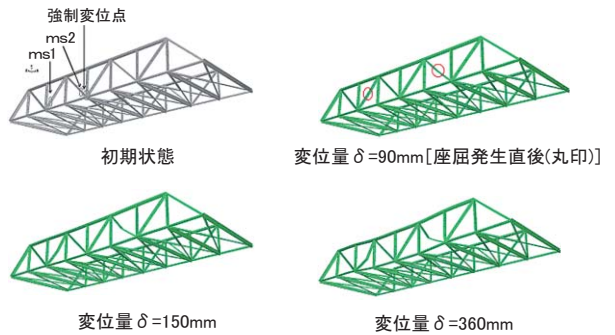


図9 変形過程(実変位)

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5)。

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力を低下させることが確認できる。

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、

$\sigma=296$  (N/mm) (< 315 (N/mm<sup>2</sup>))

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6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。

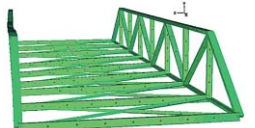


図10  $\delta=360\text{mm}$  支点S3方向から

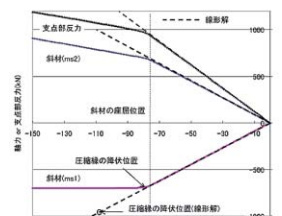


図11 部材/支点部の荷重-変位関係

## 第3回 トラス橋の座屈解析 (記事概要抜粋)

### 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に部材の座屈が発生、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。

### 2. トラスの解析

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。