

繰返し荷重を受ける鋼トラス構造の進行性破壊実験

斉藤 直也¹・宇佐美 勉²・野中 哲也³・廣住 教士⁴・菅付 紘一⁴

¹学生会員 名城大学大学院理工学研究科建設システム工学専攻修士課程(〒468-8502名古屋市天白区塩釜口)

²フェロー会員 D.Sc 工博 名城大学教授 理工学部建設システム工学科(同上)

³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)

⁴正会員 工修 株式会社耐震解析研究所(同上)

1. 緒言

大地震を受ける動的挙動が複雑な鋼橋（アーチ橋、トラス橋、斜張橋等）の応答値あるいは限界値の算定は、梁要素を用いた複合非線形解析が、現在では最も実用的かつ精確な解を与える手法と考えられる^{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⁾。

複合非線形静的/動的解析の適用に際し、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（以下、ブレース材と総称する）で横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、通常解析では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变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、初期たわみ、あるいは初期横荷重等の導入が考えられる。

著者らは、文献4)、5)で鋼橋の複合非線形静的、準静的（繰返し）および動的解析におけるブレース材の適切なモデル化に関する基礎的研究を行っている。ブレース材付き1層および3層門型ラーメンの面内挙動を取り上げ、繰返し弾塑性有限変位解析および複合非線形動的解析を実施し、ブレース

材と主構造の結合条件、初期不整の与え方と大きさが解析結果に及ぼす影響について考察を行い、最も適切なブレース材のモデル化を提案している。

本研究は、文献4)、5)で得られた知見を実験的に検証するために行われたものである。節点がガセットを介して高力ボルトで接合された5体の鋼トラス構造模型（図-1）に、一定鉛直荷重と単調増大または繰返し水平荷重が作用する状態で実験を行い、どのような部材・部位の順に破壊が進行していくかを調べた。パラメータとしては、斜材断面（3種類で、1体は座屈拘束ブレース）、鉛直荷重の大きさ、および載荷パターンである。次に、実験トラス構造を適切にモデル化し、文献4)、5)で推奨されている初期横荷重を与えて繰返し弾塑性有限変位解析を実施して実験結果を再現出来るかを調べている。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体は図-1に示すような鋼平面トラス構

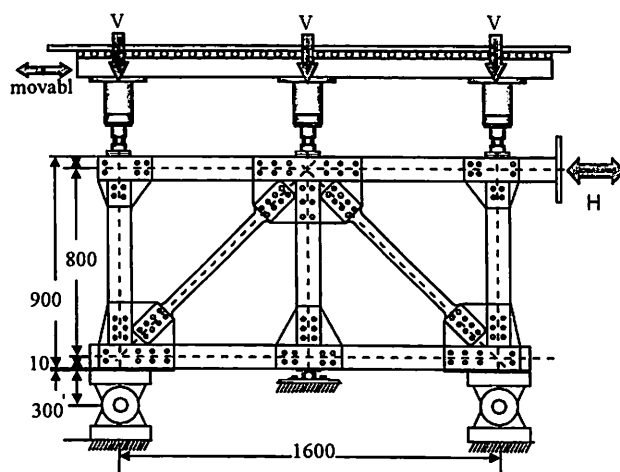


図-1 実験供試体概略図

表-1 実験供試体

No.	供試体名	载荷条件	斜材			鉛直荷重 V
			断面	ℓ/r	ℓ'/r	
1	A-Mo-0.2	Mono	A H100x50x6x8 (弱軸)	100	47	N/N _y =0.2
2	A-Cy-0.2	Cyclic				N/N _y =0.2
3	B-Cy-0.2	Cyclic	B H100x30x6x8 (弱軸)	183	83	N/N _y =0.2
4	B-Cy-0.3	Cyclic				N/N _y =0.3
5	BRB-Cy-0.2	Cyclic	BRB PL80x10 (弱軸)	392	170	N/N _y =0.2

Note: ℓ = 全斜材長 (節点間距離) ℓ' = 斜材平行部の長さ r = 弱軸回りの断面 2 次半径

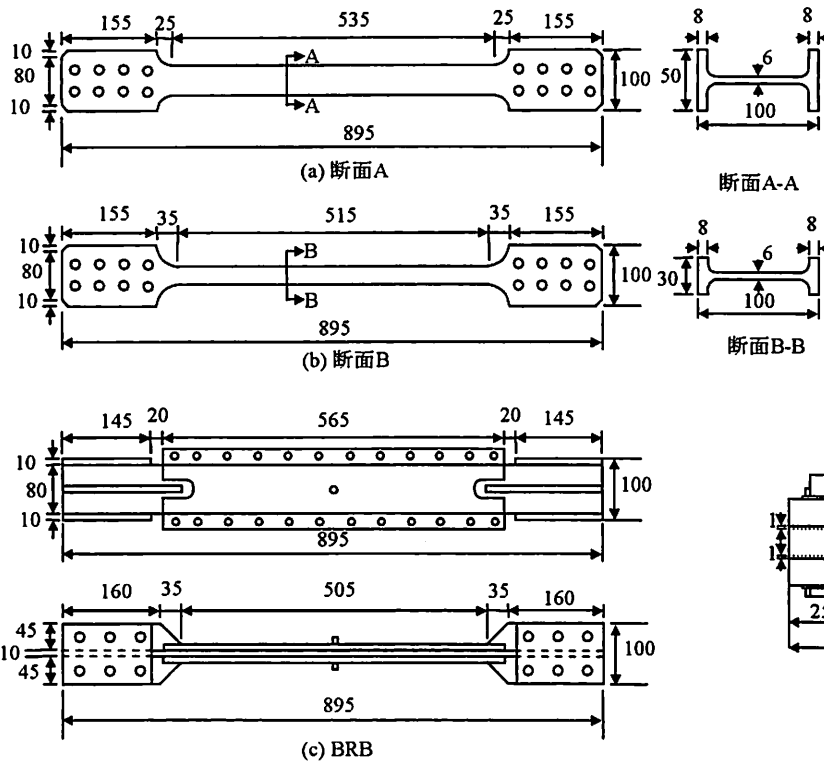


図-3 斜材

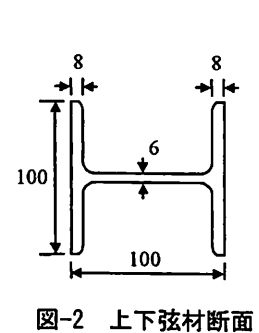


図-2 上下弦材断面

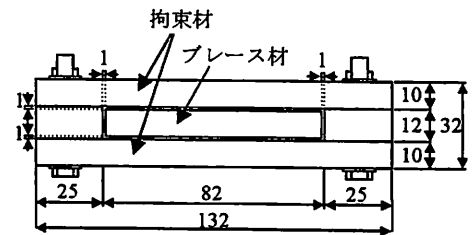


図-4 BRB断面

造模型で、5 体の供試体を製作して実験を行った。トラス構造は両端基部がピン支持、中央基部がローラー支持され、3 体の鉛直ジャッキにより均等な一定鉛直力 V を鉛直部材に载荷し、上弦材に単調増大、あるいは繰り返し水平荷重 H が载荷されている。

5 体の供試体の一覧を表-1 に示す。上下弦材および鉛直材には図-2 に示すような SS400 の H 型鋼を弱軸方向に使用した。表-1 の供試体名の最初の A, B, BRB 斜材の断面の種類を表している。3 種類の斜材の全体図および断面図を図-3, 図-4 に示す。断面 A, B は図-2 の H 型鋼のフランジ幅をそれぞれ 50mm, 30mm に削ったものである。また BRB は

座屈拘束ブレースを表す。図-4 の BRB はブレース材および拘束材に平板を使用し、安全係数 $\gamma_F > 3.0$ で全体座屈が生じない設計となっている⁶⁾。BRB の組み立て方法は、まずブレース材の平形部に拘束材とブレース材の隙間量分 (面外 1mm, 面内 1mm) のアンボンド材を接着し、ブレース材を 1 対の拘束材で挟み込むように装着し強力六角ボルトで接合した。ボルトは M10 を用いて供試体の長さ方向に 50mm 間隔で片側 12 本の高力六角ボルトで接合した。

供試体名の 2 番目の記号は载荷条件を表し、Mono は単調载荷、Cyclic は繰り返し载荷を表す。最後の数値は鉛直材の軸力 (N) と降伏軸力 (N_y) の

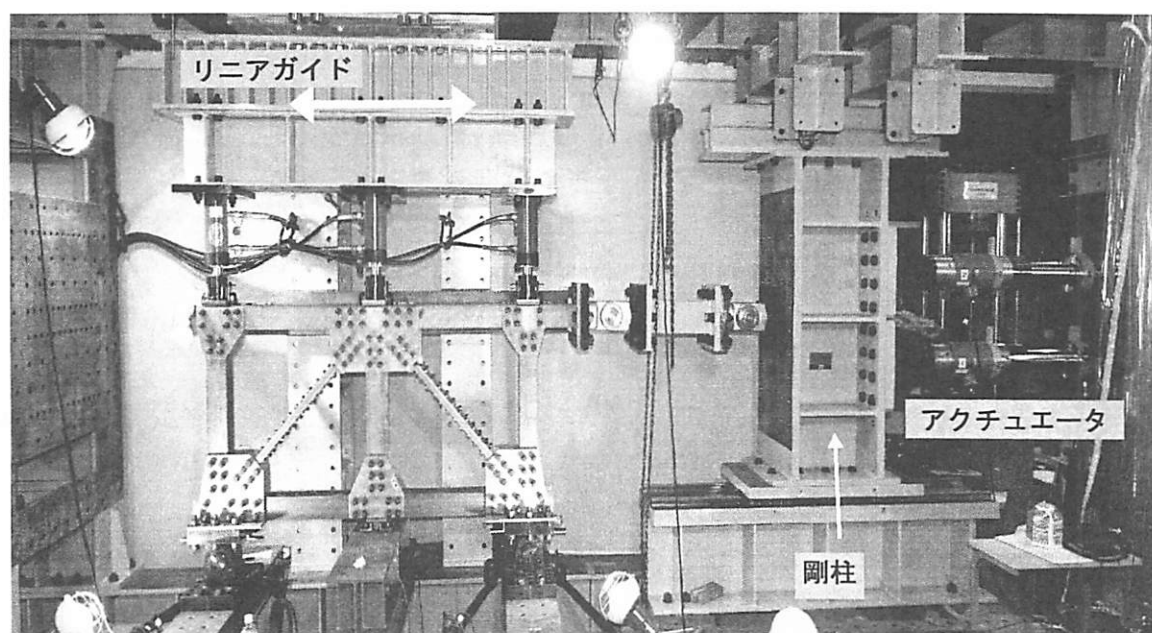


写真-1 実験全景

表-2 材料定数

部位	E [GPa]	σ_y [MPa]	ε_y [%]	σ_u [MPa]	δ_u [%]	ν
ウェブ	205	305	0.149	438	29.8	0.28
フランジ	196	300	0.153	427	26.7	0.27
ガセット	202	276	0.136	416	30.8	0.26

比を表し、 N/N_y が 20% と 30% で実験を行った。

トラス構造の各格点は板厚 10mm の 2 枚のガセットプレートを通じて M16 の高カボルトにて摩擦接合されている。設計は道路橋示方書によった。

(2) 実験装置

写真-1 に本実験の実験装置を示す。载荷フレームは梁・柱をボルト接合によって剛結した自定式構造のため、実験目的に合わせた組換えにより多様な载荷形式に対応できる。圧縮 1000kN、引張 500kN の载荷が可能なサーボアクチュエータ 2 基は、デジタル変位計と 32bitCPU を搭載したコントローラによる 1/100mm の高精度な変位制御が可能である。垂直に設置された剛な柱には上下端にスライドが設置されており、水平に可動することによりこの剛柱に剛結されている供試体に 2 本のアクチュエータの合計荷重 H が与えられるようになっている。供試体と剛柱の間のロッドには 2 個のヒンジが挿入されて供試体の上下を吸収出来るようになっている。実験供試体の軸方向変位 Δ をモニターして水平荷重 H を制御した。

鉛直ジャッキ 3 基は上部の鋼梁を介してリニアガイドに固定され、3 基が一緒に自由に水平方向に

移動出来るようになっている。上弦材の 3 カ所の各点では、面外変形を起こさないよう拘束してある。

3. 実験結果

(1) 材料定数

JIS1 号引張試験より求められた、部材の材料定数を表-2 に示す。ここに、 E : ヤング係数、 σ_y : 降伏応力、 ε_y : 降伏ひずみ、 σ_u : 引張強さ、 δ_u : 伸び、 ν : ポアソン比である。

(2) 変形挙動

性能実験から得られた各供試体の水平荷重 - 水平変位関係を図-5 に示し、顕著なイベントを図中に示している。なお、図の横軸は、左方向に変位した場合を正としている。

A-Mo-0.2 は、30mm 付近にて左斜材の座屈が生じ、荷重低下が見られた。

A-Cy-0.2 は、+12mm へ向かう途中の+11mm 付近にて左斜材の座屈を生じ微小な荷重低下が見られた。その後-16mm へ向かう途中の-12mm 付近で右斜材の座屈が生じ、さらに微小の荷重低下が見られた。しかし±26mm までは荷重の低下は大きくなく、そ

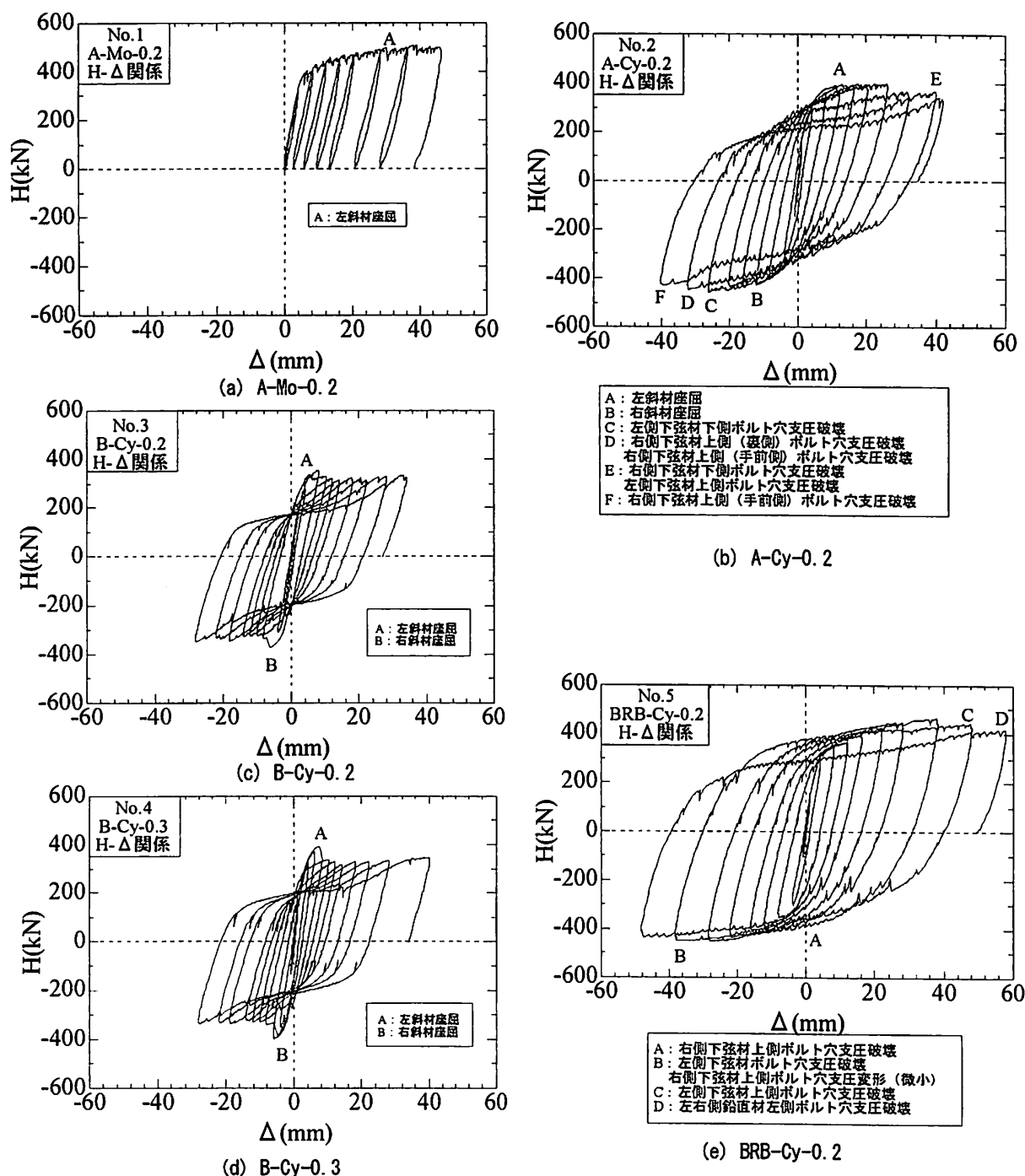


図-5 水平荷重—水平変位関係と損傷位置

の後斜材の座屈が大きくなり荷重が低下した。ピンチング現象（荷重増分小さいのに変形だけが進む現象）が顕著に見られるようになった。

B-Cy-0.2 は、-8mm へ向かう途中の-8mm 付近で右斜材の座屈が生じ荷重低下が見られた。その後+8mm へ向かう途中の+6mm 付近にて左斜材の座屈を生じ荷重低下が見られた。

B-Cy-0.3 では、+8mm へ向かう途中の+7mm 付近にて左斜材の座屈が先に生じ荷重低下が見られた。

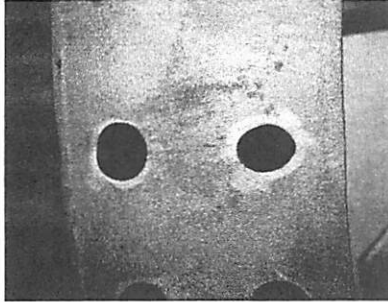
その後-8mm へ向かう途中の-5mm 付近で右斜材の座屈が生じ荷重低下が見られた。

BRB-Cy-0.2 は、安定した紡錘型の履歴曲線を描いており、非常に大きなエネルギー吸収能力が得られ、BRB 設置により耐震性が向上したと言える。

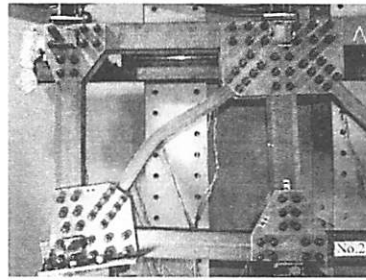
全体的な傾向としては、座屈に対して弱い斜材を持つトラスでは、損傷は斜材に集中しガセットプレート周辺部に損傷は広がらない。所が、座屈に対して強い斜材を持つトラス（極端な場合 **BRB-Cy-**

表-3 破壊の順番

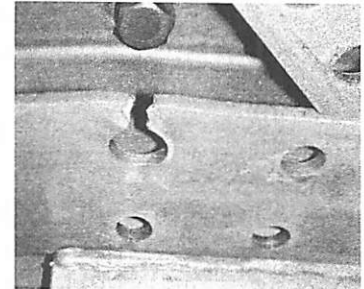
供試体		1番目	2番目	3番目
No.1	A-Mo-0.2	斜材座屈	下弦材 フランジボルト穴の支圧変形	左鉛直材下部 ボルト穴の支圧変形
No.2	A-Cy-0.2	斜材座屈	下弦材 フランジボルト穴の支圧破壊	鉛直材下部 ボルト穴の支圧変形
No.3	B-Cy-0.2	斜材座屈	左鉛直材下部 ボルト穴の軽微な支圧変形	-
No.4	B-Cy-0.3	斜材座屈	中央鉛直材下部 ボルト穴の支圧変形	-
No.5	BRB-Cy-0.2	下弦材左右 フランジボルト穴の支圧破壊	左右鉛直材 ボルト穴の支圧破壊	中央鉛直材下部 ボルト穴の支圧変形



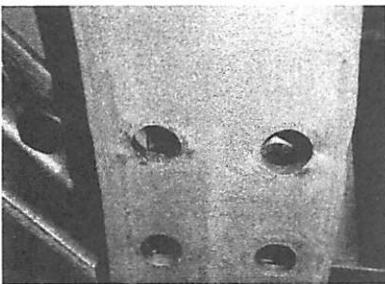
(a) No. 1 A-Mo-0.2
鉛直材ボルト穴支圧変形



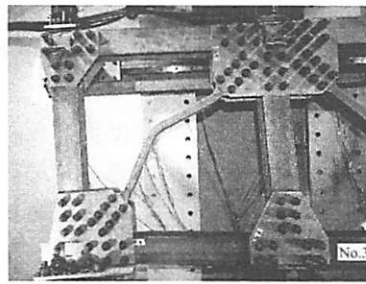
(b) No. 2 A-Cy-0.2
左斜材座屈変形



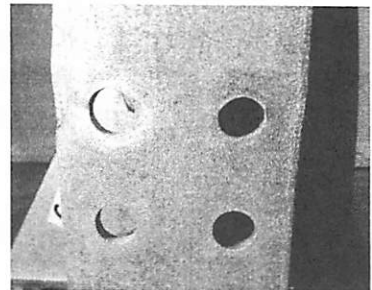
(c) No. 2 A-Cy-0.2
下弦材ボルト穴支圧破壊



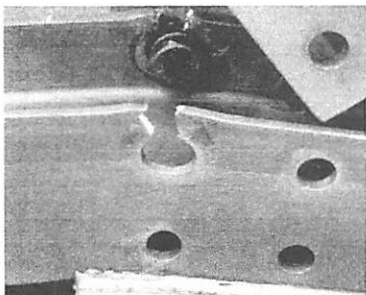
(d) No. 2 A-Cy-0.2
鉛直材ボルト穴支圧変形



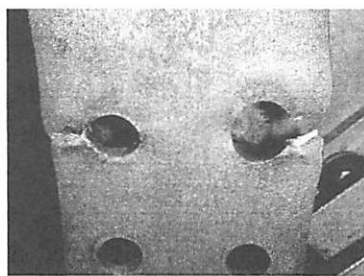
(e) No. 3 B-Cy-0.2
左斜材座屈変形



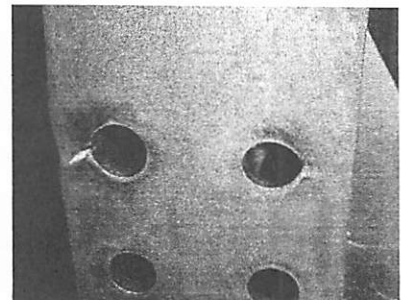
(f) No. 4 B-Cy-0.3
中央鉛直材ボルト穴支圧変形



(g) No. 5 BRB-Cy-0.2
下弦材ボルト穴支圧破壊



(h) No. 5 BRB-Cy-0.2
左右鉛直材ボルト穴支圧破壊



(i) No. 5 BRB-Cy-0.2
中央鉛直材ボルト穴支圧破壊

写真-3 損傷状況

0.2) では、損傷は斜材からガセットプレート周辺部に損傷は広がる。このことは当然の結果であるが、座屈拘束ブレースを使用する場合は、取り付け部周辺の損傷にも十分配慮することが必要であることを教えてくれる実験結果である。

(3) 損傷の順番

全供試体の損傷の箇所、順番をまとめて表-3 に示す。これらは、荷重の折り返し点で試験機を止めて肉眼で観察した結果に、実験終了後にガセットプレートを取り外して確認した損傷である。実験終了

後の損傷は、写真-3 に示す。

A-Mo-0.2 は、左斜材座屈後、左側の下弦材の上部のボルト穴が支圧変形、右側の下弦材の下部のボルト穴に支圧変形が生じ、左右鉛直材の右部のボルト穴に支圧変形を生じた。

写真-3 の (a) に鉛直材の変形写真を示す。

A-Cy-0.2 は、まず初めに右斜材が座屈を生じ、続いて左斜材が座屈、左側の下弦材の下部のボルト穴に支圧破壊、右側の下弦材の上部のボルト穴に支圧破壊、その後、左側の下弦材の上部のボルト穴が支圧破壊、右側の下弦材の下部のボルト穴に支圧破壊が生じ、鉛直材のボルト穴に支圧変形を生じた。写真-3 の (b) に左斜材の座屈変形写真、(c) に下弦材ボルト穴の破壊変形写真、(d) に鉛直材ボルト穴の破壊変形写真を示す。

B-Cy-0.2 は、まず初めに右斜材が座屈を生じ、続いて左斜材が座屈、下弦材のボルト穴に微小な支圧変形を生じた。写真-3 の (e) に左斜材の座屈変形写真を示す。

B-Cy-0.3 は、はじめに左斜材が座屈を生じ、続いて右斜材が座屈を生じた。下弦材のボルト穴には微小な支圧変形を生じた。中央鉛直材に支圧変形を生じた。写真-3 の (f) に中央鉛直材ボルト穴の破壊写真を示す。

BRB-Cy-0.2 は、まず初めに左側の下弦材の下部のボルト穴に支圧破壊、右側の下弦材の上部のボルト穴に支圧破壊、その後、左側の下弦材の上部のボルト穴が支圧破壊、右側の下弦材の下部のボルト穴に支圧破壊が生じ、左右鉛直材の左部のボルト穴に支圧変形を生じ、左右鉛直材の右部のボルト穴に支圧変形を生じ、中央鉛直材に支圧変形を生じた。写真-3 の (g) に下弦材ボルト穴の破壊変形写真、(h) に左右鉛直材ボルト穴の破壊写真、(i) に中央鉛直材ボルト穴の破壊写真を示す。

なお、全供試体を通じて、部材の局部座屈は見られなかった。これは、幅厚比が小さいフランジの H 形鋼断面 ($b/t \leq 6.3$) を弱軸回りに使用したためである。

4. 解析的研究

5 体の実験供試体に対して、梁要素を用いた繰返し弾塑性有限変位解析を実施した。梁要素を用いているため、局部座屈およびボルト周辺の損傷は考慮出来ないが、部材座屈の影響は適切なモデル化により考慮出来る。このことを実証するのがこの章の主目的である。なお、解析は全て構造解析用汎用コ

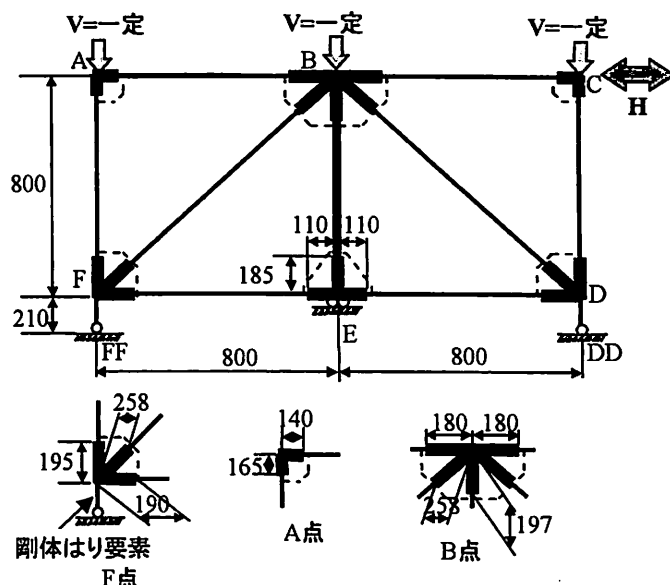


図-6 解析モデル

ード Abaqus を使用した。

(1) 解析概要

使用した解析モデルを図-6 に示す。A および B 断面の斜材は、取り付け部フランジが広がっているのでその影響を考慮した。また、ガセットプレートの影響は、その厚さ (片面 10mm) を部材の最先端ボルト位置から節点までのフランジ厚に加え (すなわち、フランジ厚を 18mm とし)、節点を剛結にすることでモデル化した。また、支承のオフセット (トラスの節点が支承のヒンジの位置の上方 210mm にある影響) はその間を剛棒要素で結ぶことで考慮した。

BRB を除く全ての部材は、Timoshenko はり理論に基づく平面はり要素 (要素番号 B31) で、BRB についてはトラス要素 (要素番号 T3D2) でモデル化した。上下弦材は 20 分割、斜材および鉛直材は 10 分割で解析を行った。材料定数は表-2 の材料定数を用いた。

境界条件に関しては、図-6 上の DD 点および FF 点は z 軸 (紙面に垂直な方向) 周りの回転以外を拘束、E 点は、y 軸方向の変位を拘束した。载荷方法は、上弦材右端の点 C を载荷点として、変位制御で解析を行った。繰返し载荷解析に使用する構成則には、バイリニア型移動硬化則 (2 次勾配は $E/100$) を用いた。斜材の初期不整として部材長 (平行部の長さ) の $1/1000$ の初期たわみ相当の等分布横荷重^{4),5)}を与えた。

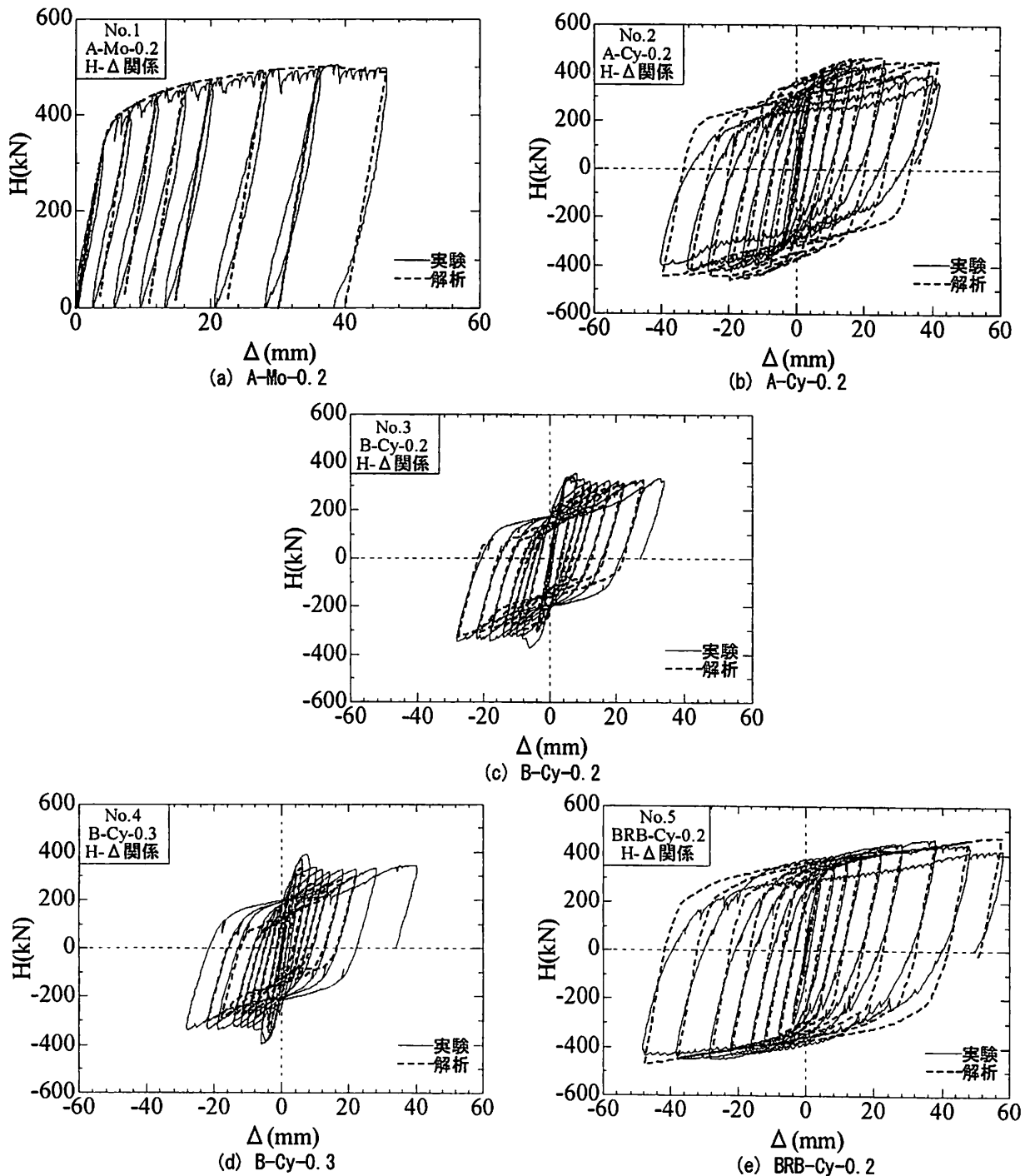


図-7 解析と実験の比較

(2) 解析と実験結果の比較

解析と実験結果の比較を図-7 に示す。全般的に解析と実験結果の相関は良好である。特に、単調増大 (A-Mo-0.2) およびフランジ幅が小さい B 断面斜材の B-Cy-0.2, B-Cy-0.3, および BRB-Cy-0.2 では良い。その中でも、斜材の座屈の影響が卓越し、周辺部の損傷が少ない B 断面斜材供試体 (B-Cy-0.2,

B-Cy-0.3) では、実験と解析は見事に一致している。最も実験と合わなかった A-Cy-0.2 は、ガセットプレート周辺部の損傷が大きく、その影響を考慮出来ない解析が実験値を上回ったものと思われる。

今後は、構成則をより精緻な修正 2 曲面モデルにする、ガセット周辺部の損傷を考慮できる解析モデルを考案するなどして解析精度の向上を図っていく必要がある。

5. 結言

一定鉛直荷重と繰り返し水平荷重を受ける鋼トラス構造の進行性破壊に関する実験を行った。実験は、5体行い、斜材を上下弦材、鉛直材よりも弱くし、斜材座屈後の挙動を調べることに重点を置いた。一方、斜材に座屈拘束材を用いて制震構造化したトラス構造についても実験を行い、斜材座屈した場合の挙動と座屈しない場合の挙動の比較も行った。また、梁要素を用いた繰り返し弾塑性有限変位解析を実施し、解析結果を実験結果と比較した。梁要素を用いているため、局部座屈およびガセットプレートのボルト周辺の損傷は考慮できないが、部材座屈の影響は考慮することが出来る。解析にはまだ改善の余地があるが、斜材の座屈による損傷が卓越する場合は、実験結果をよく模擬できることが分かった。このことから、文献4)、5)で推奨されている初期横荷重を与える方法は有効であることが分かった。

謝辞

本研究は、文部科学省の科学研究費（基盤研究（B））、研究代表者：宇佐美 勉）、ならびに平成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（代表者：宇佐美 勉）」の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1) 宇佐美勉編著、日本鋼構造協会編：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン、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) 馬越一也、宇佐美勉、斉藤直也、野中哲也：鋼骨組み構造の複合非線形動的解析におけるブレース材のモデル化、第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.255-262、2009.1.
- 5) 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、構造工学論文集に投稿中.
- 6) 宇佐美勉、佐藤崇、葛西昭：高機能座屈拘束ブレースの開発研究、構造工学論文集、Vol.55A、pp.719-729、2009.3.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅱ鋼橋編、丸善、1996.