

座屈の影響を考慮した鋼製骨組構造の 非線形動的応答解析法の検討

山尾敏孝¹・葛西 昭²・宮近謙策³

¹フェロー 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

²正会員 博(工) 熊本大学准教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

³ 修(工) 横河工事㈱ 大阪支店 (〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-4-12 本町富士ビル)

1. はじめに

現在、地震時の挙動が複雑となる鋼アーチ橋などの耐震設計は、梁要素を用いた複合非線形動的応答解析法が最も有効な手法であると考えられている¹⁾。しかしながら、梁要素を用いた複合非線形解析手法では、断面変形に伴う局部座屈の影響はそのままでは考慮することができない。また、部材座屈は部材を適切にモデル化することによって解析で考慮できるとされているが、この方法に関してもさらに検討が必要である。しかしながら、平成7年に発生した兵庫県南部地震のように、鋼製橋脚が局部座屈をとまって破壊する被害が生じており、また、部材座屈を伴った損傷事例も多く存在する。橋梁全体の地震時挙動を部材の全体座屈と構成板の局部座屈を考慮して解析するには、詳細にモデル化を行い、弾塑性有限変位解析を実施することによって考慮することができると思われるが、梁要素と板要素を含めてモデル化方法が問題となる。なお、部材の要素数が増加し、データ入力が複雑である上、計算時間が膨大となることも予想される。

本研究では、鋼製骨組構造の構成板の局部座屈と部材の全体座屈の影響を適切なモデル化によって考慮することができる複合非線形動的応答解析法の開発を目的とするものである。鋼橋全体の解析は複雑であるため、アーチ橋の端柱や鉛直材の基部およびブレース材(対傾構)を想定して、ブレース材付の門型ラーメン橋脚や対傾構を有するアーチリブのみを解析対象とした。まず、ラーメン橋脚を対象に、ブレース材の境界条件や要素の分割数や分割領域を変化させて、解析結果に及ぼす影響等を固有値解析や

静的解析により検討した。さらに、対傾構を有する鋼アーチリブを対象に提案手法によるモデル化をして、静的解析および動的解析により全体挙動の検討を行ない、最も適切で精度が向上すると考えられる鋼製骨組構造のモデル化方法を検討した。

2. 静的解析によるモデル化の検討

(1) 解析対象

解析対象は図-1に示すような、部材断面と形状寸法を有する無補剛箱型断面の一層門型ラーメン橋脚を用いた²⁾。橋脚には上部構造死荷重として、断面の降伏軸力に対して10%程度の軸力に相当する荷重を柱部材上部に作用させた。鋼材はSS400を使用し、材料特性は、ヤング率 $E=2.06 \times 10^{11}$ (N/m²)、降伏応力 $\sigma_y=2.38 \times 10^8$ (N/m²)、降伏ひずみ $\epsilon_y=0.00114$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、単位体積重量 $\gamma=7860$ (N/m³)である。なお、部材の構成板の幅厚比パラメータは $R=1.1$ である。解析時に用いる鋼材の応力-ひずみ関係は、図-2に示すバイリニア型とした。バイリニア型の応力-ひずみ関係として、2次勾配は弾性係数の1/100～1/80程度が用いられる場合が多いが、本研究では1/100とした。なお、座標系は図-1に示すように、橋軸直角方向をX軸、鉛直方向をY軸および橋軸方向をZ軸とした。

図-4はラーメン橋脚の解析モデルで、ブレース材無い場合とブレース材(斜材)が有る場合の解析モデルの一例を示したものである。部材の分割数は文献3)の結果を参考にし、柱および梁部材は12分割とした。ブレース材の断面形状および緒元は図-3に示すI型断面とした。

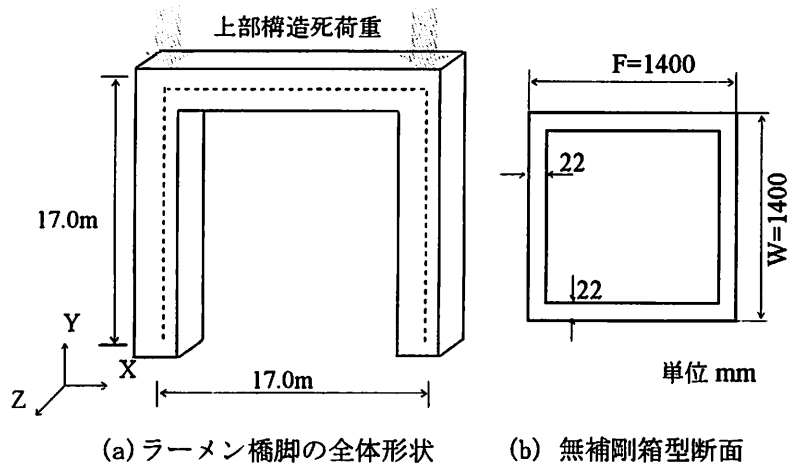


図-1 解析対象のラーメン橋脚

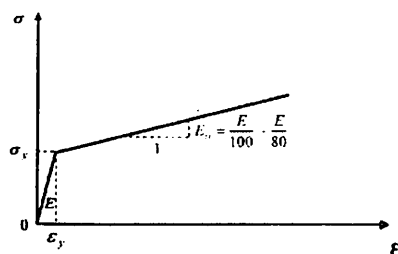


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

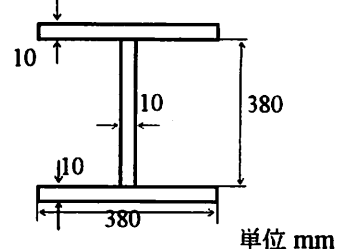


図-3 ブレース材の断面図

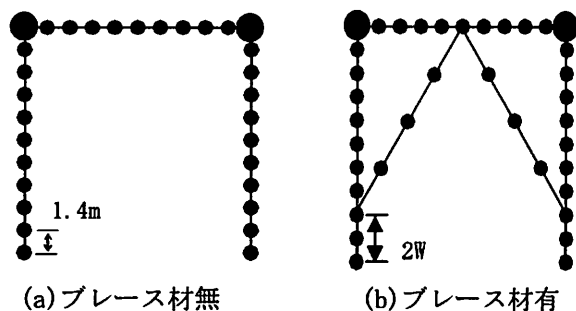


図-4 固有値解析モデルの例

なお、ブレース材は柱基部から高さ $2W$ (W はラーメン橋脚のウェブ幅) の位置に取り付けた。解析においては、部材の座屈現象やブレース材の挙動が全体系に及ぼす影響についても検討する必要があるため、ブレース材の分割数を変化させて検討した。なお、解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS⁴⁾を用いた。

(2) ブレース材有モデルの固有値解析

ブレース材の分割数を 1, 2, 4, 16 とし固有値解析した⁵⁾。分割数を 2 以上にした場合では、4 次モード以降に単一部材の梁要素によるモデルでは表われなかった高次モードが得られた。なお、4 次モード以降の変形図の一例を図-5 に示すが、主としてブレース材の変形であった。ブレース材の分割数を増やしたことにより、ブレース材の変形モードをより正確に表現できたと考えられる。また、解析結果は示していないが、4 分割の場合では 4~9 次モードは固有振動数が 2.7Hz, 2.9Hz, 4.9Hz であることから、この値前後の振動が起こった場合、ラーメン橋梁全体が共振を起こす可能性があることが示された。ま

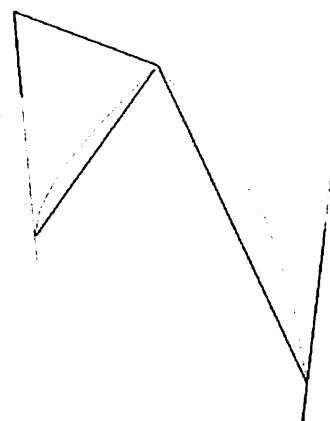


図-5 4 次モード図 (梁要素: 4 分割)

た、2 分割モデル、4 分割モデルおよび 16 分割モデルの結果を比較すると、鉛直方向の卓越振動モードが異なることが分かった。ブレース材の分割に増やしたことによって、ブレース材の変形挙動をより厳密に表現することができたと考えられる。なお、動的解析を行う際には減衰が重要なパラメータであり、例えば、Rayleigh 型の減衰マトリックスを考慮する際には 2 つの卓越した固有振動モードの振動数を設定し、減衰定数を決定する必要がある。すなわち、固有値解析結果における卓越振動モードは、その結果を利用する動的解析等において重要なパラメータとなることから、ブレース材の分割数による値の変化は重要な意味を持つと考えられる。

(3) 静的解析モデル

ブレース材を有する無補剛箱型断面の一層門型ラーメン橋脚を対象に静的解析を行う。図-6 に示すように、局部座屈を考慮するため柱基部をシェル要素

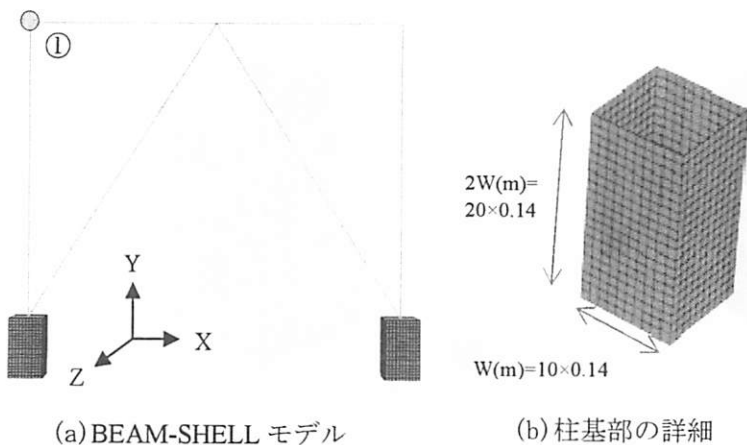


図-6 一層門型ラーメン橋脚モデル



図-7 三層門型ラーメン橋脚モデル

表-1 ブレース材の種類と寸法

	A	B	C
部材長(m)	16.327		
断面幅(m)	0.75	0.38	0.26
断面板厚(m)	0.01	0.01	0.01
断面積(m ²)	0.022	0.011	0.008
細長比	50	100	148

で、その他の梁・柱部材およびブレース材を梁要素によりモデル化した。柱基部のシェル要素の分割状況は、ウェブ・フランジ共に 10 分割とし、分割した要素が正方形になるように高さ方向の分割数を決定した。なお、シェル要素は基部からの高さは、事前に検討した結果ウェブ幅の 2 倍とした。

鋼橋のブレース材の細長比に関する実績調査によれば、ブレース材の細長比は 88.6~144 の範囲に分布し、平均値は 112 であることが報告されている^{6),7)}。そこで、ブレース材の部材座屈の影響を調べるため、ブレース材の細長比を 50, 100, 148(以下、ブレース材 A, B, C と呼ぶ)の 3 種類を選択し、部材の寸法諸元を表-1 に示した。ブレース材 A は細長比を比較的小さく、部材座屈が発生しにくい部材で、ブレース材 B は、鋼橋のブレース材の細長比の平均値に近く、実構造物に近い部材と考えている。また、ブレース材 C は部材座屈が発生しやすい部材である。解析は Pushover 解析とし、ラーメン橋脚の上部の点①に X 方向(橋軸直角方向)に強制変位を与える変位制御で行った。

解析モデルの一層門型ラーメン橋脚の柱・梁部材は、幅厚比が比較的大きく、柱基部における局部座屈の発生が予想される。解析では 1)ブレース材が梁要素の場合における柱基部を梁要素とした場合とシェル要素とした場合の比較、2)ブレース材の細長比および分割数が座屈挙動に及ぼす影響、3)ブレース材の両端の結合条件の影響、4)多層ラーメン橋脚の場合等の検討を行った。なお、アーチ橋の端柱や鉛直材の対傾構を想定して、三層ラーメン橋脚についても解析対象とした。図-7 はその解析モデルであり、二層、三層部分はすべて梁要素でモデル化した。

(4) 部材の使用要素の検討

図-8 は、ラーメン橋脚の左天端①の位置における

水平荷重と水平変位の関係を示した。図中の曲線名はブレース材の種類-使用要素-柱基部要素を表す。つまり、A-BEAM-SHELL は、ブレース材は A で、柱基部がシェル要素であることを示している。3 つのブレース材を用いた結果、ブレース材 A では、柱基部の要素が梁要素かシェル要素で解析結果に差異が生じている。この差異は柱基部をシェル要素で表現した、つまり局部座屈が影響したと考えられる。しかしながら、ブレース材 B, C では大きな差がなく、基部で局部座屈が発生するよりも前に部材座屈が生じたからである。ブレース材 C の場合では、水平変位 $\delta=0.017\text{m}$ 付近で部材座屈が発生していると思われる。

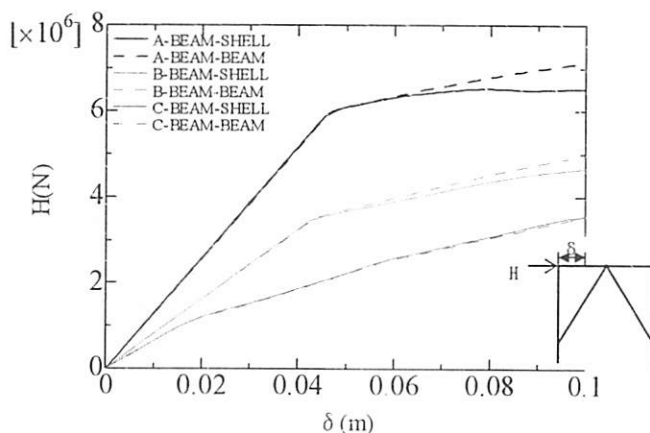


図-8 水平荷重(H)-水平変位(δ)曲線

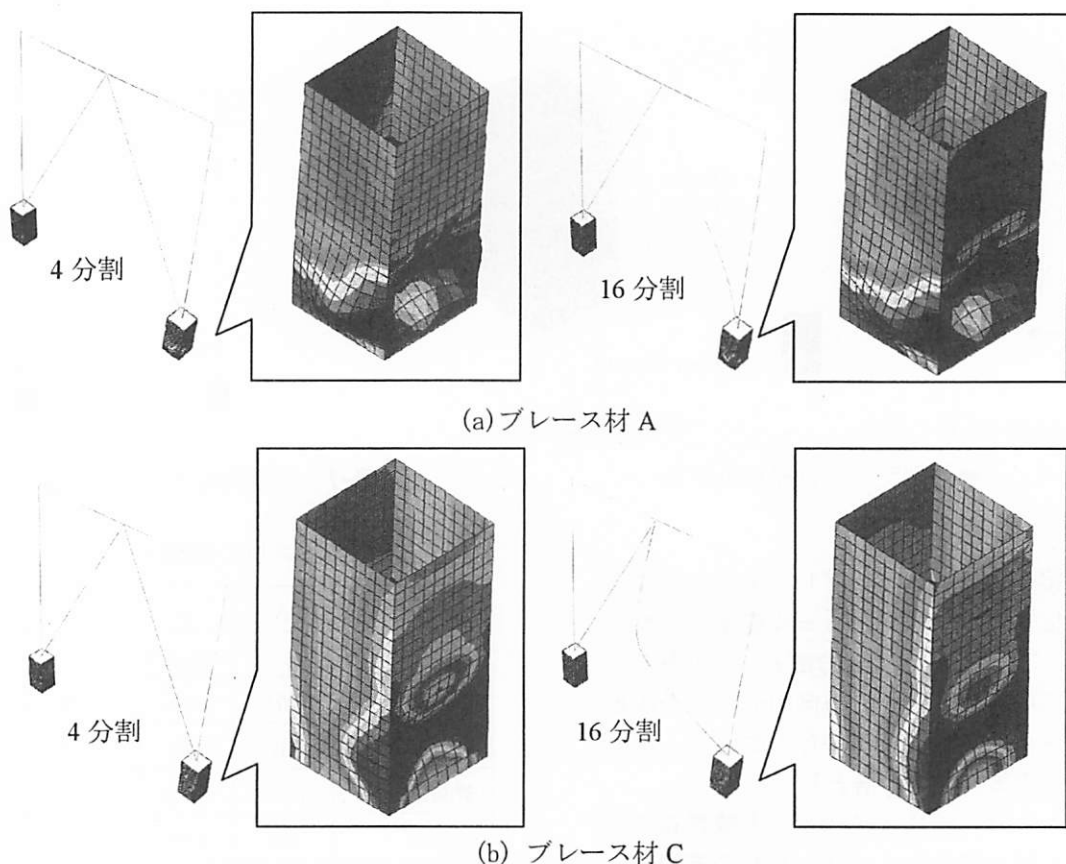


図-9 ブレース材の変形状況と柱基部の変形図 ($\delta=0.10(\text{m})$)

(5) ブレース材の分割数の違いによる影響

ブレース材 A, B, C の分割数を 2, 4, 8, 16, 32 と変化させ、分割数が変形や全体挙動に及ぼす影響を調べた。解析モデルは、柱基部がシェル要素、その他の部材は梁要素である。なお、32 分割以降はほぼ同様な結果となった。図-9 は $\delta=0.10(\text{m})$ 時でのブレース材 A, と C を 4 分割と 16 分割のラーメン橋脚のブレース材の変形状況と柱基部の変形図を示している。変形図からも分かるように、4 分割では部材座

屈は発生せず、16 分割では部材座屈の挙動の発生が見られる。つまり、部材座屈の挙動を求めるには分割数は重要であることがわかる。図-10 はブレース材の分割数を变化させた場合の柱基部近傍 (P1 部) とブレース材 (P2 部) の軸力の応答を示したものである。特に、ブレース材 C では、8 分割以上で部材座屈が発生しており、柱基部の変形はほとんど生じていないことが分かる。すなわち、部材座屈が生じにくい場合はブレース材の分割数に関わらず基部に局部座屈が発生するが、部材座屈が生じる可能性があ

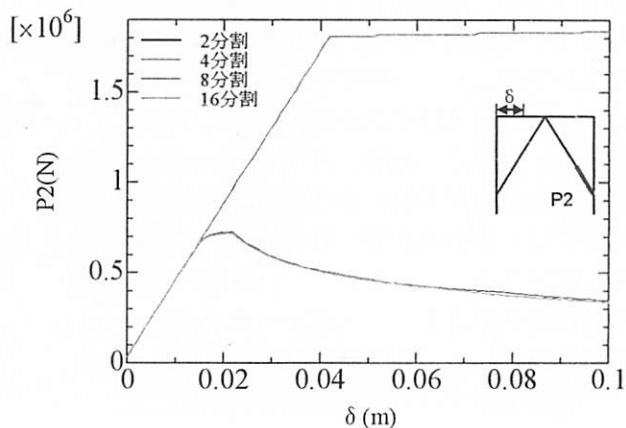
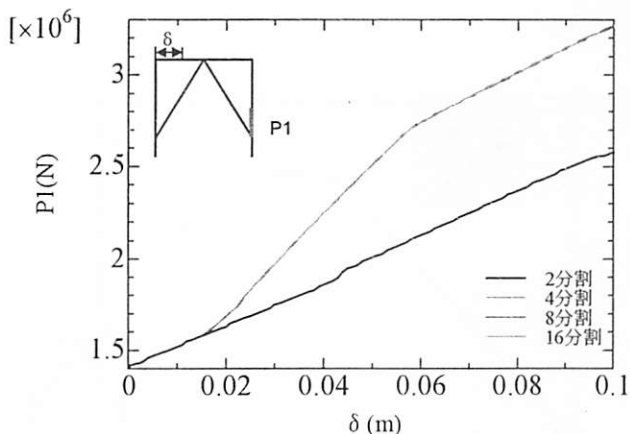


図-10 柱(P1 部)とブレース材(P2 部)の軸力の応答

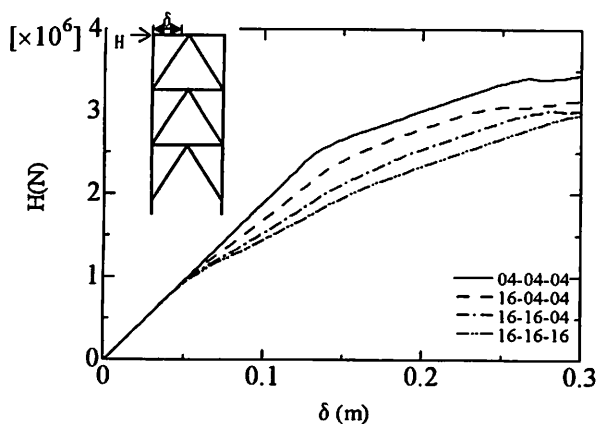


図-11 三層ラーメン橋脚モデルの
水平荷重(H)－水平変位(δ)曲線

る場合には、分割数を多くして部材座屈が詳細に表現するだけでなく、柱基部にかかる力の大きさにも影響を及ぼしていることが分かった。

(6) 三層ラーメン橋脚モデルでの検討

次に、より実構造物に近い構造物である三層ラーメン橋脚について検討を行った。モデルのブレース材細長比は 148 で、分割数を 2 分割から増加させたところ、16 分割した場合に部材座屈が発生した。そこで、一層毎にブレース材の分割数を変化させ、層毎の分割数の違いが全体系に及ぼす影響について検討した。解析ケースは、すべての階層を 4 分割した場合 Case1 (04-04-04)、16 分割の場合 Case2 (16-16-16)、最下段のみを 16 分割した場合 Case3 (16-04-04) および最上段のみを 4 分割した場合 Case4 (16-16-04) の 4 ケースとした。

図-11 は、ラーメン橋脚の上端部における水平荷重(H)－水平変位(δ)関係を示し、図-12 は $\delta=0.10(\text{m})$ 時での Case3 (16-04-04) と Case4 (16-16-04) の変形図

(a)Case3 (16-04-04)

(b)Case4 (16-16-04)

図-12 三層ラーメン橋脚モデルの変形図

を示した。図からわかるように、水平変位 $\delta=0.050\text{m}$ 付近から 16 分割したブレース材に部材座屈が発生しており、変形図からも分割数を増やした層では部材座屈を確認することができた。また、柱基部の局部座屈の挙動もブレース材の部材座屈の有無によって変化していることが分かった。しかしながら、解析結果は一層門型ラーメン橋脚の解析結果とほぼ同じ傾向となっている。

このことから、ブレース材の部材座屈と柱基部の部材座屈の連成関係を考慮するには、基部付近のモデル化に関しては、さらに検討する必要があることがわかる。なお、本モデルではブレース材や柱基部の断面形状等を同じとしており、断面内の寸法変化での結果でしか評価を行っていないことから、今後解析パラメータを検討し、ラーメン橋脚を含め、鋼構造の部材座屈と局部座屈の連成関係を考慮できる手法の検討が必要であると考えられる。

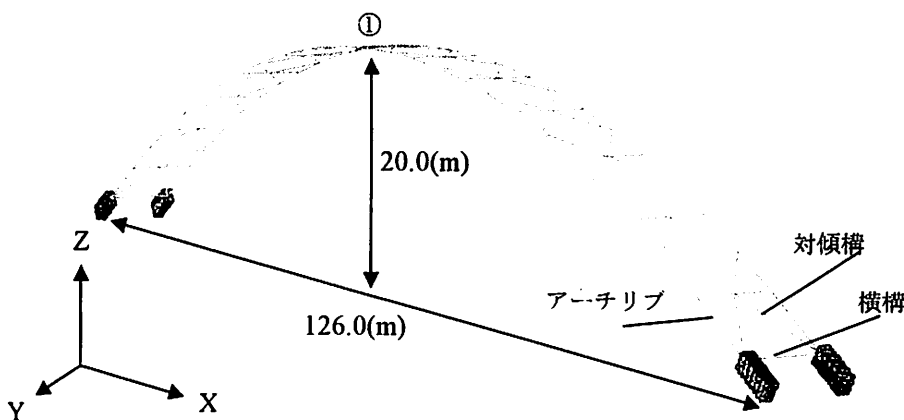


図-13 アーチ解析モデル

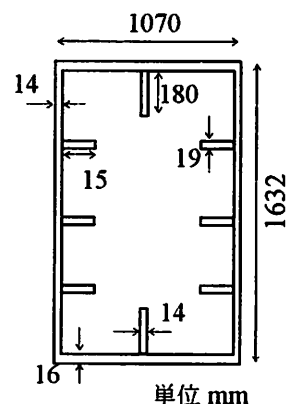


図-14 アーチリブの断面形状と諸元

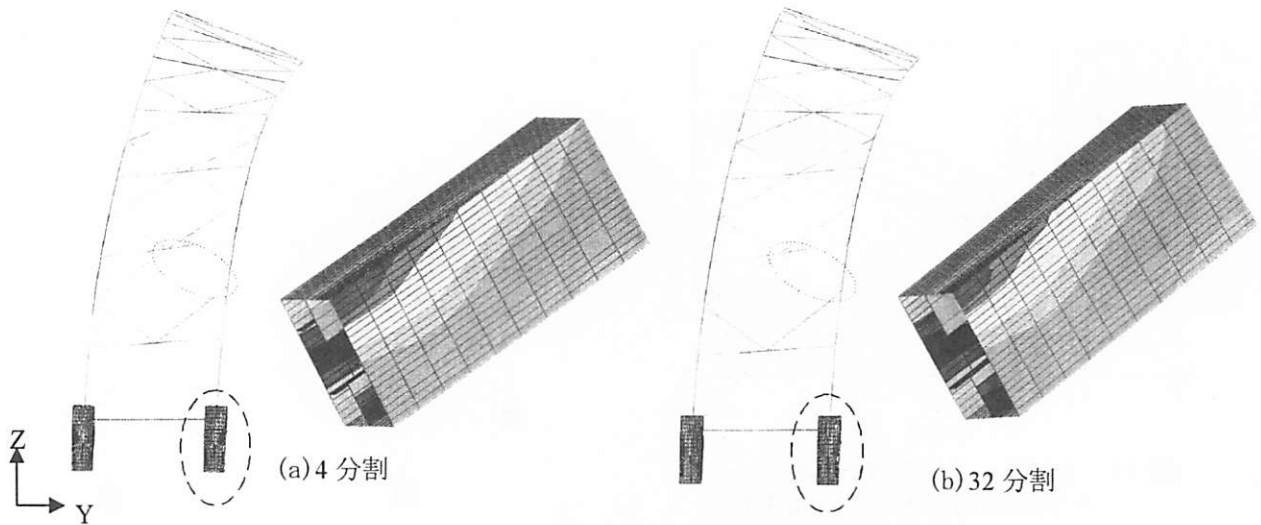


図-15 アーチリブの全体変形と基部変形状況 ($\delta=0.45\text{m}$)

3. 鋼アーチリブを用いたモデル化の検証

(1) 解析概要

これまでの固有値解析および静的解析の結果から、部材基部および対傾構のモデル化が全体系の挙動に及ぼす影響、また座屈挙動を再現するためのそれら詳細なモデル化の必要性がわかった。

これまでの結果を踏まえ、図-13 に示すような対傾構と横構を有する鋼アーチリブを解析対象として部材座屈と局部座屈の検討を試みた。鋼材は SS490 を使用し、上路式鋼アーチ橋のアーチリブを参考に決定した。材料特性はヤング率 $E=2.1 \times 10^6 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$ 、降伏応力 $\sigma_y=3200 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$ 、降伏ひずみ $\varepsilon_y=0.001524$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、単位体積重量 $\gamma=0.00786 \text{ (N/mm}^3\text{)}$ である。なお、構成板のフランジおよびウェブ幅厚比パラメータは $R_{Ff}=0.69$ 、 $R_{Fw}=0.60$ である。文献 8) の研究を参考にして、解析モデルにはアーチクラウン部の応力が降伏応力の 0.6 倍となるように等分布荷重を設定し、その等分布荷重および自重を重力加速度で除し、各点に集中質量として与えた。減衰マトリックスの算出において、Rayleigh 減衰は固有振動数 f_1, f_2 はそれぞれ 1 次および 2 次の固有振動数を選択して計算した。解析モデルのアーチ部材は、図-14 に示す補剛箱型長方形の断面形状と断面諸元である。また、基部から横構の高さまでをシェル要素とし、アーチ基部の境界条件は面内ヒンジで他は固定した。横構、対傾構は図-3 に示す I 型断面部材をすべて用いた。

静的解析では、アーチクラウン部である図-13 の点①において、橋軸直角方向(Y 軸方向)に強制変位を与える Pushover 解析とした。モデルにおけるすべて

の対傾構の分割数を 2, 4, 8, 16, 32 と変化させて、対傾構の部材座屈挙動を調べた。なお、今回は、対傾構の部材座屈に着目したため、横構の分割数はすべて 10 分割と固定し、アーチリブの部材分割数も 2 つの横構の間の範囲において 10 分割とした。解析結果を踏まえ、対傾構毎の分割数を変化させ橋梁全体の挙動を調べ、モデル化方法の検討を行った後に、動的挙動の解析を実施した。

(2) 静的解析

図-15 は、対傾構の分割数を 1, 4, 32 とした場合、水平変位 $\delta=0.45\text{m}$ におけるアーチ全体の変形図とアーチ基部付近の変形状況を示したものである。図からわかるように、図中の赤丸の位置のブレース材を比較すると、32 分割したモデルでは部材座屈が発生していることが分かる。すなわち、モデルの全体系の中でも部材座屈しやすい位置であると考えられる。また、図中の青丸(波線)の位置での基部に及ぼす対傾構の影響の比較も示すが、局部座屈の発生は見られなかったが、分割数を増やすことで基部に及ぼす影響に違いが生じていることが分かり、対傾構の部材座屈の発生による影響であると考えられる。

(3) 対傾構の分割数を変化させた場合の影響

基部付近の対傾構が全体系へ及ぼす影響を把握するため、この付近の部材分割数を増加させた。図-15 の点線の位置で早期に部材座屈が発生したことから、分割数の増加が全体系の挙動に及ぼす影響変化について検討した。そこで、図-16 の赤線で示すようにアーチの両基部付近の 2 パネルの対傾構を 32 分割とし、その他の対傾構の分割数は 4 分割とした。

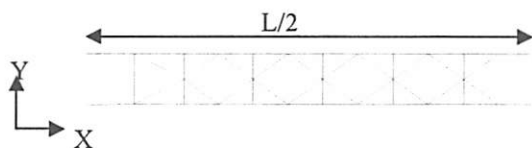


図-16 32分割した対傾構の位置(赤線)

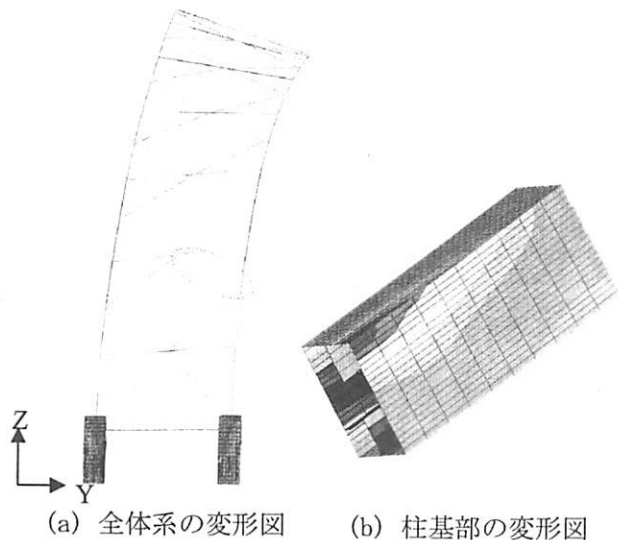


図-17 分割数による変形図の影響 ($\delta=0.45(\text{m})$)

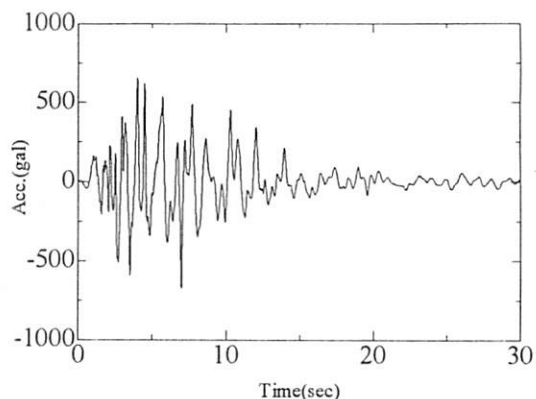


図-18 JR 西日本鷹取駅観測地震波 (JRT)

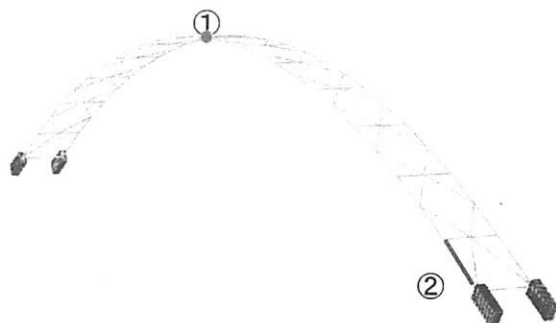
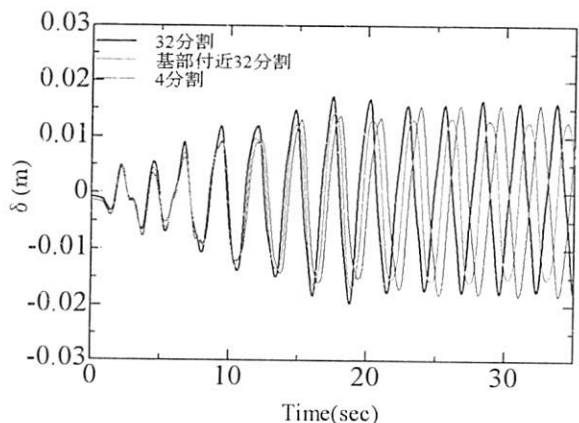


図-19 解析結果の抽出位置

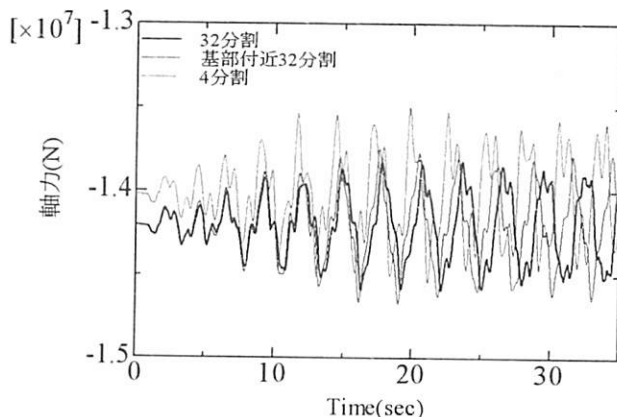
$\delta=0.45\text{m}$ 時の変形図および基部の変形図を図-17に示す。図-17(a)は、部材座屈が発生した位置を点線で示しているが、ここは前述した位置と同じである。また、図-17(b)に示す基部の変形図では、対傾構をすべて32分割した場合に近い挙動を示した。つまり、部材座屈が発生しやすい位置から基部まで間の対傾構の分割数を増やしたことで変化したと考えられる。このことから、アーチリブのような基部に大きな断面力が作用する構造の場合では、基部に近い部材はできるだけ分割数を増やし、詳細にモデル化を行えば精度が向上すると考えられる。

(4) 動的解析

静的解析の結果から基部付近に断面力が集中し、基部付近は詳細なモデル化が必要であることが判明したので、モデル化における対傾構の分割数が動的解析に及ぼす影響について調べた。解析モデルは、対傾構をすべて4分割、8分割した場合と基部付近のみ32分割した場合のモデルを作成した。入力地震波はJR西日本鷹取駅構内観測地震波(以下JRT)を使用し、橋軸直角方向に入力した場合について検討した。入力したJRT地震波の時刻歴を図-18に示した。



(a) アーチクラウン部①の変位応答



(b) アーチリブ②の軸力応答

図-20 変位と軸力の時刻歴応答

図-19 は解析結果の抽出位置で、①はアーチクラウン部で、②は基部付近のアーチリブ材である。

図-20 は抽出位置での変位および軸力の時刻歴応答を示している。なお、ブレース材の分割数はすべて4分割の時、32分割した時および基部付近のみ32分割した3ケースについて比較した。図-20(a)は、アーチクラウン部①における橋軸直角方向の応答変位の時刻歴応答を示すが、3つのモデルとも同様な応答変位が得られた。また、図-20(b)は点②のアーチリブの軸力応答を示すが、すべて4分割した場合と比較して、すべて32分割した場合および基部付近のみ32分割した場合はほぼ同じ応答結果を示した。つまり、基部付近を32分割するだけで、地震力の影響が大きい基部付近の対傾構の挙動をかなり正確に把握できたと考えられる。しかしながら、今後、橋梁の全体のモデル化も含めて、分割数の影響をパラメトリックに解析により検討する必要がある。

4. おわりに

本研究では、鋼製骨組構造の座屈の影響を適切に表現できるモデル化について試みた。門型ラーメン橋脚に対し固有値解析・静的解析によってモデル化の影響を調べ、その結果を踏まえ鋼アーチリブモデルによる解析を行った。以下に結論を列挙する。

- 1)固有値解析から、ブレース材の分割数により固有振動数や振動モードが変化する結果が得られた。固有値解析は他の解析において重要となることから、モデル化において適切な分割数を与えることが必要であると言える。
- 2)静的解析の結果から、細長比が小さな部材では、部材座屈は発生しにくく、基部に軸力が集中して局部座屈が起こった。よって、シェル要素でより細かく分割等の詳細なモデル化が必要である。また、大きな細長比を有する部材では、部材座屈が発生しやすく、ブレース材の分割数の変化により構造全体の挙動にも影響を及ぼすことが分かった。

3)一層門型ラーメン橋脚の解析結果を基にアーチリブモデルを作成した。静的解析において基部付近で部材座屈が発生したことから基部付近の部材のみ分割数増やしたモデルの結果は、すべてのブレース材を細かく分割したモデルの結果に近い結果が得られた。

4)鋼アーチリブモデルに静的解析・動的解析を実施したところ、基部付近のブレース材を32分割詳細したモデルの解析結果は、全体のブレース材を32分割したモデルの結果に近くなることが分かった。

本研究ではブレース材の分割数と基部付近の詳細なモデル化による座屈挙動への影響に主眼を置いた。今後は断面形状や強制変位方向等にも着目し、よりパラメトリックな解析を行い、座屈挙動との関係を明確にすることが望まれる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書および同解説(Ⅰ共通編Ⅴ耐震設計編),2002.
- 2) 小野寺理：鋼製ラーメン橋脚の耐震設計におけるエネルギー一定則野的要請に関する研究,宇都宮大学大学院修士論文,1998.
- 3) 伊藤雪：ファイバー梁-柱要素を用いた鋼構造物の弾塑性動的解析法の開発,熊本大学大学院修士論文,2003.
- 4) ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.10 : SIMULIA,DASSAULT SYSTEMS,2010
- 5) 土木学会：座屈設計ガイドライン,鋼構造シリーズ12,鋼構造委員会,2005.10.
- 6) 佐野泰如,小池洋平,大森邦雄：複弦アーチリブの橋軸直角方向地震時耐荷力に関する検討,土木学会論文集A, Vol.63,No.2,pp.297-311,2007.4.
- 7) 宇佐美勉,馬越一也,斉藤直也,野中哲也：鋼橋の耐震解析におけるブレース材のモデル化,構造工学論文集, Vol.56A,pp.381-392,2010.3.