

座屈後の動的挙動シミュレーションに着目した地震時座屈照査手法の検討

A study on an estimation method for buckling of structures during earthquakes with post buckling dynamic simulations

為廣 尚起*, 大塚 久哲**

Naoyuki Tamehiro* and Hisanori Otsuka**

*株式会社構造計画研究所 新領域営業部 (〒164-0011 東京都中野区本町 4-38-13)

**工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

So far we have proposed a new estimation method for buckling of structures during earthquakes. It is an analytical procedure with repeated eigen analyses in a mixed (material and geometrical) non-linear time history analysis. In the proposal, we focus on the effectiveness of buckling eigen values in the viewpoint of quantitative judgment and catching the portent of dynamic instabilities.

In this paper we focus on simulations of post buckling dynamic behaviors and buckling mode vectors instead of buckling eigen values.

Firstly, the necessity of post buckling dynamic simulations was discussed. Secondly, a new procedure for post buckling simulations with buckling mode vectors was proposed. And consequently, some additional effectiveness and reasonability of the proposed method were demonstrated through the analytical buckling investigations for a large steel arch bridge including post buckling simulations.

Key Words: dynamic buckling, post buckling behaviors, buckling mode vector, dynamic analysis.

キーワード: 動的座屈, 座屈後挙動, 座屈モードベクトル, 動的非線形解析

1. はじめに

筆者らは、構造物が地震時に座屈を起こす可能性を照査するための手法として、複合非線形（弾塑性と幾何学的非線形を同時に考慮した）動的解析中、個々の増分時間領域に対する座屈固有値解析を一定時間間隔で繰り返し、得られた座屈固有値を座屈の発生や接近の定量評価指標として用いることを提案してきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

また実験との対比や例題解析を通じて、この手法に関する次のような特徴と有効性を示してきた⁴⁾。

- 1) 提案手法は構造物の個材の座屈、部分系の座屈、全体系の座屈（後2者は図-1）を同時に検討できる。
- 2) 通常の複合非線形動的解析のみでは、動的挙動中の座屈点（振動形状の急激な変化点）を見逃す可能性があるが、提案手法はこの見逃しを低減できる。
- 3) 提案手法は座屈発生判定のみならず、座屈が発生していない状態の余裕に関する有用なデータを提供できる。

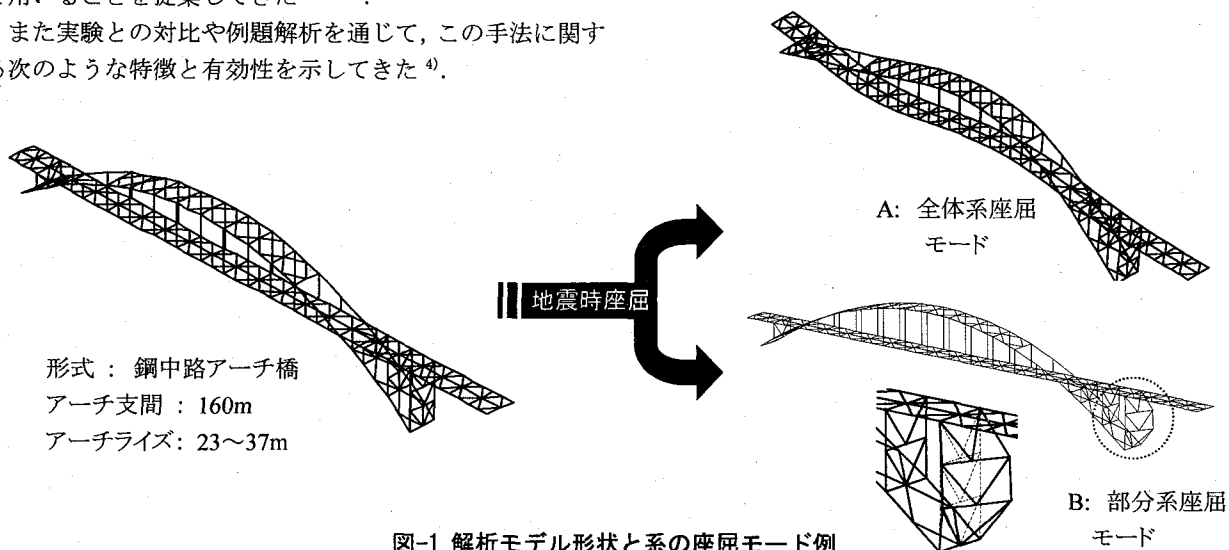


図-1 解析モデル形状と系の座屈モード例

提案手法（2章に概要を記す）は元々図-1 のような系の座屈に着目した手法である。オイラー座屈を加味した許容応力度⁵⁾から個材の軸耐力を設定した非線形動的解析手順と併用することで、1)に述べたような3種の座屈を同時に考慮することとなる。系の座屈は個材レベルで軸耐力に達する以前にも以後にも発生する可能性がある。

2)については、実験で発生した動的座屈現象を一般的な複合非線形解析で見逃し、提案手法で発生点を捉えた具体的事例を前報⁴⁾に示した（これも概要を2章に記す）。

3)に述べた座屈判定が出ない場合の有用性は提案手法の重要な特徴である。通常、複合非線形動的解析のみの照査で座屈現象が確認されない場合、（見逃しはないものと仮定しても）十分な余裕を持って座屈しなかったことを確認するためには、座屈するまで地震動を段階的に増幅させて動的解析を繰り返すという煩雑な作業が必要になる⁶⁾。提案手法は座屈判定が出ない場合でも、1回の解析で「どの程度まで危険に迫っていたか」「地震の継続時間中、最も危険な時間帯はいつだったか」「どのような形状の座屈に接近していたか」等の情報を得ることが可能である。

こうした認識と、座屈点が発覚した後の作業は座屈後挙動の追跡ではなく回避検討であろうとの想定から、前報までは座屈後の動的挙動を追跡することには拘ってこなかった。しかし提案手法の有効な運用に当たっては座屈後挙動の追跡が必要となる場面もあると認識を修正し（詳細は3章に記す）、この点に着目した取り組みも開始した。

本論文では、その成果として下記について述べる。

- ・ 座屈後動的挙動シミュレーションの必要性
- ・ 提案手法により得られる座屈モードベクトルを利用した、計算上座屈を発生させにくい場合の措置の提案
- ・ シミュレートした座屈後挙動と座屈固有値解析情報の対比による提案手法の有効性の追加検証

2. 提案手法と有効性検証の概要

前報までに筆者らが提案してきた動的座屈照査手法は、複合非線形動的解析中に一定時間間隔で式(1)による座屈固有値解析を各増分時間領域に挿入し、その瞬間の座屈発生基準を $0.0 \leq \lambda_b \leq 1.0$ とするものである。

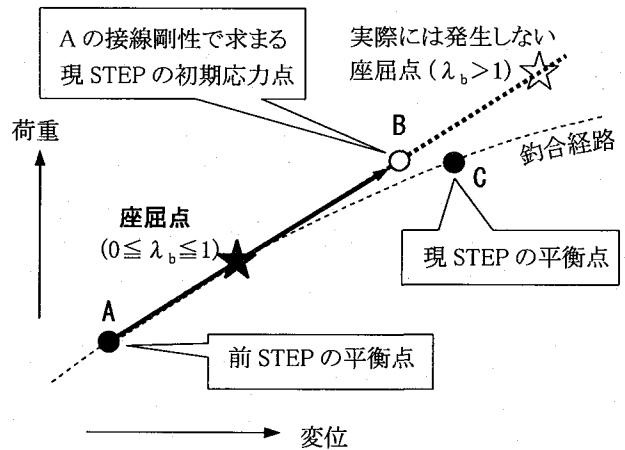
$$([{}_pK_m] + [{}_pK_g] + \lambda_b[\Delta K_g])\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

ここで、 $[{}_pK_m]$ ：前 STEP 平衡点の材料剛性マトリックス、 $[{}_pK_g]$ ：前 STEP 平衡点の幾何剛性マトリックス、 $[\Delta K_g]$ ：現 STEP の初期増分応力による幾何剛性の増分係数、 λ_b ：座屈固有値、 $\{u\}$ ：座屈モードベクトル。

式(1)は通常、静的増分解析において、2つの連続する増分ステップの中間に存在する $\det([K_m] + [K_g]) = 0$ (K_m ：材料剛性マトリックス、 K_g ：幾何剛性マトリックス)の成立点を検出し、座屈モードを得るために用いられるものである⁷⁾（図-2）。ここでは積分時間間隔（ Δt 秒間）毎の増分地震荷重を擬似的に保存力とみなして動的解析の増分ステップに適用している。

瞬間の1次（最小）座屈固有値 λ_b は、 Δt 秒間に各要素に発生した初期増分応力（不平衡力解除前）に対する最近傍の $\det([K_m] + [K_g]) = 0$ 成立点までの倍率であるから、1.0 より大きいほど成立まで遠いことになる。

$\det([K_m] + [K_g]) = 0$ 成立を座屈固有値ではなく振動固有値や標準固有値で判定し、以って動的座屈やダイバージェンスの発生としている研究は、筆者らの提案以前から行なわれていた^{8) 9) 10)}。



(B=Cとして、AB間の特異点の存在を探索する)

図-2 解析ステップの中間に存在する座屈点

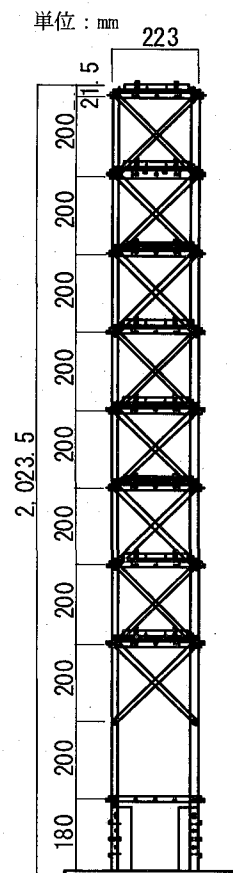


図-3 動的座屈実験供試体

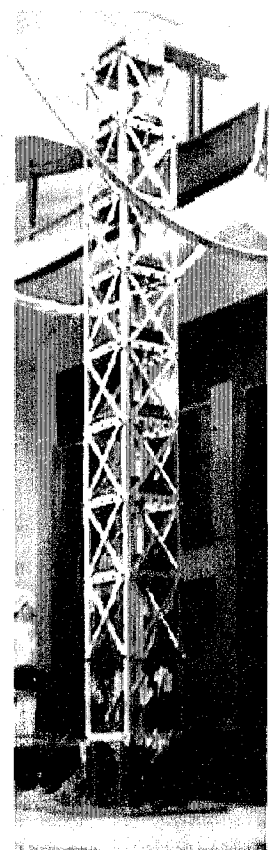


写真-1 動的座屈実験供試体

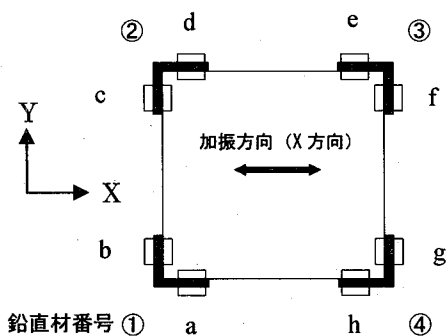


図-4 供試体平面図とひずみゲージ貼付位置

表-1 供試体の使用材料

	材料	断面形状	部材寸法 (mm)
鉛直材	アルミ	等辺山形	1×19×1967.5
水平材	アルミ	軀形	5×15×215
斜材	アルミ	軀形	2×15×297.8
水平プレート	鋼	8角形	6×120×217
錘	鋼	軀形	28×155×155
ボルト	鋼	-	M5
ボルト (治具固定用)	鋼	-	M20

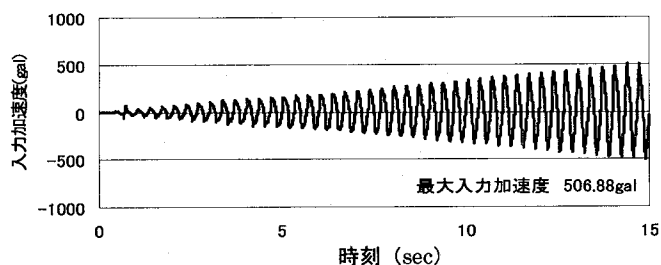
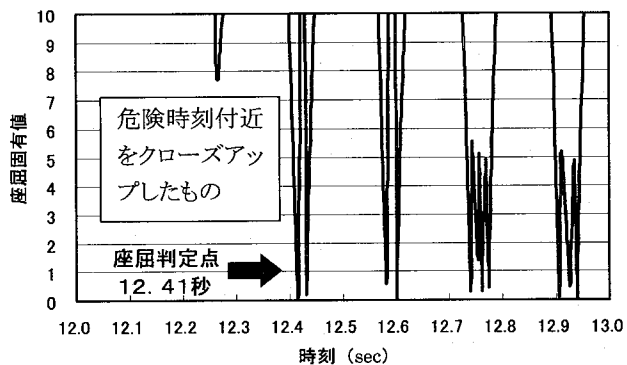
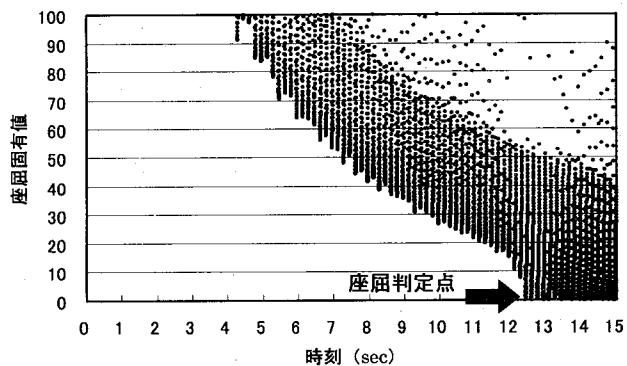


図-5 振動台への入力加速度波



実験の座屈発生時刻と解析の座屈判定時刻はほぼ一致

図-6 座屈固有値の時刻歴 (座屈実験追跡解析)

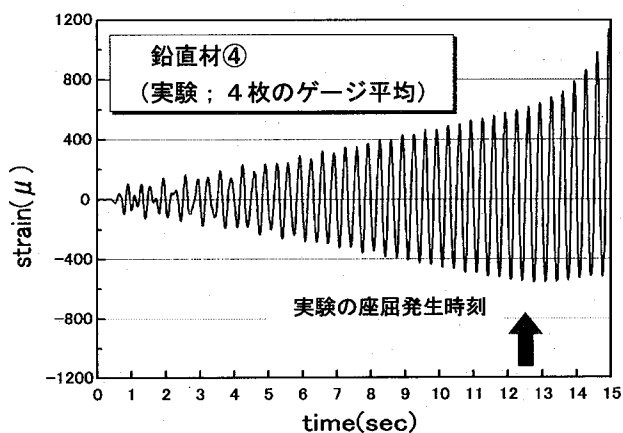
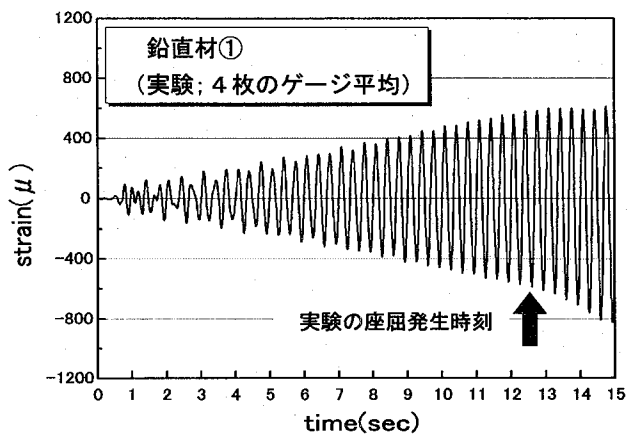


図-7 鉛直材④の軸方向ひずみ (実験)

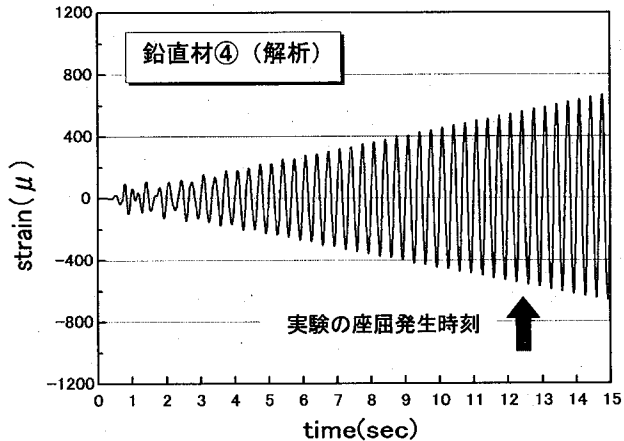


図-8 鉛直材④の軸方向ひずみ (解析)

これら既存手法に対し、提案手法が座屈判定のみならず座屈発生に至る前の危険性の定量評価の観点でもより有効であることを、前報⁴⁾で振動台実験 (図-3～図-5、写真-1、表-1) との対比により示している。この実験では、供試体最下層柱に貼付したひずみゲージ (図-4) による計測結果 (図-7) や録画映像の観察から、実験開始後 12 秒過ぎに最下層柱で座屈 (急激な振動形状の変化) が発生していることが確認されている。

提案手法を用いた 3 次元骨組みモデルによるトレース解析では、座屈固有値の時刻歴上は実験とほぼ同時刻に座屈判定が出ている (図-6) が、動的解析の応答には実験結

果のような軸方向ひずみの振動中心が座屈以後に初期値からずれるという変調が現れず、単調に応答が増大している（図-7、図-8 対比）。すなわちこの段階では、提案手法によって座屈点の存在は掴んでいるものの、具体的な座屈後の動的挙動は追跡出来ていない。前報⁴⁾ではこの点の解決には踏み込まず、次期課題として挙げるに止めた。

3. 座屈後挙動追跡の必要性

地震動継続時間中に「動的座屈の臨界点が存在するか」「臨界点が存在しない場合、臨界まで十分余裕があるのか」「どのような形状の座屈が発生または接近していたのか」等の情報を得ることが目的であれば、座屈後現象の追跡は重要ではなく、2章の提案手法によって得られる座屈固有値と座屈モードで十分評価できる。しかし座屈判定を得た場合、その現象への対策を検討する際にはさらに多くの情報が必要となる。

2章の実験トレース解析のように、座屈判定を得ていながら具体的現象が現れていない場合、座屈点以後の応答解析結果は検討材料として使用できないから、捕捉した座屈現象の影響の大きさを判断するための情報は座屈固有値解析で得られた座屈モードのみになる。とはいえ、これが全体モードや重要部位を含む部分系モードであれば、その情報のみでも甚大な影響を及ぼす現象と判断できるので、この場合は改めて座屈後挙動を詳細に追う必要性は低い。

筆者らは、座屈後の動的挙動追跡の必要性が高いのは、部分系座屈でかつ一時的に大きく変形するが発散には至らない場合等、その座屈の影響が比較的軽微な可能性がある場合と想定した。このような場合、検出した座屈に対して対策が必要か否かを座屈モードのみから判断するのは難しい。座屈点以後の動的解析結果を検討のための情報として利用できるよう、座屈現象を動的解析中に発生させることが重要となってくる。

提案手法と併せて動的座屈挙動のシミュレーション手段を整備することは提案手法の有用性の向上に繋がると考え、2章の解析の現象見逃しの過程を考察して改善策を検討し、他例題も含めて動的座屈現象を追跡した解析事例を示すこととした。

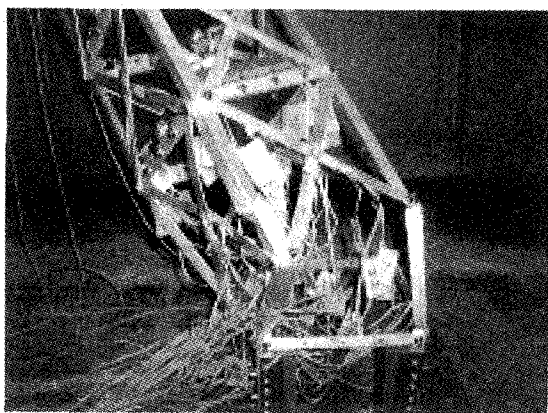


写真-2 倒壊した供試体

4. 現象看過の考察

2章の実験の座屈発生（12 秒過ぎ）以前の供試体の振動形状は、ほぼ振動台の振動方向（図-4 のX方向）主体であるのに対し、座屈発生以後はその直角方向（Y方向）への振動も大きくなっていることが録画映像から観察されている。これは実験終盤で写真-2 のように供試体の倒壊形状がXY両方向成分を含んでいる（XY平面内で捩れ変形が発生している）ことから確認できる。

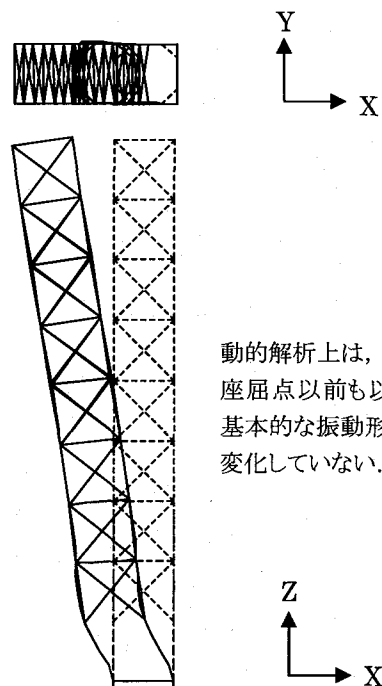


図-9 動的解析における振動形状

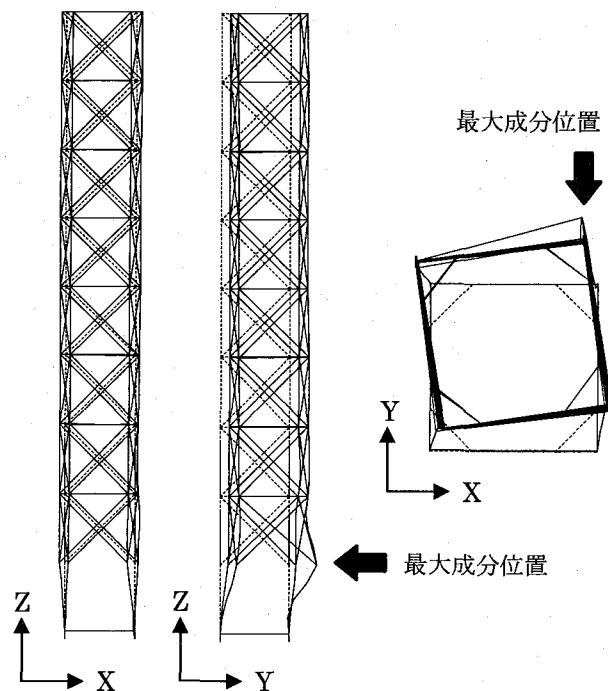


図-10 座屈固有値解析による座屈モード

これに対し動的解析の応答では、計算上の座屈点以前も以後も、図-9 のようなX方向変形が卓越した振動形状のまま変化していない。この振動形状からY方向の振動が増大し始めるという傾向変化のきっかけを、動的応答の中から得られていないことが現象看過の原因と考えられる。

しかしながらその一方で、計算上の座屈点（図-6 の12.41秒）で座屈固有値解析によって得られる座屈モード（図-10）にはY方向成分やXY平面内の振れ成分が現れており、写真-2に見られる実験の座屈性状との整合性が見られる。提案手法を含む計算プロセス全体としては、座屈点の存在のみならず座屈形状も見過ごしてはいないのだが、ここまでの解析では座屈固有値解析は動的解析の応答に一切影響を及ぼさない⁴⁾形で挿入されている。

ここで座屈点の座屈モードを必要に応じて動的解析に反映させるプロセスがあれば、振動形状が変化するきっかけを有効に与えられる可能性に思い至った。

5. 中間不整の挿入

静的座屈問題では計算上座屈が発生しにくい場合、微小な初期不整を解析モデルに付与することがある¹¹⁾など、この措置は当該荷重に対する座屈モードが予め明白で、不整量付与により座屈発生以前の挙動に過大な影響を与えないという前提が成立していれば有効に働く。

動的問題の場合、構造物がある地震動による振動中にどのような形状の座屈に至る（または接近する）のかは予め掴みにくいことが多い。例えば図-1の解析モデルからAあるいはBのような座屈モードを直感的に認識することは難しい。この点は2章の提案手法により瞬間の座屈モードを予め得ていれば解決できるが、座屈モードが判明しても、地震時は一方向に変位が増大するのではなく不規則に振動するから、初期に固定的な方向性を持った変位ベクトルを微小とはいえ強制的に与えては、座屈発生以前の挙動に不当に影響を与えてしまう可能性や、臨界の瞬間の振動形状に初期不整がそぐわない可能性等が懸念される。

以上を勘案し、2章の提案手法を用いた動的解析で具体的な現象が現れにくい場合の措置として、座屈点の直前あるいは直後に、その瞬間の座屈モードベクトルから微小な不整量（変位）ベクトルを生成し、振動形状の変化のきっかけとして付与することを考えた。動的解析の途中、座屈点前後にその場で自動生成し挿入するこの不整量を（初期に付与する初期不整に対し）以後「中間不整」と呼ぶ。

この案の有効性検討のため、表-2のプラットフォームプログラムに次のような機能を追加した。

動的応答に伴い、座屈点へ接近し離れる挙動が繰り返される。この様子は提案手法による座屈固有値の時刻歴上では図-11のようなV字形の並びとなって現れる²³⁾。1組の固有値のV字形は、ある座屈点への接近と離脱1回分の過程を示しており、V字1個が形成される時間領域内では動的応答としての変形状態は極端に変化しない。そこで中間不整挿入は個々のV字単位で考え、座屈固有値が1.0を下回る（座屈判定が出る）瞬間、あるいはその直前に、

その場で得られた座屈モードベクトルを用いた微小不整量を強制変位として挿入することとした。

中間不整ベクトルのプロポーシオンは自動決定できるが、その大きさや挿入のタイミングは、個々の問題別に試行錯誤で適切に設定せざるを得ない。プログラムはそれらの条件が柔軟に変更可能なようにしておく。

表-2 プラットホームソフトの仕様

各手法は文献11)参照

種 別	3次元汎用骨組解析ソフト	
弾 塑 性	はり部材のM- ϕ 関係により規定	
幾 何 学 的 非 線 形	修正ラグランジェ定式化	
動 的 解 析	直接積分法	ニューマーク β 法
	収 束 計 算	ニュートン・ラプソン法 残留不平衡力は次ステップへ持ち越し
固 有 値 解 析	振 動	サブスペース法
	座 屈	逆反復法

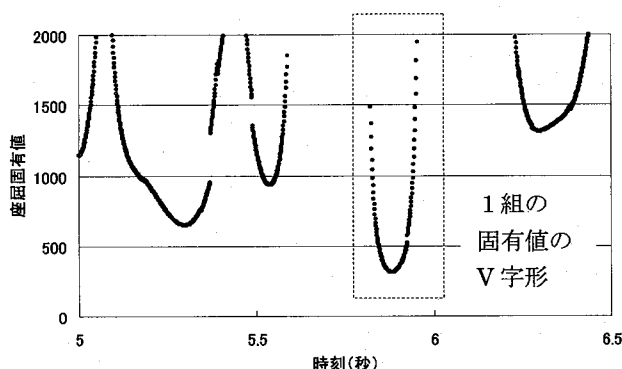


図-11 座屈固有値時刻歴上に現れるV字形状例

6. 動的座屈シミュレーション

6.1 実験例題

まず座屈判定が出ていながら具体的な現象が応答に現れていない2章に示した実験トレース解析を、中間不整の挿入によって改善することを試みた。

中間不整変位ベクトルのプロポーシオンには瞬間の座屈モードベクトルを用いる。図-10は初回座屈点の座屈モードである（瞬間の状態によってその都度座屈モードは変化する）。初回のベクトル成分最大値は柱③最下層Y方向（図-10矢印位置）に現れているが、この最大成分の大きさと方向を動的解析の Δt 秒間の同位置X方向増分変位のF倍として不整ベクトルを作成し、座屈判定直後に挿入することとした。Fはトライアンドエラーで絞り込む未知数である。初回座屈時刻（12.41秒）の同位置X方向変位は-2.877cm、X方向増分変位は -4.392×10^{-4} cmで、その時点でのY方向応答変位はX方向の1/500程度の微小なものである（図-13細点線）。

解析の軸方向ひずみ（図-8）の座屈発生点付近の性状を実験で計測された軸方向ひずみ（図-7）の同時間帯の性状

に近づけることを目安として、不整ベクトルの大きさや方向の調整を行ないながら動的解析を繰り返した。

尚、動的解析は3次元骨組モデルによる複合非線形動的解析である。ニューマークβ法 ($\beta=0.25$) による直接積分法を用い、積分時間間隔 (Δt) は0.001秒、各部材の減衰定数を2%でレーリー型減衰 ($\alpha=0.4645$, $\beta=0.00081$) を用いた。減衰の更新は行なわない。死荷重状態作成後、実験と同様の漸増加速度波(図-5)を基部に入力している。

本例題は継続時間の後半ほど応答が増大し、座屈判定が短い周期で頻繁になるが、本来そのような場合は構造物が健全な状態でないことは明らかなので座屈後性状を動的に追跡する必要性は低い。前述の通り、何回か座屈判定を経験しても構造全体として大きなダメージを受けていないことを確認する目的でのシミュレーションを想定していることから、ここでは不整挿入回数があまり多くなならない初回の12.41秒から13秒までの時間帯付近に着目した。

調整の結果 $F=1.0$ で図-12~14に示したような解析結果を得た(この条件では着目時間帯内で11回の中間不整挿入があった)。各々の不整ベクトルの併進最大成分の絶対値は0.0004cm~0.003cmの範囲で元々微小であり、かつ正負に大きな偏りなく挿入されたので、これらの強制変位分は過大に蓄積されてはいない。この上で時刻13.00秒には図-12のような動的解析上の変形状態を得た。座屈直前(12.4秒)の振動性状と比較して、新たにY方向成分(図-13)や捻れ成分が挿入した不整量以上に急激に発生している。また図-14の軸方向ひずみにも実験結果の性状(図-7)と整合する変調が現れている。

今後適用実績を積み上げて、精度向上や試行錯誤の短縮等を図っていく必要はあるが、動的解析で座屈現象が出てく場合の措置としての中間不整挿入の基本的有効性は確認できた。

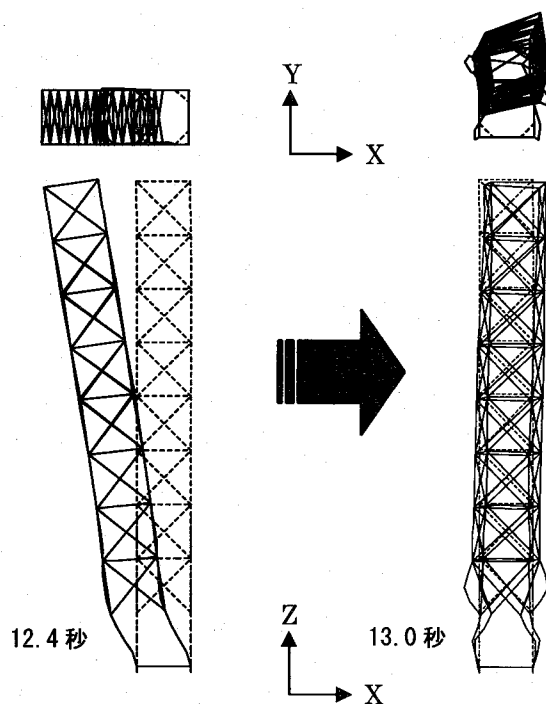


図-12 座屈前後の振動形状の変化

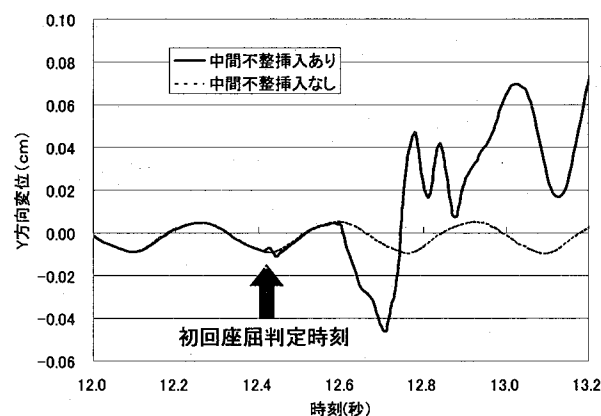


図-13 Y方向変位履歴(図-10 矢印位置)

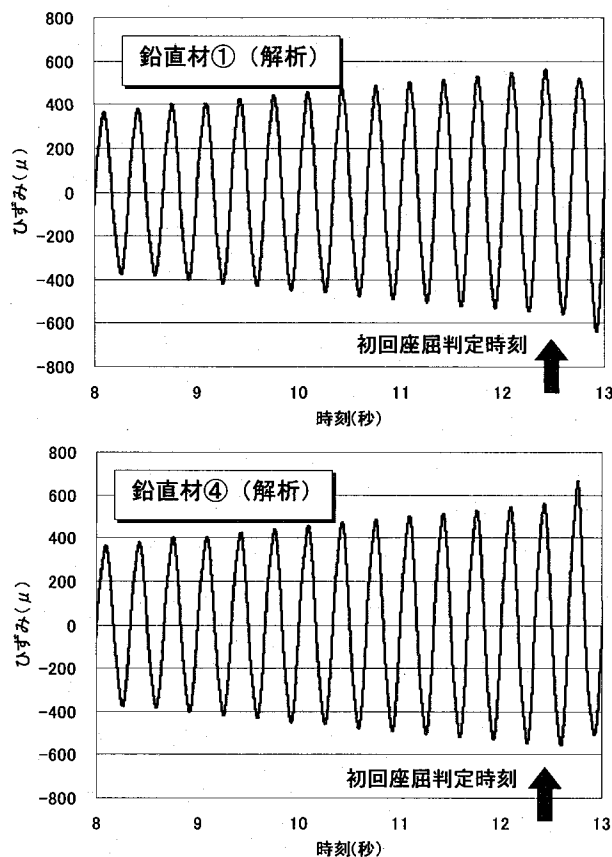


図-14 中間不整を挿入した動的解析による軸方向ひずみ

6.2 実橋規模例題

続いて前報⁴⁾で例題解析に用い、本論文1章図-1にも例示した鋼中路アーチ橋(図-15)¹²⁾モデルでも座屈後挙動シミュレーションを試行した。

この解析モデルはJMA神戸の3方向の地震動(図-16)同時入力によっても座屈判定に至らず、最小固有値発生時の座屈モードは図-1のBのような部分系モードであることが前報で確認されている。ここではこの橋梁の安全性確認ではなく、座屈判定が出た場合の座屈固有値解析情報と動的座屈挙動シミュレーションを対比して示す例題を蓄積することを目的として、この解析モデルで座屈判定が出る

よう、減衰定数 0.2%の剛性比例型という本来なら過小な減衰条件に変更し（標準的な動的解析条件で座屈判定が出る橋梁例題が手元にないための代替措置である）、動的解析を再度実施した。

解析は直接積分法（ニューマーク β 法、 $\beta=1/4$ ）による積分時間間隔 $\Delta t=0.001$ 秒の動的複合非線形解析である。解析モデル中アーチリブ部材に M- ϕ 関係規定による部材非線形性を設定し履歴則は標準型バイリニアとし、桁・鉛直部材は弾性としている。アーチリブ部材には M-N 相関曲線により軸力変動を考慮した塑性化判定を行なっている。死荷重載荷の後、図-16 の 3 方向地震動を同時に与えた。

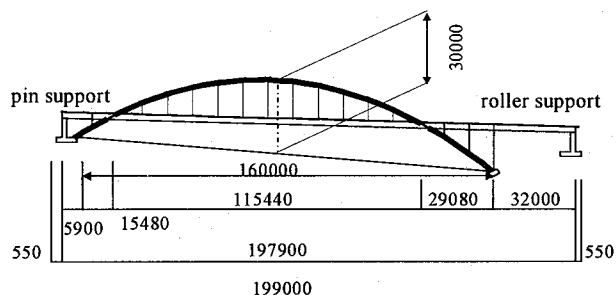
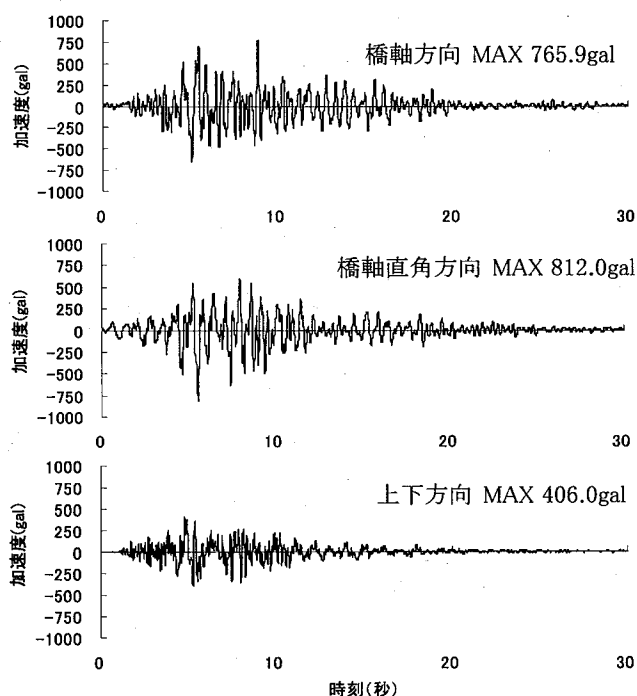


図-15 例題鋼中路アーチ橋（解析モデルは図-1）



（注）上2段はそれぞれレベル2地震動標準波形タイプⅡ-1-2とⅡ-1-1(JMA 神戸スペクトル適合波形)、下段は JMA 神戸の上下動観測波である。

図-16 入力地震動

この動的解析を実施したところ、5.68 秒、6.08 秒の 2 時刻で座屈判定（ $0.0 \leq \lambda_b \leq 1.0$ ）が得られ（図-17 の「座屈判定 1」と「座屈判定 2」）、かつそれらの直後に座屈モード（図-1 の B）と似た部分モードで、桁下の鉛直材が

それ以前と比較して大きく橋軸方向に変形していた（図-18, 19）。すなわち、この例題では中間不整を挿入するまでもなく、座屈固有値解析で座屈点を捉えた直後に、動的解析によって座屈モードに似た形状の座屈現象がシミュレートされたのである。

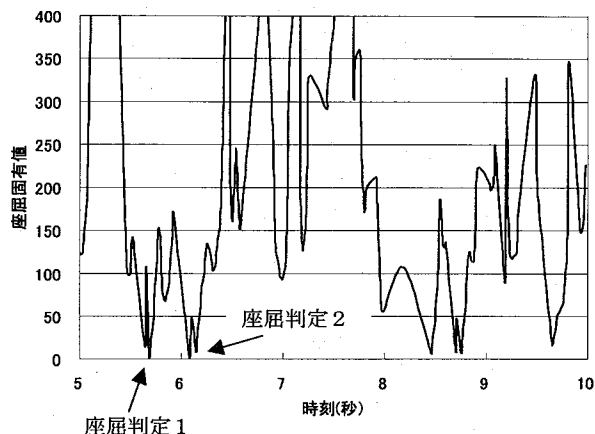


図-17 座屈固有値時刻歴

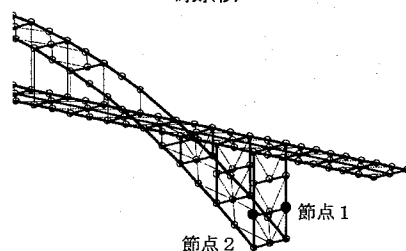
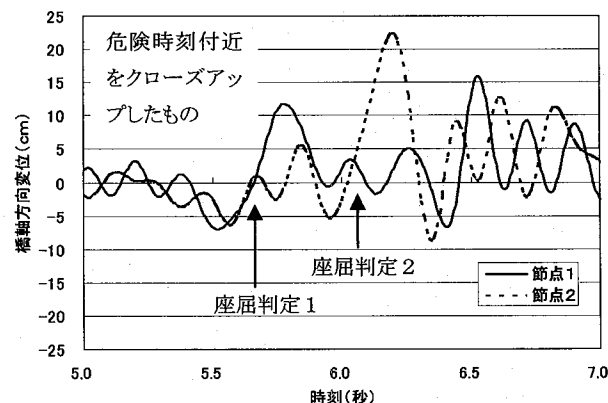
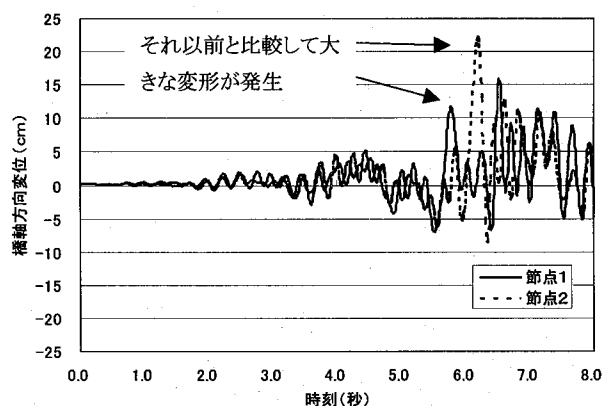


図-18 桁下鉛直部材中節点の橋軸方向変位時刻歴

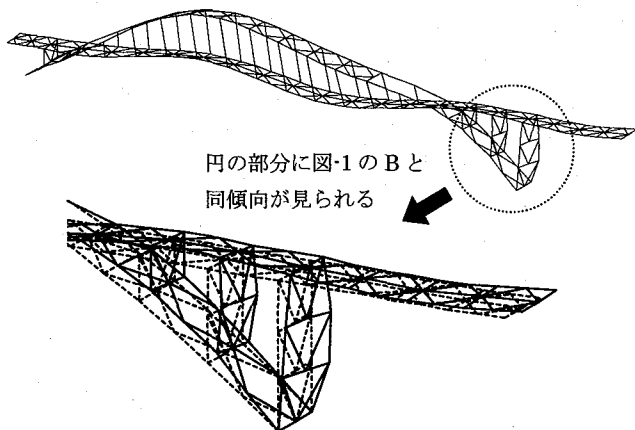


図-19 座屈判定1直後（時刻5.8秒）の変形状態
（減衰定数0.2%）

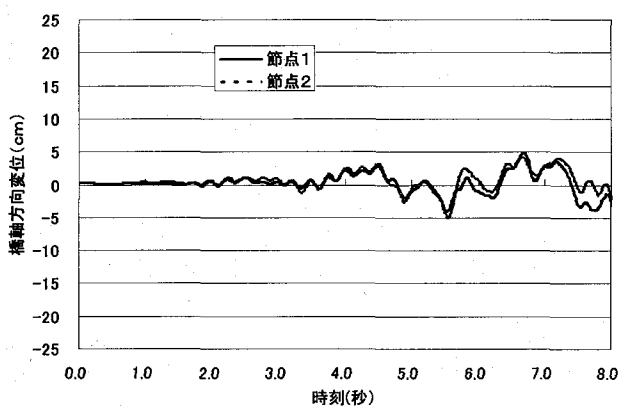


図-20 座屈が発生していない場合の
桁下鉛直部材中節点の橋軸方向変位時刻歴
（減衰定数1%）

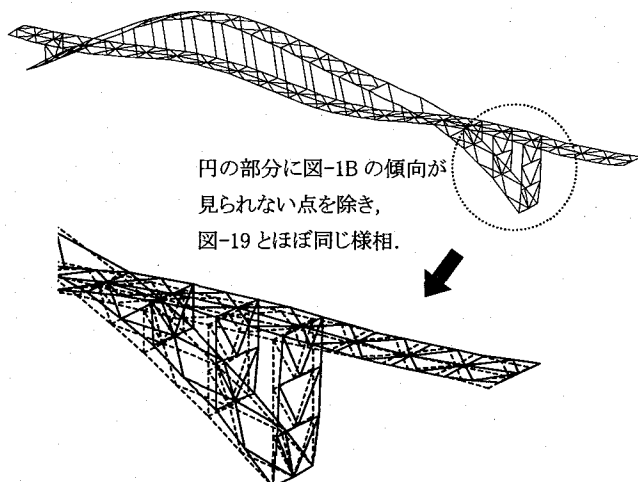


図-21 座屈が発生していない場合の
時刻5.8秒の変形状態
（減衰定数1%）

標準的な減衰定数1%の条件で動的解析を実施した場合、同位置に急激な変形が発生した様子は認められず（図-20）、減衰定数0.2%の条件で座屈が発生したのと同時刻の変形状態も座屈モードと関連していない（図-21）。

このことから図-18、図-19に示した減衰定数0.2%の場合の動的挙動が座屈の影響によるものであることが分かる。ただしこの現象は発散には至っておらず、構造全体に及ぼす影響は比較的軽微な可能性がある。ここでは座屈判定を得るために敢えて不利な解析条件を与えたが、通常条件でこのような座屈が検出された場合が、3章で述べた筆者らが想定している「座屈後の動的挙動をシミュレーションで確認すべき場合」に相当する。

6.3 シミュレーションの考察

実験による実現象と座屈固有値解析情報（座屈判定・座屈モード）は整合していたが、これが動的解析に反映されていなかった状況を、中間不整挿入により改善した事例を6.1に、座屈モードと動的解析上の挙動が最初から整合した事例を6.2に示した。6.2では中間不整挿入を必要とせずに動的応答の中に座屈現象が発生したが、これは6.1の場合とは異なり、座屈以前の振動形状から大きく傾向の異なる振動形状へ変化する現象ではなかった（座屈前の振動形状と座屈モードが比較的近かった）ためと考えられる。

一般的には構造物自体の特性や地震動入力条件等によって、座屈前の振動形状と座屈モードの形状の関係は遠近様々となろう。それらの中には6.1の振動面外座屈のように、計算上で現象を発生させるために中間不整挿入のような特別な措置が必要な場合と、6.2のように動的解析の中で自らきっかけを得て振動形状が変化する場合があることはここで再認識しておきたい。

実際の地震時座屈検討では、動的解析のみで自然に振動形状が変化する座屈現象が確認できていれば、提案手法やそれによる情報はその場で同時には必要ない。座屈後を含む全継続時間中の応答計算結果が通常の耐震性能照査と同レベルでチェックされ、NGであれば対策が検討される。しかしその場合も提案手法の存在意義がなくなることはない。対策を施した条件で再計算して現象が消えたときに、それが現象の見過ごしでなく、かつ十分余裕を持つてのことかを確認する手段となるからである。既報から繰り返し述べてきた通り、座屈に至っていないか座屈が看過されている状態でも提案手法が有用な情報を提供できる点は、他の動的座屈判定手法にない重要な特徴である。

3章では座屈判定を得た後の対策検討用情報としての座屈後挙動シミュレーションの必要性を述べたが、座屈判定が出ていないときに提案手法が提供する情報の信頼性を裏付ける材料としても、本論文に示したような動的現象（実験、解析どちらによるものであれ）と座屈固有値解析情報が整合している事例の蓄積は重要である。構造物の安全性確認の観点では動的座屈シミュレーションと座屈固有値解析情報の両者を揃えて記す必要がないケースでも、当面は知見として、可能な限り並べて示していく必要があると考える。

7. 結論

ここまでの検討をまとめると以下の通りである。

- 1) 瞬間の座屈固有値を用いた座屈点の判定や座屈モードの把握を提案してきたが、検出した座屈が構造全体系に与える影響が座屈モードのみからは判断しにくい場合には、座屈後の動的挙動シミュレーションが必要な場合もあると認識し、この点での提案手法の補強を図ることとした。
- 2) ただし検出された座屈が甚大な不安定現象であることが明白な場合は座屈後の動的挙動をシミュレートする必要性は低い。検出された座屈が架構全体に与えるダメージが小さい可能性がある場合に、このことを確認する目的でのシミュレーションを想定した。
- 3) 判定が出ながら応答性状に現れない座屈現象を解析上で発生させるため、動的解析の途中で微小不整量を挿入する座屈後の動的挙動シミュレーション手法を考案し、プラットフォームプログラムで適用可能にした。この措置を「中間不整の挿入」と呼ぶ。
- 4) 座屈後の動的挙動シミュレーション手法の有効性を過去の動的座屈実験結果と比較するによって検討した。中間不整挿入のタイミングや設定方法の調整により、解析結果を実験結果に近づけることができた。
- 5) 鋼中路アーチ橋例題でも座屈判定が出る条件で再度動的解析を実施した。この例題では中間不整を挿入せずとも部分系座屈現象が現れた。この性状が提案手法の座屈固有値解析で得られたものと整合していたことから、提案手法の有効性があらためて確認された。
- 6) 計算上座屈現象を発生させるために中間不整挿入等の特別な措置を必要とするか否かは、座屈前の振動形状と座屈モードの類似性の有無によるところが大きいと考察した。
- 7) 座屈固有値解析と動的解析による評価が同時に得られ、両者が整合する例題が蓄積されることで、本論文の実験例題のように座屈判定が出ていないながら現象が認められない場合や、座屈判定が出ていない場合の座屈固有値情報に信頼性が増すと認識された。

8. おわりに

座屈後挙動のシミュレーションに着目して、従来から提案してきた動的座屈照査手法に、さらに追加の提案と解析的検証を行なった。

判定や危険度評価に有効な動的解析中の座屈固有値解析をベースにした手法と、中間不整挿入を含む座屈後挙動を追跡する手法は、検討の目的や状況に応じて適宜使い分け、あるいは併用されるべきものと考え、これらを体系的に整理して、これまでに提案してきた手法の補強を継続し、手法が不足している部分の開発を行い、さらに適用事例を積み上げていく所存である。

参考文献

- 1) 大塚久哲・夏 青・矢葺 亘・為廣尚起：長大 RC アーチ橋における複合非線形動的解析と座屈・分岐解析，構造工学論文集 Vol.47A, pp873~881, 2001.3
- 2) 為廣尚起・大塚久哲：動的複合非線形解析による長大アーチ橋の座屈照査方法に関する考察，第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム論文集，pp.99-104, 2002年1月
- 3) Tamehiro N. and Otsuka H. Study on an Estimation Method for Buckling Capacity of Bridges During Earthquakes. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 323.
- 4) 大塚久哲・為廣尚起・宮森保紀・藤井義法・清水晋作：地震時の構造不安定現象に関する実験および解析的研究，構造工学論文集 Vol.51A, pp239~248, 2005.4.
- 5) 道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説，日本道路協会，2002.3.
- 6) 和田章・向秀元：一方向大スパン複層円筒トラス構造物の地震応答解析，日本建築学会構造系論文報告集，第413号，pp.87~96, 1990.7.
- 7) 日本機械学会編：固体力学におけるコンピュータアナリシス，第4章，コロナ社，1986. ほか
- 8) 姫野正太郎・谷口勝彦・田辺忠顕：長大スパンRCアーチ橋の非線形挙動に関する解析的研究，プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集，プレストレストコンクリート技術協会，pp.651-656, 2000.10.
- 9) 田辺忠顕 編著：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解法とプログラム，技報堂出版，2004.3.
- 10) 藤井・瀧・萩原・本間・三井：非線形構造モデルの動的応答と安定性，コロナ社，2003.
- 11) 鷺津久一郎ほか：有限要素法ハンドブックⅠ基礎編およびⅡ応用編，培風館，1981~1983. ほか
- 12) 大江豊・大塚久哲・水田洋司・劉貴位・飯星智博：鋼アーチ橋における主部材の断面特性と弾塑性動的解析，構造工学論文集，Vol.46A, pp.821-830, 2000.3.
- 13) 動的耐震設計法に関する研究小委員会：橋の動的耐震設計，土木学会，2002.3.
- 14) コンクリート製長大アーチ橋の設計方法に関する研究小委員会：コンクリート長大アーチ橋の設計・施工技術の現状と将来展望，土木学会，2000.8
- 15) 道路橋示方書（Ⅴ耐震設計編）・同解説，日本道路協会，2002.3.等

(2005年9月10日受付)