

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

Dynamic analysis considering composite nonlinearity
and the eigenvalue & bifurcation analysis of a long span RC arch bridge

大塚 久哲*, 夏 青**, 矢葺 亘***, 為広 尚起****

Hisanori Otsuka, Qing Xia, Wataru Yabuki, Naoyuki Tamehiro

*工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-0053 福岡市東区箱崎6-10-1)

**九州大学大学院修士課程 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-0053 福岡市東区箱崎6-10-1)

***修(工) 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-0053 福岡市東区箱崎6-10-1)

**** (株) 構造計画研究所 解析技術本部 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)

This paper investigates the effect of geometric nonlinearity and coorelea-tion of the bi-axial bending for the dynamic analysis of a 600m-span reinforced concrete arch bridge. After that the dynamic behavior of this bridge subjected to large seismic excitation is clarified by composite (material and geometric) nonlinear dynamic analysis. Furthermore the seismic stability of this bridge is discussed using the eigenvalue analysis and the incremental bifurcation analysis subjected to constant vertical and increasing horizontal loads.

Key Word: 600m-span RC arch bridge, composite nonlinear dynamic analysis, eigenvalue analysis, bifurcation analysis

1. はじめに

コンクリート長大アーチ橋のようなスレンダーな構造物では変形が大きくなることから、幾何学的非線形の考慮の必要性が指摘されている。設計地震力の大幅な増加により材料非線形状態になることも設計上やむを得ず¹⁾、従って幾何学的非線形と材料非線形の両方を考慮した複合非線形解析を行う必要がある。

一方、長大橋では全体構造の安定解析が重要であり、大地震を受ける長大アーチ橋の安定性の照査に関する研究も行われるようになった¹⁾²⁾。現在のところ動的複合非線形解析を行いながら、その都度安定照査を行うためのソフトはなく、静的に荷重を漸増させて増分解析を行いながら分岐判定を実行せざるを得ない。

これまでも既設長大RC橋の耐震性照査¹⁾や新設長大橋の耐震設計³⁾⁴⁾において複合非線形解析が行われている。しかしながら、文献¹⁾では2径間連続RC固定アーチ橋(支間長160m×2)に対して静的な複合非線形解析を行っており、地震荷重に対する動的な複合非線形解析は行われていない。また、文献³⁾ではPC5径間バランスドアーチ橋(最大径間長200m)に対して動的複合非

線形解析を適用し、耐震安全性を照査しているが、幾何学的非線形の影響の度合に關しての情報が不明である。一方、文献⁴⁾では単支間上路式複合アーチ橋に対して複合非線形動的解析が実施されているが、支間長285mと我国最大クラスの大きさであるにもかかわらず幾何学的非線形の影響は小さいことが指摘されている。

このような現況を受けて、本研究では、文献⁵⁾に示されている支間長600mの長大RCアーチ橋の動的解析における幾何学的非線形の影響・2軸曲げ問題の影響を検討した後、動的複合非線形解析を行って、長大RCアーチ橋の地震時動的挙動を明らかにすると共に材料非線形、幾何学的非線形の影響の度合を調べた。さらに全体構造の座屈解析、静的複合非線形解析の増分解析と分岐点探索を行って、全体構造の安定性を照査した。なお、本研究の復元力特性は初期軸力のみを考慮して作成し、変動軸力の影響については考慮していない。

2. 解析対象橋梁

本研究の対象橋梁は文献⁵⁾で試設計の1つに用いられた支間長600m、ライズ100mを有する長大コンクリート

アーチ橋である。解析橋梁の全体図を図-1に、使用材料を表-1に示す。

表-1 使用材料

使用材料	コンクリート	アーチリブ： $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$
		補剛桁： $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$
		鉛直桁： $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$
	鉄筋	SD685

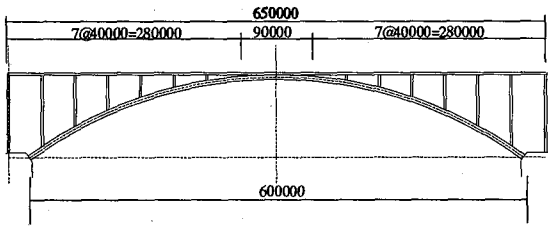


図-1 長大アーチ橋の全体図(mm)

2.1 解析モデル

本研究では、対象橋梁を図-2に示すような骨組にモデル化した。補剛桁と鉛直材は線形要素によりモデル化し、アーチリブは材料非線形要素とした。各部材の断面は、文献⁹⁾の値を採用しており、アーチリブは3室箱桁で、スプリング部において幅は22m、高さは11m、厚さは0.5mを有している。アーチリブ部は58分割した。また、復元力特性は図-3に示すJR総研RC型剛性低減型3折れ4勾配モデル⁹⁾とした。このモデルを採用したのは使用したソフトで2軸曲げ問題に対応できるのは、このモデルに限られていたからであるが、本モデルは本質に武田モデルと同じである。総研モデルは負勾配を含むテトラリニアであるが、ここではトリリニアとして使用している。

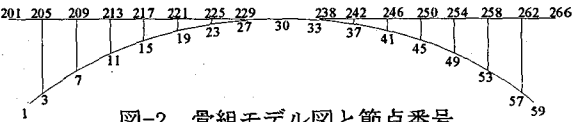


図-2 骨組モデル図と節点番号

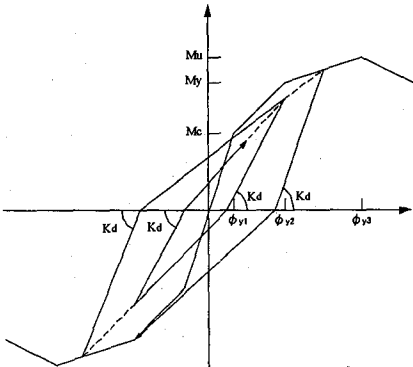


図-3 JR総研RC型モデル

2.2 境界条件

境界条件を表2-1に示す。

表-2 境界条件

支持点	補剛桁端部：鉛直方向及び橋軸回り(桁ねじり方向)は拘束。 橋軸方向、橋軸直角方向、橋軸直角方向回り、及び鉛直軸回り方向はフリー。 アーチリブ端部：全固定。
部材の 接合 条件	補剛桁節点217、221、225、242、246、250に 下方から取り付く鉛直材の接合条件はピン。 他の部材同士の接合箇所は全て剛接。

2.3 固有値解析

固有値解析による対象橋梁の固有値を表-3に示す。表-3(a)は幾何非線形を無視した場合、表-3(b)は幾何非線形を考慮した場合の固有値解析結果である。両者の値を図示すれば図-4を得る。幾何非線形を考慮した固有値解析とは、自重による初期断面力を考慮した固有値解析である。両者の比較によれば、幾何学的非線形を考慮した場合は無視した場合より固有周期が長くなることが分かった。これは、初期軸力を考慮したことによって全体剛性が低下したためと考えられる。特に1次周期で約1秒長くなっており、この差は動的解析の結果に影響を及ぼすものと思われる。両者の差の大きな1次は面外曲げモード、2次、4次は面内曲げモードであった。

表-3 固有値解析結果

(a) 幾何非線形を
無視した場合

次数	固有周期(sec)
1	7.013
2	4.375
3	2.799
4	2.578
5	1.909
6	1.831
7	1.416
8	1.400
9	1.133
10	1.116

(b) 幾何非線形を
考慮した場合

次数	固有周期(sec)
1	7.993
2	5.043
3	2.962
4	2.843
5	1.928
6	1.843
7	1.477
8	1.453
9	1.163
10	1.138

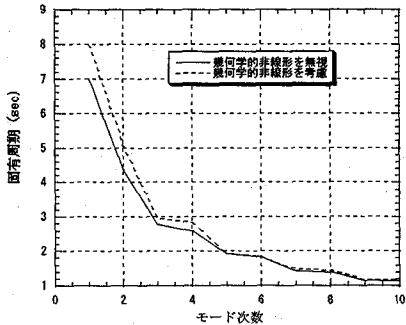


図-4 固有周期比較図

3. 地震時応答解析

3.1 解析条件

時刻歴応答解析における数値積分法には、Newmark β 法 ($\beta=0.25$) を用い、積分時間間隔を0.001秒とした。減衰マトリクスは固有値解析により歪みエネルギー型のモード減衰定数を算定し、有効質量の卓越した2次、21次のモードによりレーリー型の減衰マトリクスを作成した。ここで剛性に比例する部分は初期剛性のみであり、幾何剛性は含んでいない。部材の減衰定数は全て0.03とした。

アーチの架橋地点の地盤は一般に堅固であるので、入力地震動には、平成7年の兵庫県南部地震においてI種地盤で観測された神戸海洋気象台の記録を用いた(図-4)。波形のデータ間隔は0.02秒、最大加速度はNS成分で818gal、EW成分で617gal、UD成分で332galである。なお、入力時間は主要動を含む20秒間とした。非線形挙動を明確にする為に、地震波の振幅を1.5倍とした。EW成分を橋軸方向、NS成分を橋軸直角方向、UD成分を鉛直方向に作用させた。

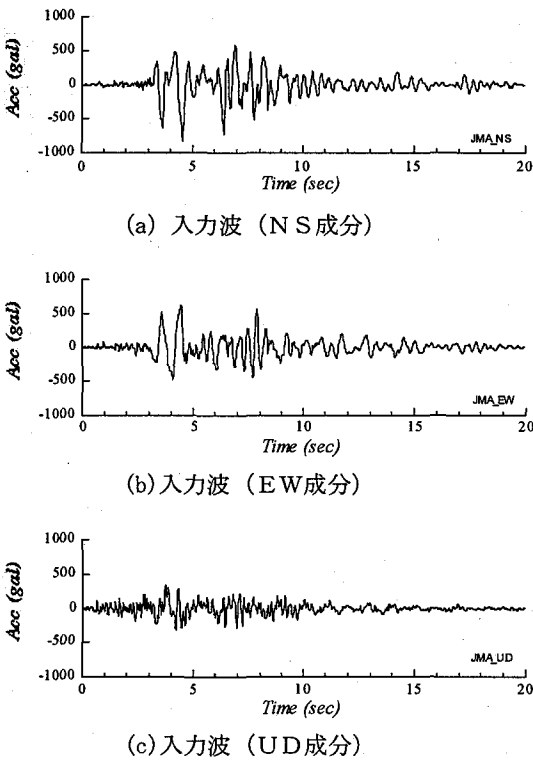


図-5 入力地震動波形

3.2 複合非線形解析

ここでは長大アーチ橋の動的応答特性を把握するために、材料非線形、幾何学的非線形の考慮の有無により4つの解析ケースを作成した。表-4にそれぞれのケー

スについての解析条件を示す。このうちCASE1とCASE3は弾性解析時の幾何学的非線形考慮の有無の比較、CASE2とCASE4は弾塑性解析時の幾何学的非線形の考慮の有無の比較、CASE1とCASE2、及びCASE3とCASE4は弾塑性解析の考慮の有無の比較である。

表-4 解析ケース

解析ケース	材料非線形	幾何学的非線形
CASE1	×	×
CASE2	○	×
CASE3	×	○
CASE4	○	○

○：考慮する
×：無視する

図-6～図-18にアーチリブの曲げモーメント、曲率、加速度、変位、せん断力、軸力の最大値の分布を示す。これらを見て、全ての分布曲線が2つのグループに分かれていることが分かる。すなわち、CASE1とCASE3、CASE2とCASE4の2つのグループである。両グループにおいて異なるのは材料非線形の考慮の有無であり、この考慮の差によって結果が大きく異なることを示している。すなわち、本橋のような長大アーチ橋においても幾何学的非線形の影響は弾性解析と弾塑性解析ともに小さいことがわかった。

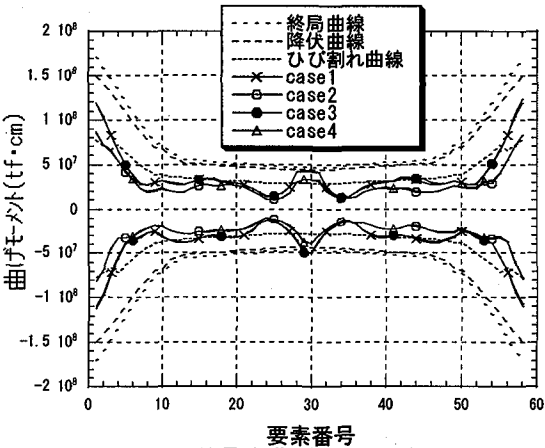


図-6 面外最大曲げモーメント分布図

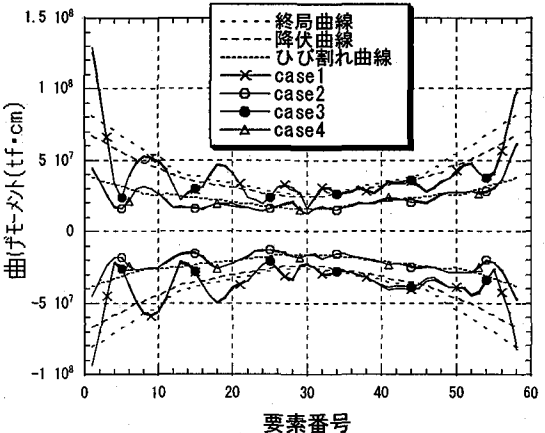


図-7 面内最大曲げモーメント分布図

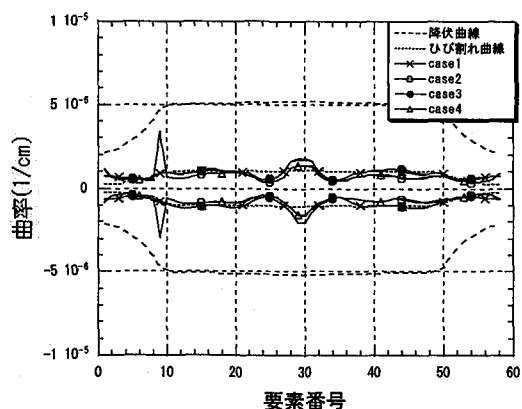


図-8 面外最大曲率分布図

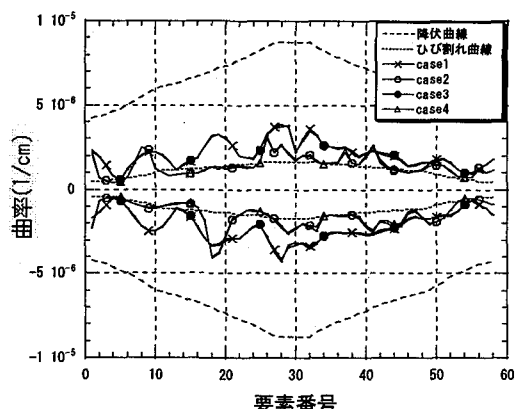


図-9 面内最大曲率分布図

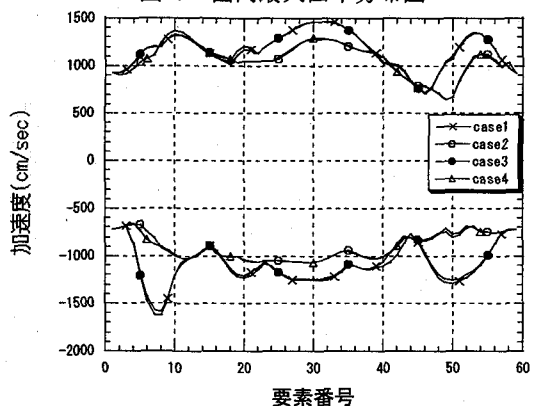


図-10 橋軸方向最大加速度分布図

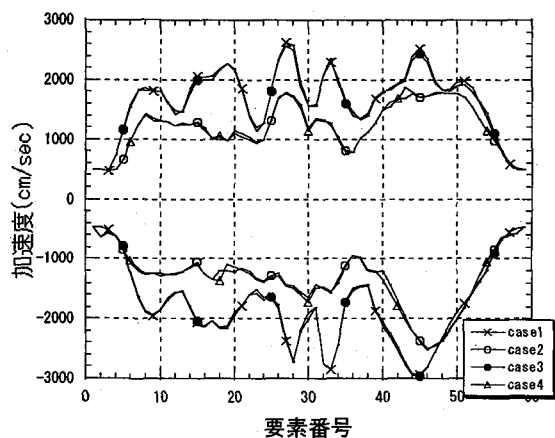


図-11 鉛直方向最大加速度分布図

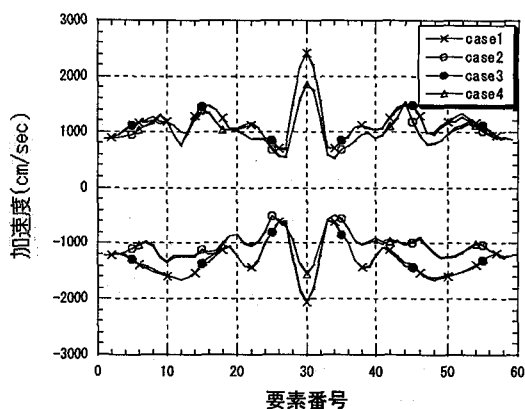


図-12 橋軸直角方向最大加速度分布図

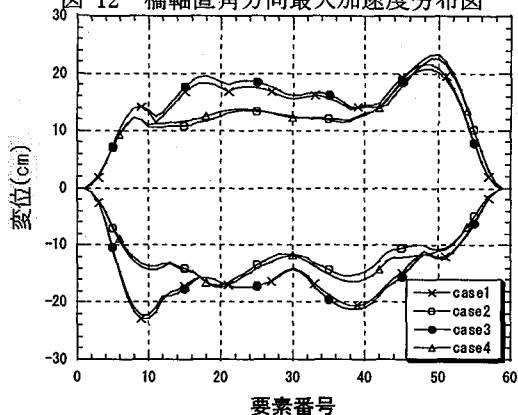


図-13 橋軸方向最大変位分布図

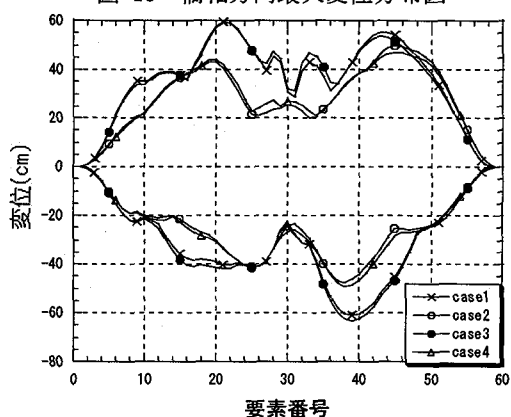


図-14 鉛直方向最大変位分布図

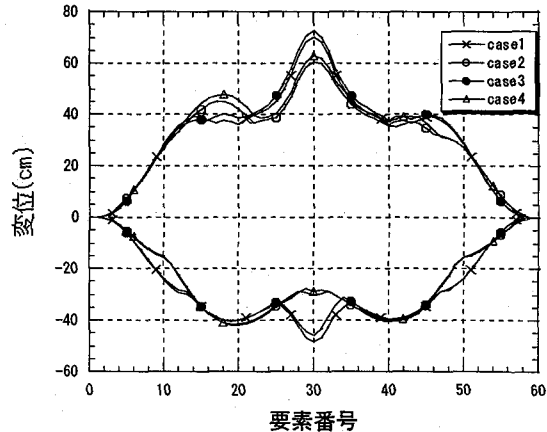


図-15 橋軸直角方向最大変位分布図

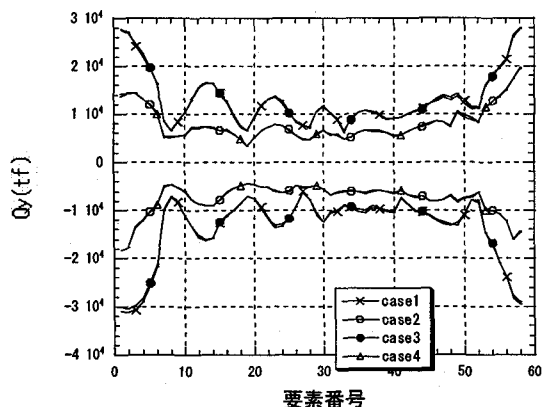


図-16 鉛直方向最大せん断力分布図

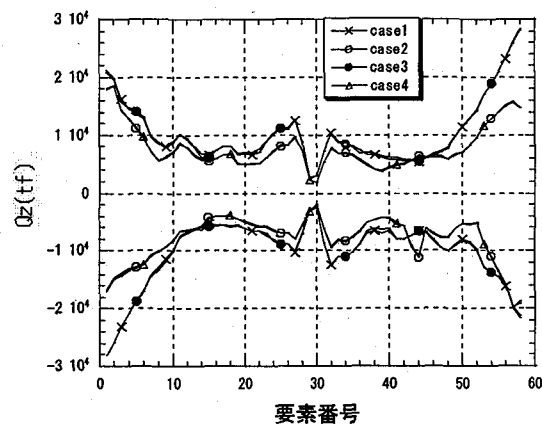


図-17 橋軸直角方向最大せん断力分布図

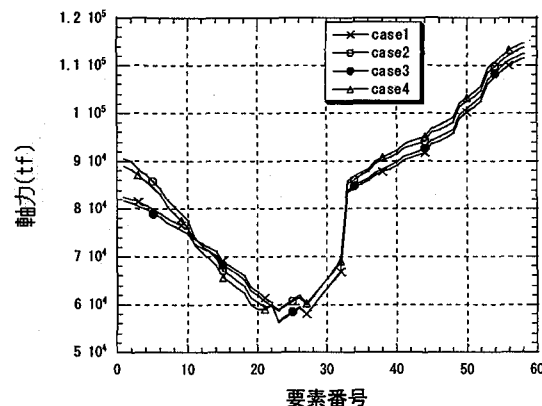


図-18 最大軸力分布図

また、両非線形性を無視したCASE1の値が最も大きく、複合非線形性を考慮したCASE4の場合が最も小さくなる傾向にあることも分かった。従って、図-7に見られるように、弾性解析では、随所に終局モーメントを越える結果が得られているのに対し弾塑性解析では降伏モーメント以内にあり、大地震時における安全性の把握には、材料非線形性の考慮が重要であることが知られる。

3.3 複合非線形における2軸曲げ問題の検討

アーチ橋のような立体構造には2方向の曲げモーメントが

同時に発生し、それがお互いの耐力に影響し合うので、2方向曲げモーメントの相関を考慮しなければならない場合がある。

ここでは、複合非線形における2軸曲げ相関を考慮した場合と無視した場合の2ケースを解析して、2軸曲げ相関の影響を検討する。入力条件は3.1に示した通りである。

図-19及び図-20に節点1番(図-2参照)の2軸曲げを考慮した場合(点線)と無視した場合(実線)のM-M応答曲線、 ϕ - ϕ 応答曲線を示した。同図中の太実線は楕円近似した場合のひび割れ相関曲線を示している。

これらの図によれば、複合非線形を考慮した場合は無視した場合より、M-M曲線が小さく、 ϕ - ϕ 曲線は大きくなる事が分かる。特に面外モーメントと曲率(M_y , ϕ_y)の差が顕著である。2軸曲げ相関を無視した場合ではモーメント、曲率の値はひび割れ相関曲線を越えていることがわかった。

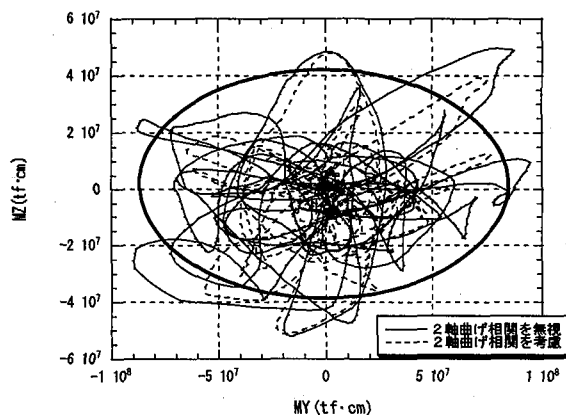


図-19 My-Mz相関曲線

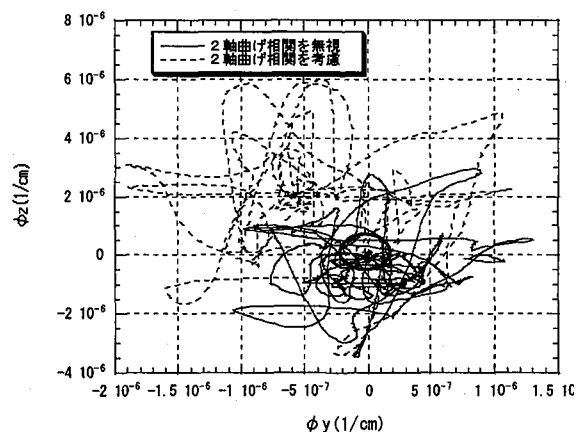


図-20 ϕ_y - ϕ_z 相関曲線

図-21～図-24はアーチリブにおけるモーメントと曲率の最大値の分布を全節点に対し示したものである。面外モーメントはほぼ全長にわたって2軸曲げ相関を考慮した場合の方が無視した場合より最大モーメントが大きな値を示している。一方、面内モーメントの差はほとんどない。最大曲率では2軸曲げ相関を考慮した場合は無視

した場合より大きな箇所が存在する。アーチリブと鉛直材の繋ぎ部及び繋ぎ部付近で曲率は大きな値を示している。2軸曲げ相関を考慮した場合は固定点及び固定点付近で特に橋軸直角方向に大きなモーメント、曲率を生じることがわかった。

図25～図30はアーチリブにおける最大変位と最大加速度の分布図である。これらの図面によれば、3方向の変位の内の橋軸方向の最大変位が最も小さい。2軸曲げ相関を無視した場合と考慮した場合の最大変位、最大加速度の差は橋軸直角方向で最も大きいことがわかった。

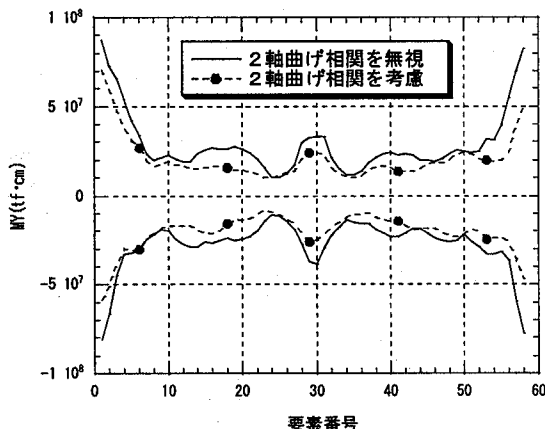


図-21 面外最大モーメント分布図

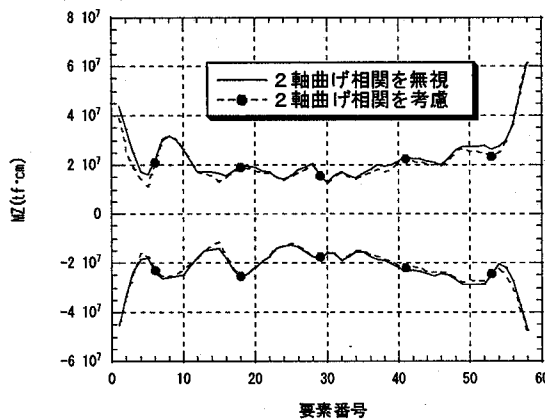


図-22 面内最大モーメント分布図

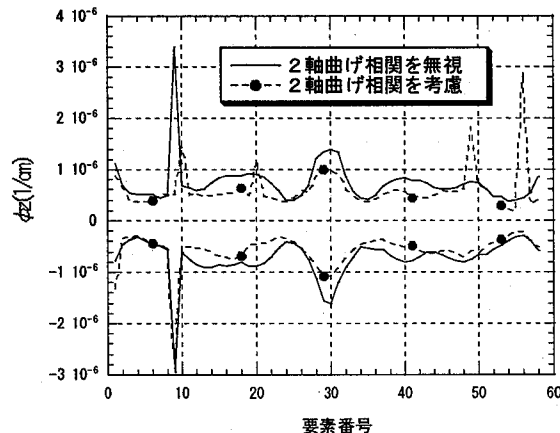


図-23 面外最大曲率分布図

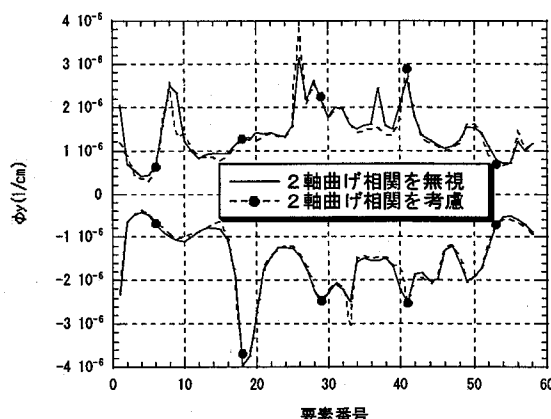


図-24 面内最大曲率分布図

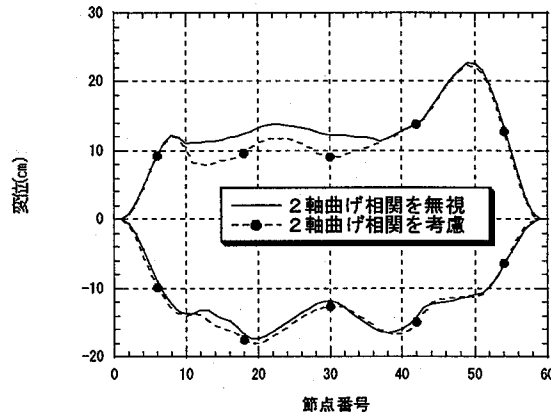


図-25 橋軸方向最大変位分布図

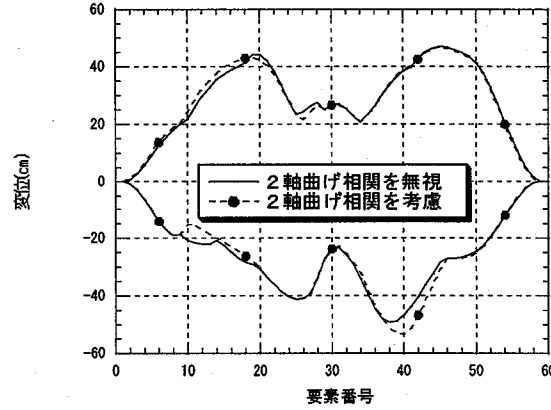


図-26 鉛直方向最大変位分布図

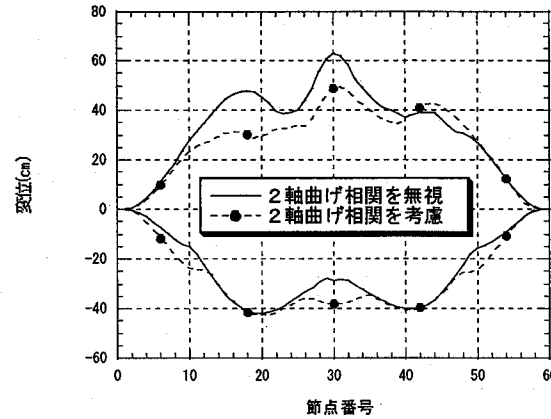


図-27 橋軸直角方向最大変位分布図

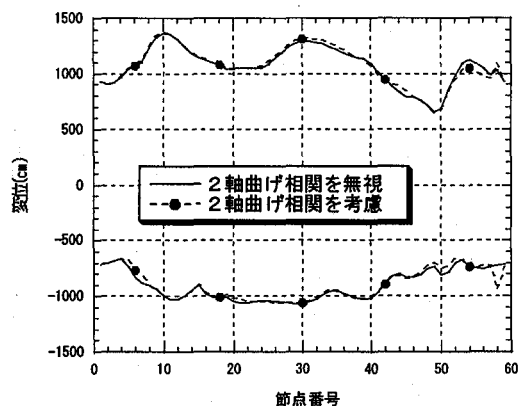


図-28 橋軸方向最大加速度分布図

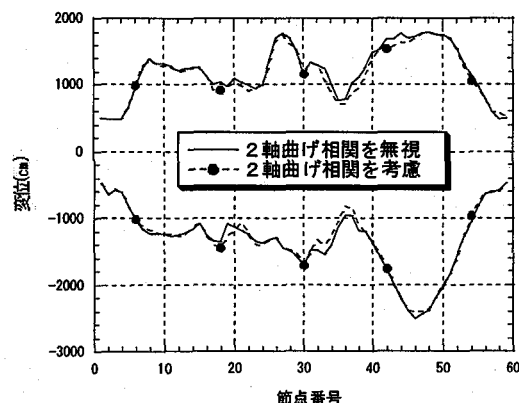


図-29 鉛直方向最大加速度分布図

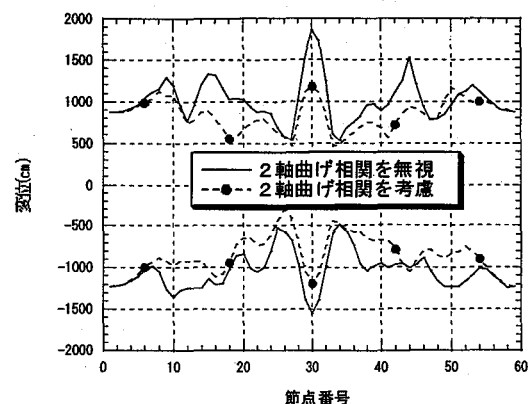


図-30 橋軸直角方向最大加速度分布図

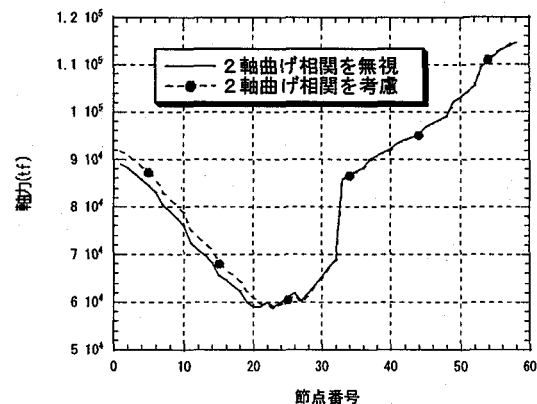


図-31 最大軸力分布図

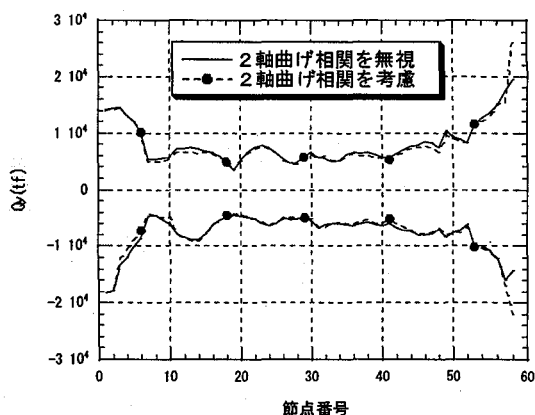


図-32 鉛直方向最大せん断力分布図

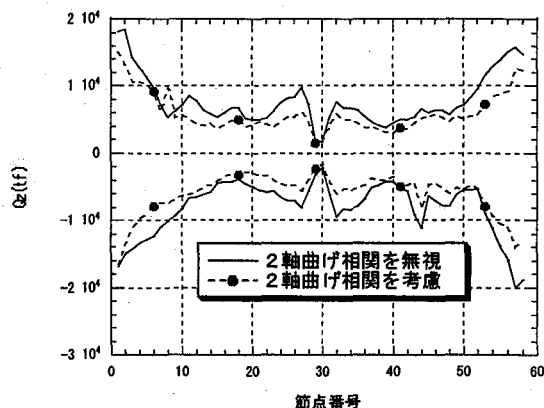


図-33 橋軸直角方向最大せん断力分布図

図-31～図-33に最大軸力と最大せん断力の分布を示す。最大軸力の差は比較的小さいが、他の断面力と異なり、2軸曲げ相関を考慮した場合の方が無視した場合より大きくなっている。最大せん断力では鉛直方向の差は小さいが、橋軸直角方向の差は大きく出ている。

4. 座屈分岐解析

4.1 座屈固有値解析

座屈問題の固有方程式は下記のように書ける。

$$[K] \{x_i\} - \lambda_i [K_g] \{x_i\} = 0 \quad (\text{式-1})$$

$[K]$: (材料) 剛性マトリックス

$[K_g]$: 初期応力マトリックス

$\{x_i\}$: i 次座屈モードベクトル

λ_i : i 次座屈荷重倍率

数値解法としては逆反復法を採用する。座屈固有値解析では、最小荷重倍率とそれに対応する座屈モードベクトルを求め、求められた荷重倍率は初期応力マトリックスに対する荷重倍率を示している。座屈固有値解析を行う場合は、初期応力状態を作成する必要がある、さらに初期応力マトリックスを作成するには、幾何学的

非線形を考慮する必要がある(表-5)。

表-5 座屈固有値解析の過程図

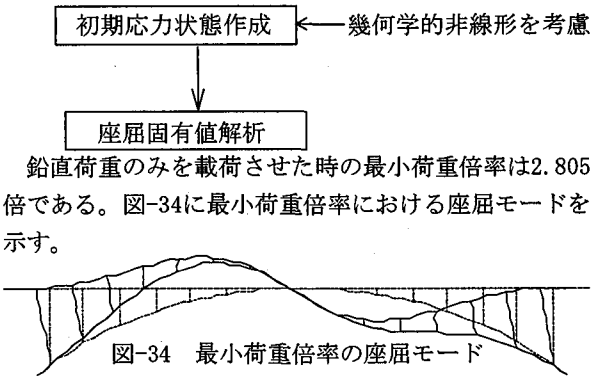


表-6に鉛直荷重の外に、水平荷重が加わる場合の座屈固有値解析の最小荷重倍率を示す。

表-6は、1列目が水平荷重と常時荷重の比である。例えば、1列目の2行目は、2となっているがこれは自重に対して2倍の水平荷重を常時荷重と共にアーチ橋にかけることを意味している。水平荷重の載荷パターンは、橋軸方向のみ、橋軸直角方向のみ、及び両方向同時の3通りである。

表-6 座屈固有値解析の座屈荷重倍率

水平荷重と 常時荷重の比	橋軸方向 載荷	橋軸直角方向 載荷	橋軸方向載荷+ 橋軸直角方向載荷
2	2.566	2.809	2.571
4	2.113	2.822	2.134
6	1.692	2.841	1.736
8	1.179	2.861	1.267
10	0.737	2.880	0.874

表-6によれば、座屈荷重倍率は橋軸方向載荷に対して敏感であり、橋軸直角方向載荷に対して鈍感であることが知られる。荷重倍率が1の時、その荷重状態で座屈することを意味するが、本橋の場合は橋軸方向水荷重載荷時でも鉛直荷重の8倍以上の水平荷重を作用させないと全体座屈を生じないことになり、座屈に対して非常に大きな安全性を有していることになる。しかし、座屈解析は与えられた初期応力状態に対する荷重倍率を求めているため、実際には後述の増分解析に見られるように荷重と共に変化する変形と断面力を考慮した安定解析とは結果が異なることになる。

4.2 分岐解析⁷⁾

表-7 解析ケース

解析ケース	材料非線形	幾何学的非線形	分岐の判定
CASE1	○	×	—
CASE2	×	○	☆
CASE3	○	○	☆

○：考慮する ×：無視する ☆：する

常時荷重を基準荷重とし、弧長増分法を用いる。解析ケースを表-7に示す。まず、鉛直荷重のみを載荷する。

各ケースのステップごとの荷重倍率の変化を図-35に示す。

この図には、CASE2とCASE3において判定された分岐点を○印で示す。CASE2、CASE3では分岐判定後も荷重増分解析を行っている。幾何学的非線形のみ考慮したCASE2は1000stepで極大値に達し、荷重倍率は3.58である。複合非線形を考慮したCASE3では500stepで極大値に達し、荷重倍率は2.377である。4.1で示した座屈固有値解析における最小荷重倍率2.805はこれらの値の中間を示していることがわかる。

図-36に節点23番(図-2参照)の荷重倍率-変位曲線を示す。この図によれば、複合非線形モデルが分岐するまでは、CASE2とCASE3の曲線は一致している。幾何学的非線形を考慮した場合、材料非線形のみを考慮した場合より同じ荷重倍率で変位が大きいたことがまず分かる。次に、幾何学的非線形のみを考慮した場合は複合非線形を考慮した場合の分岐点を通して荷重倍率が延びることがわかる。

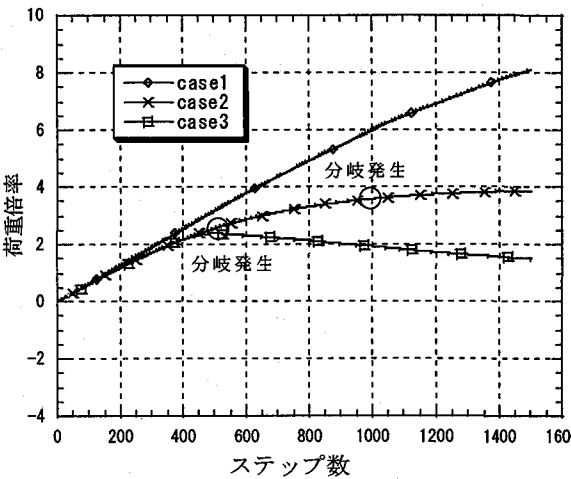


図-35 荷重倍率推移図

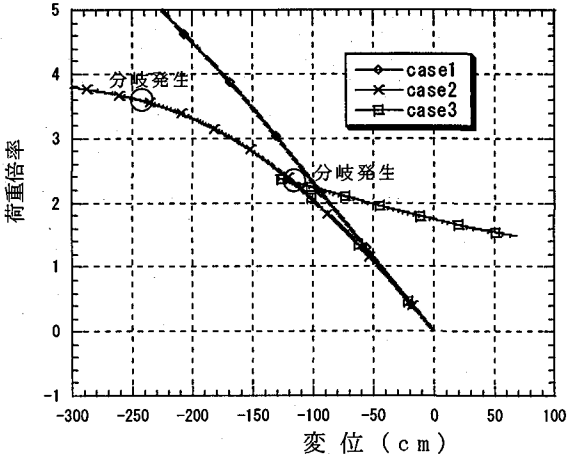


図-36 節点23番の荷重倍率-変位図

4.3 水平荷重の影響

前節の複合非線形CASE3を基本として、鉛直荷重と共に水平荷重をかけた場合の検討する。水平荷重の方向はそれぞれ表-8の3通りとし、CASE3A～3Cとする。水平荷重の大きさは鉛直荷重の20%のときが荷重倍率1としている。

解析の結果によれば、鉛直荷重と橋軸方向荷重が同時に入力した場合は荷重倍率が1.047倍で分岐する。同様に鉛直荷重と橋軸直角方向荷重が同時入力した場合は荷重倍率 2.415倍で、3方向同時に载荷する場合では荷重倍率0.57倍で分岐する。

表-8 解析ケース

	橋軸方向载荷	橋軸直角方向载荷
CASE3	×	×
CASE3A	○	×
CASE3B	×	○
CASE3C	○	○

○：考慮する ×：無視する

図-37、図-38の○印は各ケースにおいて分岐をする点と判定される点である。増分解析の場合はいずれの場合も、分岐点をすぎれば荷重の倍率が下げることがわかる。最小荷重倍率は鉛直荷重と橋軸直角荷重が同時に入力する場合が最も大きく、3方向同時に荷重がかかる場合が最も小さいことが分かった。

図-38は節点23番（図-2に参照）の荷重倍率－変位図を示す。分岐までの同じ荷重倍率では、鉛直荷重と橋軸直角荷重が同時ににかかる場合の変位が最も小さく、3方向に同時荷重がかかる場合の変位が最も大きい。3方向同時载荷の分岐点の荷重倍率は0.57倍であるから、 $0.2 \times 0.57 = 0.114$ の地震に対して計算上の分岐が起きることとなる。

この値は、4.1の座屈固有値解析と比較して非常に小さな値となっている。実際問題としてこのような低い水平力レベルで耐荷力を失うか否かについては実験等の照査が必要であると考える。

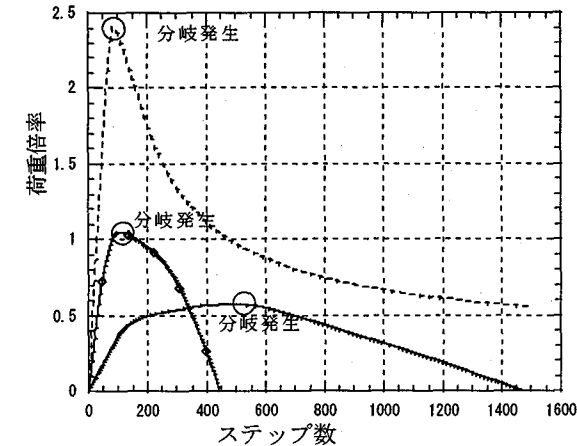


図-38 節点23番の荷重倍率-変位図

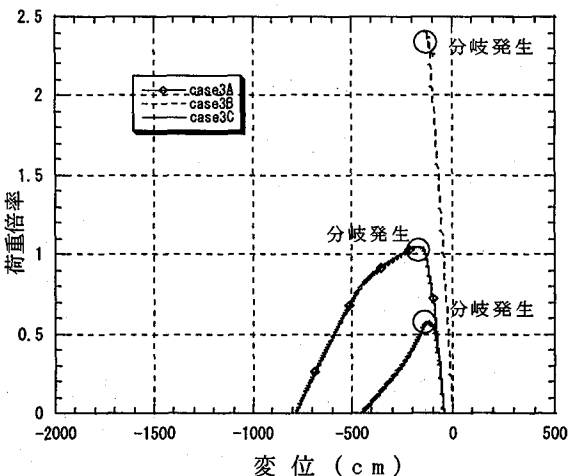


図-37 荷重倍率の推移図

5. 結論

本研究では長大アーチ橋における動的及び静的な複合非線形解析を行った。得られた知見は次のとおりである。

- ①幾何学的非線形を考慮した場合は無視した場合より固有周期が長くなる。
- ②動的解析では2軸曲げ相関を考慮した場合、材料非線形を考慮した場合、幾何非線形を考慮した場合及び複合非線形を考慮した場合のいずれも相関や非線形性を無視した場合と異なる結果となった。ただし本研究で対象とした支間長600m級の長大アーチであっても幾何学的非線形の影響より材料非線形の影響が大きいことが知られた。
- ③複合非線形における2軸曲げ相関問題では、2軸曲げ相関を考慮した場合と無視した場合の応答値の差が橋軸直角方向で最も大きいことがわかった。また、2軸曲げ相関を無視した場合で、ひび割れていない一部の節点が2軸曲げ相関を考慮するとひび割れ相関曲線を越える結果となった。本橋は2軸曲げ相関を考慮する必要があると言える。
- ④本研究では複合非線形を考慮した静的増分解析と分岐点探索により全体安定性を照査したが、水平荷重を考慮した場合、固有値解析とは全く異なる荷重倍率で最大耐力に達するという結果が得られた。ただし、地震時の安定性に関しては動的応答解析を行う途中で分岐探索が望しく、これに関しては今後の課題としたい。

(謝辞)：本研究は、土木学会構造工学委員会 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 (委員長：田邊忠顕 名大教授) における解析WGの研究として行ったものである。解析データを提供していただいた大成建設 (株) 渡辺典男氏、アーチリブの復元力特性計算をしていただいた (株) オリエンタル

コンサルタンツ大竹省吾氏，複合非線形解析，座屈分岐解析に関して最新の知見をご教示いただいた田邊委員長はじめ委員各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 江上，川上，須田，織田：水晶山橋の耐震設計について，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計にかんするシンポジウム講演論文集，1998. 12，pp. 383-388
- 2) 姫野，田邊：長大スパンコンクリートアーチ橋の非線形的解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21，No. 3，1999，pp. 385-390
- 3) 望月，非紫喜，飯東，松木：池田湖橋における地盤と構造物の動的相互作用を考慮した耐震解析，橋梁と基礎98-10，1998. 10，pp. 17-23
- 4) 猪熊，台原，為広：鋼・コンクリート複合アーチ橋の耐震設計－富士川橋の場合－，第1回地震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講演論文集，1998. 1，pp. 241-244
- 5) 土木学会 構造工学委員会 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・施工技術の現況と将来，構造工学技術シリーズ NO. 19，2000. 9
- 6) (株) 構造計画研究所：3次元立体構造物の静的・動的非線形解析プログラム RESP-T 理論マニュアル，Vol. 3. 1，1997
- 7) 鷲津ほか：有限要素法ハンドブックⅡ応用編，5章、6章，培風館，昭和58年，pp. 117-181

(2000年9月14日受付)