

鋼骨組み構造の複合非線形解析における ブレース材のモデル化

馬越 一也¹・宇佐美 勉²・斉藤 直也³・野中 哲也⁴

¹正会員 工修，株式会社耐震解析研究所（〒466-0059名古屋市昭和区福江）

²フェロー D.Sc.名城大学教授，理工学部建設システム工学科（〒468-8502名古屋市天白区塩釜口）

³学生員 名城大学理工学研究科建設システム工学専攻修士課程（同上）

⁴正会員 博（工），株式会社耐震解析研究所（〒466-0059名古屋市昭和区福江）

1. 緒言

レベル2地震のような大地震を受ける鋼橋の応答値を算定する解析では，梁要素を用いた複合非線形動的解析（材料非線形性および幾何学的非線形性を共に考慮した動的解析）が，現在では最も実用的かつ精密な解を与える手法と考えられる^{1),2)}。また，限界値を求めるためのPushover解析においては，複合非線形静的解析（弾塑性有限変位解析）に限界ひずみを導入した方法が最も実用的な手法である^{1),2),3)}。梁要素を用いた複合非線形解析では断面変形が伴う座屈，即ち局部座屈（Local buckling）あるいは，ゆがみ座屈（Distortional buckling）の影響は考慮出来ないが，部材座屈（曲げ座屈，曲げねじれ座屈等）は部材を適切にモデル化することにより解析の中で自動的に考慮することが可能である³⁾。このような考えに基づく静荷重に対する設計法は，微小変位解析に基づき，有効座屈長の概念を導入した通常の設計法（有効座屈長法³⁾）に対し，「線形化有限変位解析に基づく設計」あるいは「弾塑性有限変位解析に基づく設計」として，国の内外^{3),4)}で広く知られている。設計時の解析においては残留応力の影響を考慮することは煩雑であるため，通常，この影響を等価な初期たわみ，あるいは初期横荷重に置き換えることが提案されている^{3),4),5)}。

複合非線形静的/動的解析の適用に当たっては，構造物の適切なモデル化^{1),2)}が重要であることは言うまでもない。複弦アーチ橋のような横構，対傾構（ブレース材と総称する）で補剛された構造においては，ブレース材の部材座屈が生ずるようにモデル化することが必須である。例えば，ブレース材を両

端ピンの初期不整のない部材としてモデル化すると，分岐座屈解析を実施しない限り部材座屈現象は考慮出来ず，トラス要素と同じ挙動を示すこととなる。すなわち，当初真っ直ぐであったブレース材は構造物全体の変形が進展しても真っ直ぐの状態にとどまることになる。部材座屈による部材の曲げ変形等を表現するためには，ブレース材に適切な量の幾何学的な初期不整を与える必要があり，例えば初期たわみ，あるいは初期横荷重等の導入が考えられる^{5),6)}。一方，ブレース材と主構造の結合を剛結とし梁要素を用いて解析すれば，端部の2次応力を発生させる曲げモーメント（2次曲げモーメントと称する）の影響で初期不整を与えたと同じ効果が得られ，初期不整を考えなくても曲げ座屈現象を追跡出来る^{1),2),3),6)}。

本研究は鋼骨組み構造の複合非線形静的/動的解析におけるブレース材のモデル化に関する研究の基礎として，最も単純なブレース材付き1層および3層門型ラーメン（図-1）の繰返し弾塑性有限変位解析を実施し，ブレース材端部のモデル化，初期不整の与え方および大きさが解析結果に及ぼす影響について考察を行い，最も適切なモデル化を提案する。本論文では，ラーメン構造の面内挙動のみを対象とし，ブレース材と主構造の結合は偏心がないものとする。また，ガセットの影響は考えないものとする。

2. 対象構造物および解析モデル

解析対象構造は，図-1および表-1に示す1層および3層の正方形箱形断面門型ラーメンで，柱頂部には，柱の全断面降伏軸力 N_y の20%の一定鉛直荷重 P

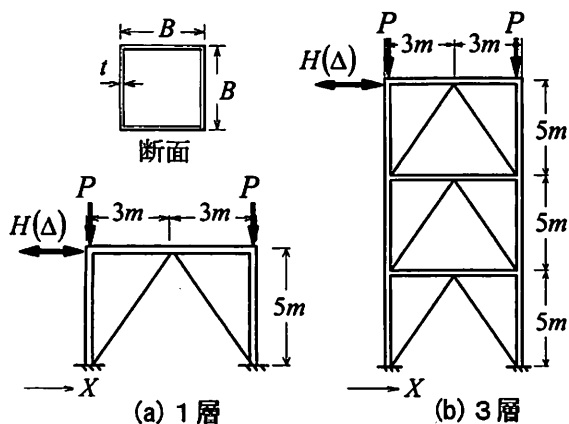


図-1 ブレース材付き門型ラーメン

表-1 断面諸量

		フレーム部材 (柱)		フレーム部材 (梁)		ブレースA	ブレースB
部材長	L	m	5.000	6.000	5.831	5.831	
幅	B	m	0.500	0.500	0.300	0.150	
板厚	t	m	0.020	0.020	0.010	0.010	
断面積	A	m ²	0.0384	0.0384	0.0116	0.0056	
断面2次モーメント	I	m ⁴	1.48E-03	1.48E-03	1.63E-04	1.84E-05	
断面2次半径	r	m	0.1961	0.1961	0.1185	0.0573	
細長比	L/r	-	25	31	49	102	
材質	-	-	SM490	SM490	SM490	SM490	
降伏応力度	f_y	kN/m ²	3.15E+05	3.15E+05	3.15E+05	3.15E+05	
弾性係数	E	kN/m ²	2.00E+08	2.00E+08	2.00E+08	2.00E+08	
せん断弾性係数	G	kN/m ²	7.69E+07	7.69E+07	7.69E+07	7.69E+07	
全断面降伏軸力	N_y	kN	12096	12096	3654	1764	
有効せん断係数	k	kN/m ²	0.44	0.44	0.44	0.44	
細長比パラメータ	$\bar{\lambda}$	-	0.322	0.386	0.622	1.286	
オイラーの座屈荷重	P_E	kN	116629	80992	9451	1067	
ファイバー要素の積分点	-	-	25x25	25x25	29x29	15x15	
鉛直荷重	P	kN	2419.2	-	-	-	

が載荷され、構造物頂部の梁には、繰返し水平荷重 H が作用している。門形ラーメンに配置したブレース材は2種類を考え、ブレースAは細長比 $L_b/r_b=49$ (L_b =ブレース材長、 r_b =ブレース材の断面2次半径)、ブレースBは $L_b/r_b=102$ である。この構造に対するブレース材の解析モデルとして、図-2に示す端部条件および初期不整の与え方を変えた6種類を考える。すなわち、ピン-初期不整なし(P)、剛結-初期不整なし(R)、ピン-初期たわみあり(P-ID)、剛結-初期たわみあり(R-ID)、ピン-初期横荷重あり(P-IL)、剛結-初期横荷重(R-IL)である。ここで、初期横荷重は載荷履歴の間一定としている。以降、解析モデルはかっこ内の略号で示す。初期たわみは、最大値が $L_b/1000$ の半波の正弦曲線、初期横荷重はブレース材軸に直角に作用する等分布荷重とし、その大きさはブレース材を単純はりとした時の中央のたわみが $L_b/1000$ に等しくなるように定めた。なお、フレーム

		端部の結合条件	
		ピン	剛結
初期不整の与え方	なし		
	初期たわみあり		
	初期横荷重あり		

図-2 解析モデル (1層ラーメン)

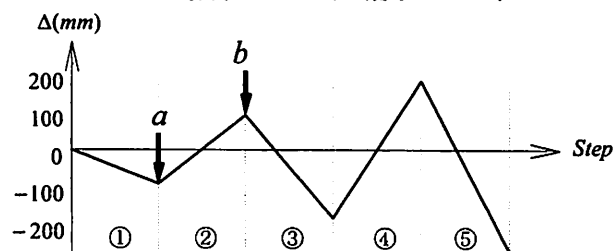


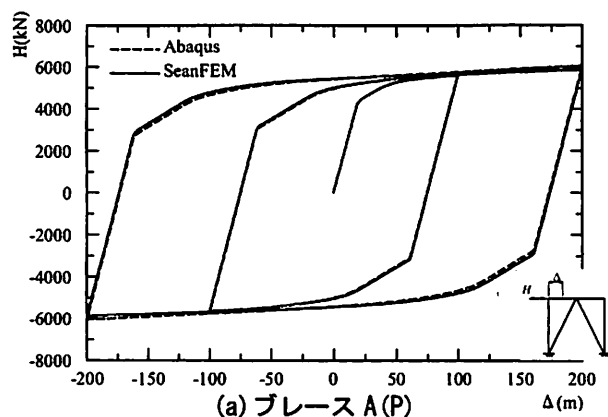
図-3 載荷パターン

の初期不整は、曲げ変形が卓越し、変形に及ぼす影響が小さいため考えないものとする。柱上端の梁に載荷した繰返し水平荷重は、作用点の強制水平変位 Δ を与えてその反力として算定した。水平変位 Δ は、図-3に示すように、 $0 \rightarrow -100\text{mm} \rightarrow +100\text{mm} \rightarrow -200\text{mm} \rightarrow +200\text{mm} \rightarrow -300\text{mm} \dots$ (+符号は図-1(a)(b)内のXの正方向) で与えるものとする。

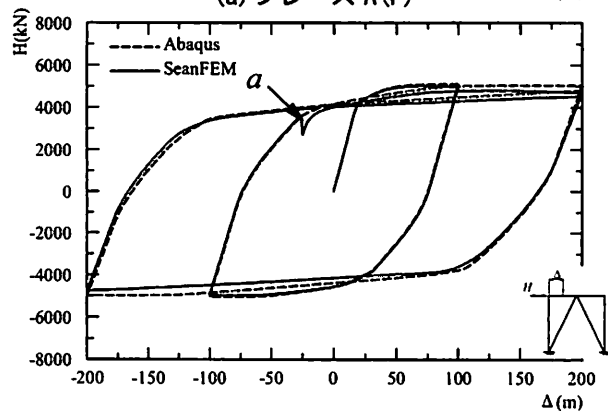
3. 使用した解析ソフト、要素および構成則

非線形解析、とりわけ複合非線形解析では解析ソフト/モデル化等による結果のばらつきが大きいため、2種類以上の解析ソフトによる結果の相互比較が望ましい¹⁾²⁾。そのため、本論文では解析ソフトとして、Abaqus (ver. 6.7)⁷⁾ および SeanFEM(ver. 1.22)⁸⁾ の2種類を用いることとした。

梁、柱、ブレース材は共に10分割し、せん断変形を考慮したTimoshenko梁要素を用い、変位増分法による複合非線形解析を実施した。AbaqusはB21要素、SeanFEMはファイバー要素を用いた。いずれも梁要素を用いた定式化を行っているが、Abaqusは有眼ひずみで有限回転の影響が考慮出来る。そのため、真応力-真ひずみ (対数ひずみ) を用いている。一方、



(a) ブレース A (P)



(b) ブレース A (R-ID)

図-4 Abaqus と SeanFEM の結果比較

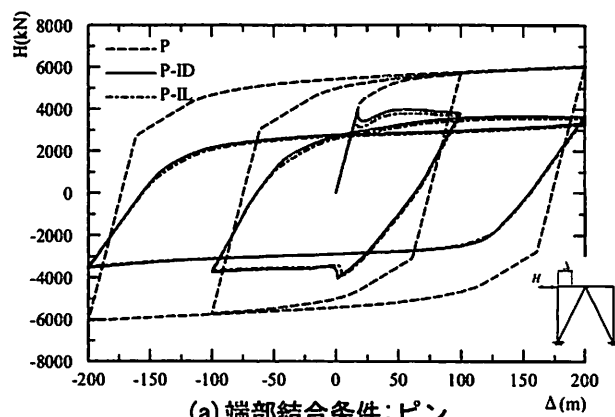
SeanFEMでは、いわゆる近似更新ラグランジュ法 (AULD: Approximate updated Lagrangian description)^{9),10)}に基づく定式化を行っており、更新された移動座標軸で測った部材のたわみは、次のステップでの計算のための初期たわみとして考慮されている。但し、ひずみは、通常の梁要素を用いた有限変位解析と同様に、微小とし、回転のみ有限としている。

構成則はバイリニア型の移動硬化則^{2),3)}を用い、2次勾配は $E/100$ (E =弾性係数)とした。Abaqusでの構成則は真応力-真ひずみで入力する必要があるため、バイリニア型の移動硬化則を公称応力-公称ひずみ関係と見なし、それを真応力-真ひずみ関係に変換した。そのため真応力-真ひずみ関係の第2勾配はもはや一定ではなくなるが、10%の塑性真ひずみと塑性ひずみ零点を結んだ直線を基に2次勾配を設定している。SeanFEMはテーブル形式で公称応力と公称ひずみを与えることでバイリニアを設定している。

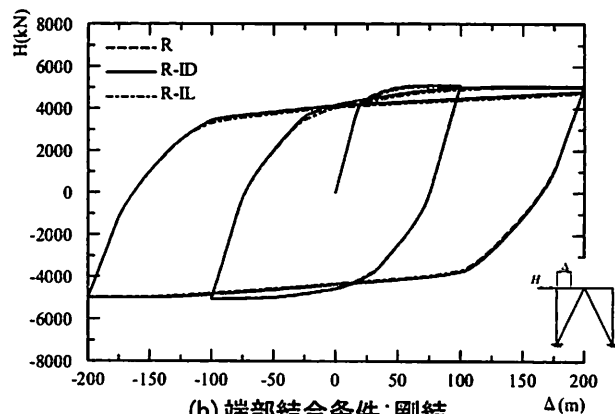
4. 解析結果と考察

(1) 解析ソフトの違いによる結果の比較

すべてのケースについてAbaqus, SeanFEMで解析を行い、結果の比較を行った。結果の一例を図-4に



(a) 端部結合条件: ピン



(b) 端部結合条件: 剛結

図-5 H-Δ曲線 (1層, ブレース A)

示す。これらの図のように、2つの解析ソフトの結果はほとんど一致しているが、図-4(b)の点aのように収束が困難であった箇所については多少の差が現れている。但し、少なくとも最大耐力力や部材座屈後の挙動などの重要な点で2つの解析ソフト間に大きな相違はなかった。なおAbaqusとSeanFEMの結果はほぼ一致しているが、有限ひずみと微小ひずみ理論の違いから、断面の減少を無視できない更に大きな非線形領域では差が出てくる可能性がある。しかし、ひずみが10%程度では有限ひずみと微小ひずみ理論の応力差は2%程度であるため、双方の違いは一般の鋼橋のレベル2地震時では問題にならない範囲と考えられる。

以降の記述については特に断らない限りAbaqusの結果を用いている。

(2) 初期不整の与え方の違いによる結果比較

図-5に、1層ラーメン (ブレースA設置) でのブレースの端部結合をピン、あるいは剛結としたときの水平荷重 H -水平変位 Δ の履歴曲線を示す。それぞれの図では、初期不整なし(P, R), 初期たわみあり(P-ID, R-ID), 初期横荷重あり(P-IL, R-IL)の結果が示されている。ブレース材端部の結合条件がピンの場合 (図-5(a)), (P)はブレース材の座屈を考慮出来ないため荷重が一番高いが、(P-ID), (P-IL)はほ

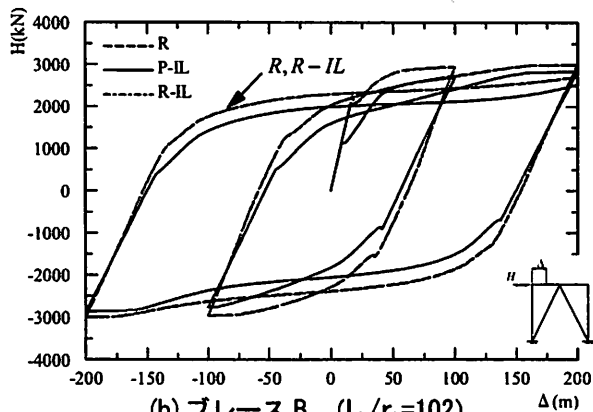
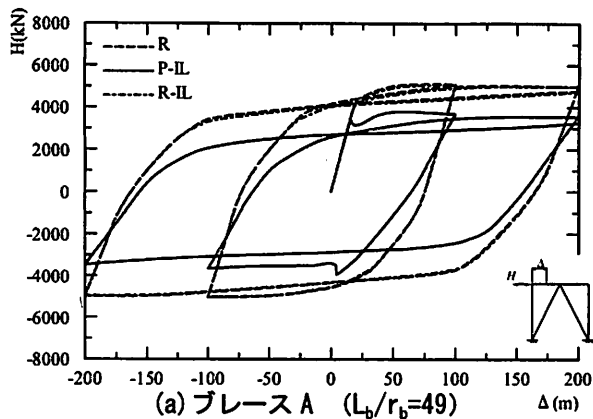


図-6 H-Δ曲線（1層ラーメン）

ば同じ履歴を描いていることがわかる。但し、後述のように解の収束性は、(P-IL)のほうが(P-ID)より良い。一方、ブレース材端部の結合条件が剛結の場合（図-5(b)）、初期不整の有無で変化はなく、履歴曲線はほぼ同じである。すなわち、緒言でも述べたように、ブレース材端部を剛結とすれば、2次モーメントの影響で初期不整を与えたことと同様の効果が得られることが実証出来た。なお、ブレース断面が小さいブレースBでも図-5(a)(b)とほぼ同様の結果が得られている。まとめると、耐荷力に関しては、(P)が一番大きく、(P-ID)≒(P-IL)、(R)≒(R-ID)≒(R-IL)といった傾向が見られる。

(3) ブレース材の剛性の違いによる結果の比較

ブレース材の剛性の影響を検討するため、ブレースA ($L_b/r_b=49$) およびブレースB ($L_b/r_b=102$) を取り付けた一層ラーメンの(R)、(P-IL)、(R-IL)の解析結果の比較を、図-6(a)、(b)に示す。ブレースAでは(P-IL)が一番強度が小さく、剛結(R、R-IL)の内側のループを描いている。一方、ブレースBではP-ILと剛結の差は小さくなっていることがわかる。これは、ブレースAと比較して、よりスレンダーなブレースBでは、ブレース材端部剛結の結合条件が、ラーメン全体の強度に与える貢献度が小さくなり、ピンの特性に近づいたためと考えられる。一般の鋼橋

の対傾構、横構等のブレース材の細長比はブレース材Bの細長比に近いので、結合条件が耐力や部材座屈による耐力の低下に及ぼす影響は少ないと考えられる。

(4) 解の収束性の検討

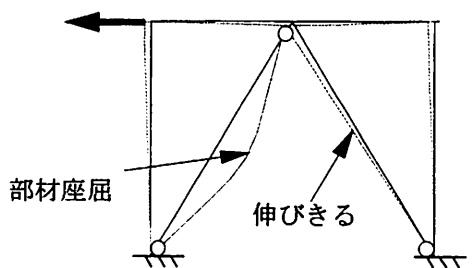
材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した複合非線形解析であるため、繰り返し収束計算が発生するが、計算の刻み幅によっては解が発散したり、目的の部材耐力を捉える事ができないことがある。一般的な傾向として、材料非線形が卓越する場合は比較的収束し易く、部材座屈のような幾何学的非線形の影響が大きい場合には収束が困難となる場合がある。この場合、刻み幅を非常に小さく採っても収束解が得られなかったり、逆に大きく採ることで部材座屈の現象が得られることがある。本論文では収束誤差が小さく、変形図の確認やブレース材の軸方向荷重P—軸方向変位 δ 曲線が滑らかな曲線が得られているケースについて結果を示している。つまり、安定した解が得られるかどうかを、収束性の観点より判断しており、試行錯誤的に刻み幅を決定している。

本検討モデルで収束し易さは、(P) > (P-IL) ≒ (R-IL) > (P-ID) ≒ (R-ID) > (R)であった。これは以下に述べるのが要因と考えられる。

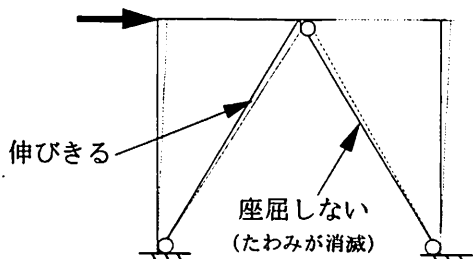
- 1) (P)は部材座屈しないため、材料非線形性の影響が卓越するので収束性は最も優れる。
- 2) (R)は端部の2次モーメントのみが初期不整の役割をするため収束性が一番悪い。
- 3) (P-ID)、(R-ID)は座標によって初期たわみが与えられており、水平荷重が反転する時に、ブレース材のたわみが消滅してしまうため、部材座屈を捉えることが困難になり、収束は困難となる場合がある。これについては後述する。
- 4) (P-IL)、(R-IL)は横荷重によってブレース材に初期不整を与えているため、繰返し水平荷重を載荷したとき常にブレース材に直角に荷重が載荷されていることが、比較的部材座屈を捉えやすくなっている。

解析ソフトの収束計算方法やアップデート法によっては同じ解析であっても解析ソフト間で結果が異なることがある。使用した解析ソフトのAbaqusは力の釣合いによって収束判定をしているのに対し、SeanFEMではエネルギーの釣合いによって収束判定をしている違いがあるため、同じ刻み幅でも解が異なるケースがあった。

本検討で一番細かい刻み幅は(P-ID)、(R-ID)の



(a) 右から左へ载荷 (図-3 点 a)



(b) 左から右へ载荷 (図-3 点 b)

図-7 変形図 (P-ID, ブレース B, ABAQUS)

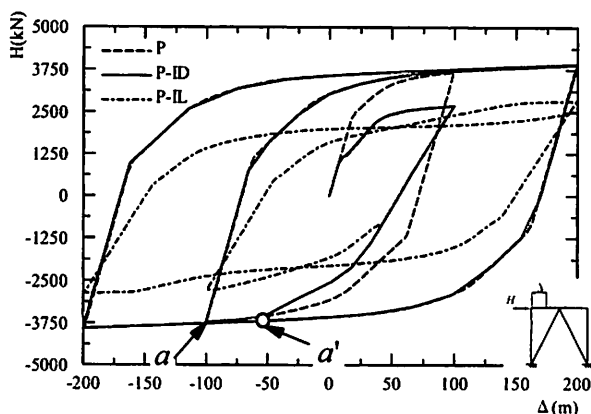
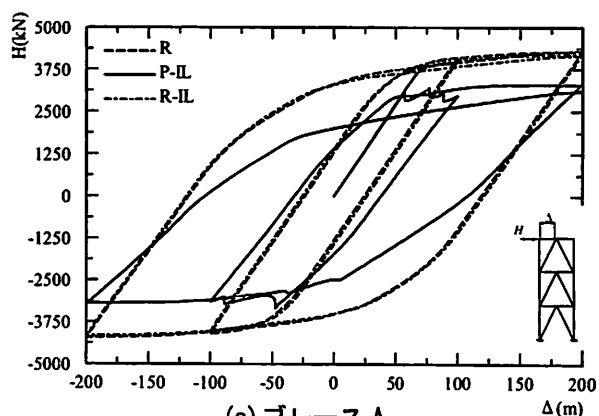
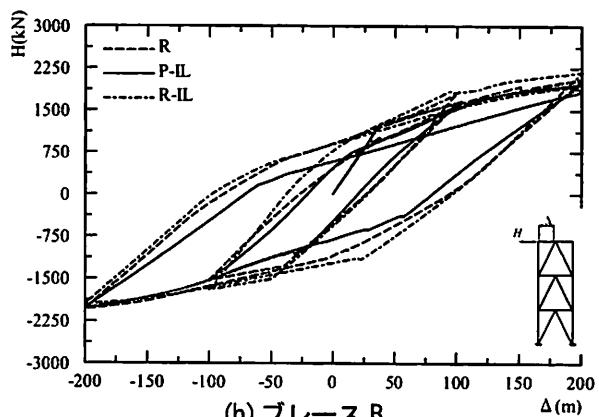


図-8 H-Δ曲線 (Abaqus, 刻み幅自動)

0.1mm (図-3②の範囲) であった。このとき収束が困難となったのは、図-3の点aで、図-7(a)に示すように左側ブレース材が部材座屈をして、右側ブレース材が伸びきり、たわみがなくなった状態から、逆方向へ载荷してたわみがなくなった右側ブレース材が部材座屈を起こす状態のときである。Abaqusでは刻み幅を自動(Auto)とした場合でブレース材端部ピン(P, P-ID, P-IL)の解析を行ったところ、(P-ID)は図-7(b)の状態でたわみがなくなった右側ブレース材が再度部材座屈をすることはなく、その後は(P)と同じ挙動となった(図-8)。これは、図-8の点a'で右側ブレースの部材座屈の部分で収束が困難となり、自動で刻み幅が大きく採られた結果、部材座屈の現象を捉える事ができなかったと考えられる。このことはAbaqusが各ステップの収束状況が保存されるファイルに警告(Warning)が出力されていたことから判断できた。現象としては繰り返し水平荷重を载荷する



(a) ブレース A



(b) ブレース B

図-9 3層ラーメンのH-Δ曲線

ことによって、伸びきったブレース材のたわみが消滅したといえる。これに対し、(P-IL)は再荷後にたわみが消滅することではなく、左右のブレース材の部材座屈を捉えることはできた。また、SeanFEMはAbaqusの自動刻み幅のオプションはないため、この(P-ID)のたわみが消滅する現象はなかった。

このように複合非線形解析の場合、使用する解析ソフトの特徴や性質を把握し、適切な刻み幅、収束のための各種パラメータを設定することが必要である。

(5) 1層ラーメンと3層ラーメンの結果の比較

複弦アーチ橋のような横構、対傾構を対象としているため、1層ラーメンよりも更に近い構造である3層ラーメンについて検討を行った。3層ラーメンでは、中段に位置するブレース材が最初に座屈を起こして、次に下段、上段の順に部材座屈した。いずれも最初の载荷ステップ(図-3①の範囲)で降伏、部材座屈が発生した。

図-9に3層ラーメンのH-Δ曲線を示す。1層ラーメンの結果(図-6)と比較すると、耐荷力の差はあるものの、相対的な大小関係($R \approx R-IL > P-IL$)は同じであることがわかる。また、ブレースBの(R), (R-IL)の履歴はブレースAと比較して(P-IL)に近くな

表-2 ブレース材の最適なモデル化

端部の結合条件	ピン			剛結		
検討モデル	P	P-ID	P-IL	R	R-ID	R-IL
部材座屈を考慮できる	×	○	○	○	○	○
安定した解が得られる	○	△	○	×	△	○
総評	×	△	○	△	△	○

○:可, ×:不可, △:場合によっては不可.

っていることも1層ラーメンと同じ傾向である. また, 収束性では1層ラーメンと比較して, 3層ラーメンではブレース材が増えるため, 部材座屈箇所が増加し, 試行錯誤的に決めていた刻み幅の予測が非常に困難となる場合がある.

(6) ブレース材の最適解析モデルの提案

以上述べた考察より, 「部材座屈が自動的に考慮できる(信頼性)」, 「安定した解が得られる(収束性)」という観点より解析モデルを評価すると表-2のようになる. これにより, 複合非線形解析に対して推奨されるブレース材のモデル化は(P-IL), (R-IL)となる. (P)は部材座屈が考慮できないため使用すべきではない. 一般的に複弦アーチ橋の対傾構や横構の細長比 L_b/r_b は100~130であるため, 図-6(b)に示したように, ブレース材端部結合条件のピンと剛結では, 履歴曲線に与える影響は小さく, (P-IL), (R-IL)は共に適切なモデル化として適用できよう. なお, 幾何学非線形性によって部材座屈を評価する場合は座屈モードを表現できるように1本のブレース材を多分割(本検討のブレース材は10分割)することは前提条件となる.

5. 適切な初期横荷重の大きさ

先述のように, ブレース材の適切な解析モデルは(P-IL), (R-IL)であったが, それでは初期横荷重はどの程度の大きさのものを考えれば適切かを考察してみる. 前章の検討では, 初期横荷重は $L_b/1000$ の初期たわみを与えるような等分布荷重を算定したが, ここでは, 道路橋示方書¹¹⁾(以下, 道示と略記する)あるいはEurocode⁴⁾(以下, ECCS)で規定される柱の耐力力曲線³⁴⁾(図-10で, ECCSは箱形断面に対応する)を基準にして等価な初期横荷重を算出する. すなわち, 一定等分布横荷重のもとで単調増大軸圧縮力を受ける両端単純支持の柱の耐力力曲線を算定し, それが道示あるいはECCSの柱の耐力力曲線と等しくなるような横荷重を初期不整としての分布横荷重とする. これは, 残留応力と初期たわみが柱の耐力力に及ぼす影響を等価な分布横荷重に置き換えるこ

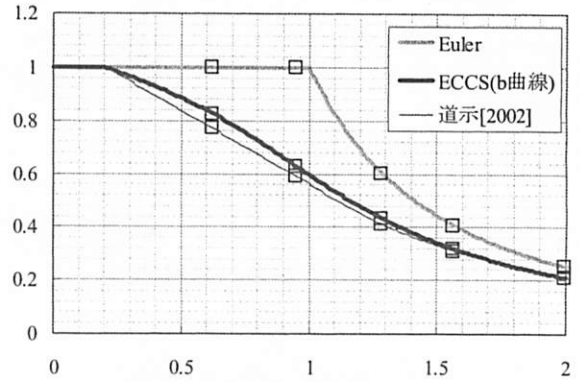
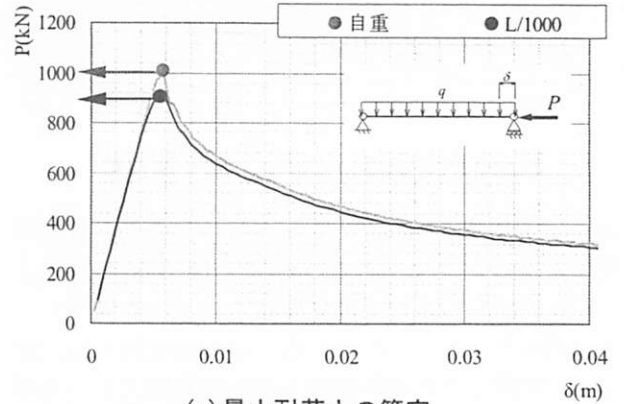


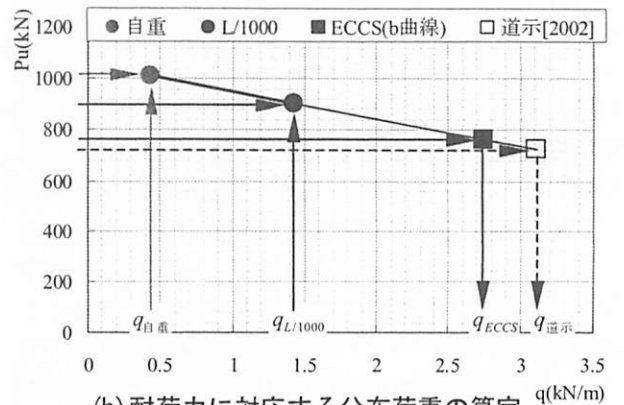
図-10 柱の耐力力曲線の比較

表-3 検討モデル

ケース名			1	2	3	4	5
フランジ幅	B	m	0.300	0.200	0.150	0.125	0.100
板厚	t	m	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
細長比	L_b/r_b	-	49.2	75.1	101.8	123.7	157.7
細長比 パラメータ	$\bar{\lambda}$	-	0.62	0.95	1.29	1.56	1.99
自重	$q_{自重}$	kN/m	0.893	0.585	0.431	0.354	0.277
自重による たわみ	δ_0	m	0.0004	0.0010	0.0018	0.0026	0.0042
初期たわみと 与える重量	$q_{L/1000}$	kN/m	12.61	3.55	1.42	0.79	0.38
初期たわみ (L/1000)	δ_0'	m	0.0058	0.0058	0.0058	0.0058	0.0058
ECCS(b) 耐力力	σ_u/σ_y	-	0.83	0.63	0.43	0.32	0.21
	P_u	kN	3020	1510	766	464	239
道示[2002] 耐力力	σ_u/σ_y	-	0.77	0.59	0.41	0.31	0.21
	P_u	kN	2814	1418	727	451	239



(a) 最大耐力力の算定



(b) 耐力力に対応する分布荷重の算定

図-11 等価初期荷重の設定

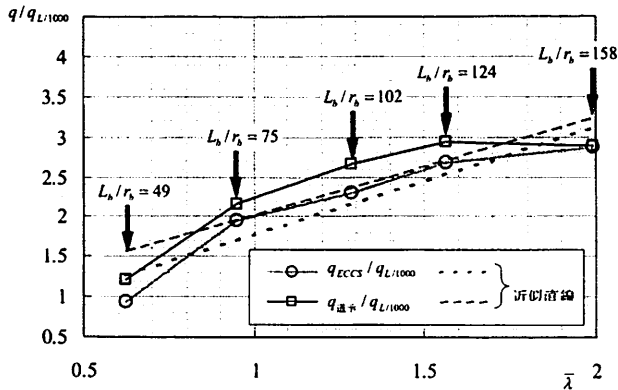


図-12 等価初期荷重の算出

と意味する。算出方法は、ブレース材を表-3に示すとおり $L_b/r_b=49, 75, 102, 124, 158$ と変化させた5ケースを用いて、以下の手順により行った。

- ① 断面積と単位体積重量(77kN/m^3)の積から算定した自重に対する等分布荷重(表-3の $q_{\text{自重}}$)、および初期たわみ $L_b/1000$ と等価な分布荷重(表-3の $q_{L/1000}$) を初期横荷重として柱の耐力(最大強度)を算出する。例として $L_b/r_b=102$ について図-11(a)に軸圧縮力 P —軸変位 δ 曲線を示す。
- ② 横軸に初期不整として与えた分布荷重、縦軸に耐力を採り、①で得られた2点をプロットする(図-11(b))。2点を結ぶ直線上に、図-10から得られる道示とECCSの柱の耐力(表-3の P_u) に対応する分布荷重($q_{\text{道示}}$ あるいは q_{ECCS} : 第一近似) をそれぞれ求める。
- ③ 更に、 $q_{\text{道示}}$ あるいは q_{ECCS} を初期荷重として、柱の耐力を算出し、道示とECCSそれぞれの柱の耐力の5%以内となるように、図-11(b)で耐力が近似するような分布荷重を再設定し耐力を算出する繰返し解析を行う。
- ④ 上記①~③をすべてのケースについて実施し、横軸に細長比パラメータ $\bar{\lambda} = (L_b/r_b)(1/\pi)\sqrt{\sigma_y/E}$ 、縦軸に $q_{\text{道示}}/q_{L/1000}$ あるいは $q_{\text{ECCS}}/q_{L/1000}$ を採りプロットする(図-12)。これから $q_{\text{道示}}$ あるいは q_{ECCS} に対する近似直線を最小2乗法によって求めると次のようになる(図-12内の直線)。

$$q_{\text{道示}}/q_{L/1000} = 1.2\bar{\lambda} + 0.8 \quad (1)$$

$$q_{\text{ECCS}}/q_{L/1000} = 1.4\bar{\lambda} + 0.4 \quad (2)$$

また、 $q_{\text{自重}}$ との比で表すと次のようになる。

$$q_{\text{道示}}/q_{\text{自重}} = -9.7\bar{\lambda} + 22.3 \quad (3)$$

$$q_{\text{ECCS}}/q_{\text{自重}} = -7.2\bar{\lambda} + 17.8 \quad (4)$$

ここで、式(1)~(4)はSM490材に対して算定されたものであるが、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の中に材料定数も含まれるため他の鋼材についても使用出来る。

ECCS⁴⁾では、緒言で述べた「線形化有限変位解析に基づく方法」と等価な「P— Δ 法」を適用する場合に与える初期たわみは、残留応力と初期たわみを同時に考慮して耐力を求めるときの初期たわみの2倍としている。これは例えば式(2)で $q_{\text{ECCS}}/q_{L/1000} = 2.0$ と置いたことになり、図-12よりほぼ妥当な値であることが分かる。ちなみに③の過程で、多くとも2回の分布荷重の再設定で道示とECCSそれぞれの柱の耐力の5%以内となり、最大でも2%以下の誤差であったことから、精度的にも確認がとれている。

地震応答解析を実施する場合には、自重の影響は必ず考慮されるので、実用的には、例えば式(3)で等価な初期横荷重を算定するのがよいと思われる。

6. 結言

本論文では、鋼橋の耐震解析(複合非線形静的/動的解析)を実施する場合に重要となる対傾構、横構などのブレース材の適切な解析モデルを求めるために、繰返し弾塑性有限変位解析を2つの商用ソフト(AbaqusおよびSeanFEM)を用いて実施し、ブレース材と主構造の結合条件(ピンあるいは剛結)、初期不整の与え方(初期たわみ、あるいは初期横荷重)と大きさ等の違いによる構造物の挙動の相違を検討した。対象構造物は、1層および3層のブレース材付きラーメン構造(図-1)であり、解析モデルは図-2に示す6種類を考えた。また、ブレース材は2種類の異なる細長比(ブレース材A: $L_b/r_b=49$ 、ブレース材B: $L_b/r_b=102$)を考えた。研究により得られた結論を列挙する。

- 1) 2つの解析ソフトは、ほぼ同じような結果を与えた。
- 2) Abaqusに用意されている増分変位の自動刻み幅調整機能を用いると、曲げ座屈が生ずる点をスキップしてしまう恐れがあるため、固定刻み幅を使うのがよい。
- 3) 「曲げ座屈が考慮出来る(信頼性)」および「安定した解が得られる(収束性)」の両基準から選定した、最も適切な解析モデルは、ピン—初期横荷重あり(P-IL)もしくは、剛結—初期横荷重あり(R-IL)である。
- 4) ブレース材を両端ピンとして初期不整を考慮しないモデル(P)は部材座屈を考慮出来ないため使うべきでない。
- 5) ブレース材に初期たわみを与えるモデル(P-

ID), (R-ID)は、時として収束性に問題が生ずる場合がある。これは、ブレース材が引張りを受けるとたわみが消滅してしまい、荷重反転時に部材座屈を捉えられなくなるからである。

- 6) (R-IL)は(P-IL)に比べ一般に高い荷重を与えるが、ブレース材の細長比 L_b/r_b が大きくなれば差は小さくなり、実用的な範囲($L_b/r_b > 100$)では両者の差はほとんど無くなる。
- 7) 3層ラーメンでも1層ラーメンと同様な傾向を示した。但し、ブレース材が塑性化する順序、部材座屈に至る経緯が1層ラーメンと比べて複雑となり、収束が困難となる場合がある。
- 8) 道示¹¹⁾あるいはECCS³⁾の柱の耐荷力曲線と同じ耐荷力を与える初期横荷重の算定式(1)~(4)を求め、これを(P-ID)あるいは(R-ID)で解析する場合の初期横荷重として使用することを提案した。
- 9) ブレース材の1本1本に対しての初期横荷重を設定することは非常に煩わしく考えられるが、耐震解析では自重の影響(死荷重)を考慮することは普通であるため、例えば式(3)を用いて死荷重を係数倍して初期横荷重を与えることが考えられる。

本論文では、動的解析については触れられていないが、ブレース材のモデル化が振動特性に与える影響や動的応答に与える影響についてなどに関して検討を進めて行くつもりである。

7. 謝辞：本研究は、平成19年度文部科学省私学助成ハイテクリサーチセンター整備事業で名城大学に設置された「高度制震実験・解析研究センター」の研究課題の一つである「高機能制震ダンパーの開発

と鋼橋の耐震補強への適用」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 宇佐美勉編著：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，日本鋼構造協会，技報堂出版，2006。
- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書―耐震設計編，丸善，2008。
- 3) 土木学会：座屈設計ガイドライン，改訂第2版，丸善，2005。
- 4) ECCS: Essentials of Eurocode 3 Design Manual for Steel Structures in Building, 1991.
- 5) 織田博孝，宇佐美勉：弾性2次解析による変断面骨組みの設計法，土木学会論文集，No.489/I-27，pp.129-138，1994.4。
- 6) 宇佐美勉，馬越一也，吉野廣一，野中哲也：複合非線形動的解析におけるブレース材のモデル化について，土木学会第63回（平成20年度）年次学術講演会講演概要集，2008.9。
- 7) Abaqus Analysis User's Manual Version 6.7: SIMULIA, DASSAULT SYSTEMS, 2007.
- 8) SeanFEM ver.1.22: 理論マニュアルと検証，(株)耐震解析研究所，2007.11。
- 9) Jetteur, Ph., Cescotto, S., de Ville de Goyet, V. and Frey, F.: Improved nonlinear finite elements for oriented bodies using an extension of Marguerre's theory, Computers and Structures, Vol. 17 (1), pp.129-137, 1983.
- 10) Mamagani, Iraj H.P., Usami, T. and Mizuno, E.: Inelastic large deflection analysis of structural steel members under cyclic loading, Engineering Structures, Vol.18, No.9, pp.659-668, 1996.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ，鋼橋編，丸善，1996。