

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

名城大学	フェロー	○宇佐美 勉
(株)耐震解析研究所	正会員	馬越 一也
(株)耐震解析研究所		吉野 廣一
(株)耐震解析研究所	正会員	野中 哲也

1. 背景と目的

複弦アーチ橋のように横構、対傾構（ブレース材と総称する）で補剛された構造の複合非線形動的解析を実施する場合、ブレース材を適切にモデル化することにより、幾何学的非線形性は解析の中で自動的に考慮され、曲げ座屈照査を省略することが出来る^{1), 2)}。ブレース材端部はピン結合と仮定される場合が多いが、そのようにモデル化すると、たとえ梁要素を用いた有限変位解析を実施しても、分岐座屈解析を実施しない限り曲げ座屈は考慮出来ず、トラス要素と同じ挙動を示すこととなる。曲げ座屈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、例えば微小な初期たわみ、または初期横荷重等の導入が考えられる。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次モーメントの影響で初期不整を与えたと同じ効果が得られ、一般に初期不整は考える必要がない^{1), 2)}。本研究は複合非線形動的解析におけるブレース材のモデル化に対する研究の基礎として、最も単純なブレース材付き門型ラーメン（図-1）の繰返し弾塑性有限変位解析を実施し、ブレース材の端部条件および初期不整の与え方による解析結果の相互比較を行う。ここでは、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。

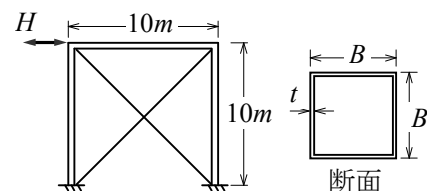


図-1 ブレース材付き門型ラーメン

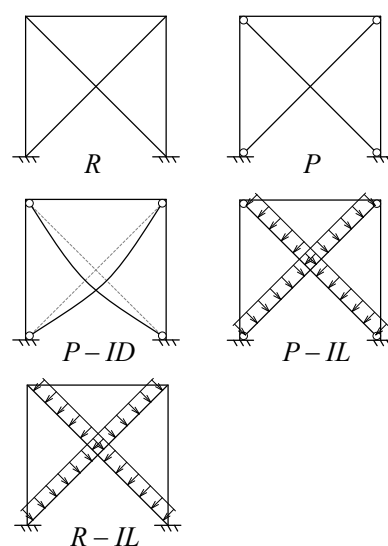


図-2 解析モデル

2. 解析モデルと解析方法

解析対象構造は、図-1 に示す柱上端に繰返し水平荷重を受ける箱形断面門型ラーメンで、鋼種、断面寸法は、SM490, $B=930\text{mm}$, $t=20\text{mm}$ （梁、柱）、SS400, $B=350\text{mm}$, $t=20\text{mm}$ （ブレース材）である。ブレース材長 L_b は 14.1m で細長比は 105 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、あるいは初期不整の与え方を変えた 5 種類を考える。すなわち、(R) 剛結—初期不整なし、(P) ピン—初期不整なし、(P-ID) ピン—初期たわみあり、(P-IL) ピン—横荷重あり、(R-IL) 剛結—横荷重あり、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。構成則はバイリニア型移動硬化則^{1), 2)}を用い、2次勾配は $E/100$ (E =弾性係数)とした。解析ソフトは、ABAQUS および SeanFEM（(株)耐震解析研究所）を用いた。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。

3. 解析結果と考察

図-3 に、最初の 4 つのモデルに対する初期の 2 ループの水平荷重 (H)—水平変位 (Δ) 履歴曲線を示す。両解析ソフトともほぼ同じ結果が得られたので ABAQUS の結果のみを示す。

単調増大部 (①～③)：荷重の大きさは、(P) > (R) > (P-ID) $\cong$ (P-IL) となる。(P) はブレース材の曲げ

キーワード ブレース材、鋼ラーメン、端部条件、初期不整、繰返し解析、複合非線形動的解析

連絡先 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 名城大学理工学部建設システム工学科 (e-mail: usamit@ccmfs.meijo-u.ac.jp)

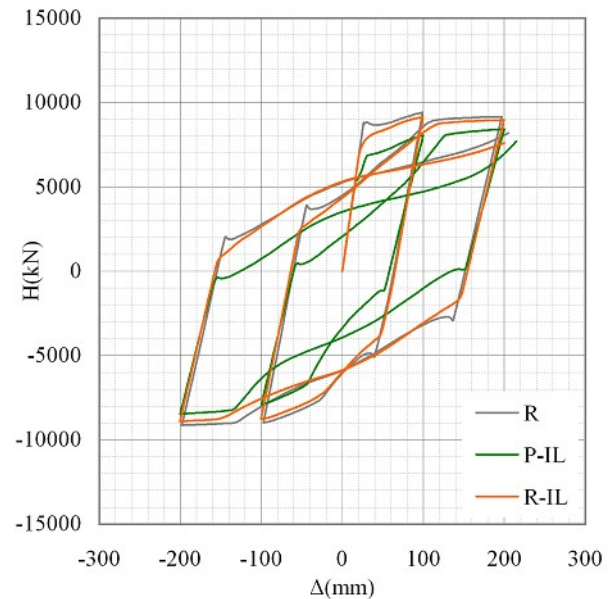
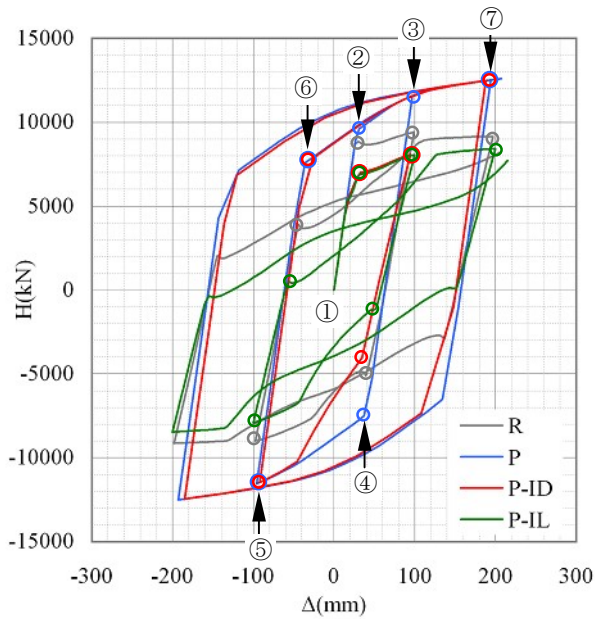


図-3 水平荷重(H)―水平変位(Δ)履歴曲線 (その 1) 図-4 水平荷重(H)―水平変位(Δ)履歴曲線 (その 2)

座屈の影響が考慮できず、トラス部材と同じ挙動になるため、最も荷重が大きくなる。その他のケースでは、曲げ座屈は考慮できるが、ブレース材の端部条件の影響で (R) が最も高くなっている。また、両端ピンの場合には、初期不整の与え方にほとんど影響されない。

繰返し載荷部 (③～⑦): 1) 負側の折り返し点⑤での荷重の絶対値の大きさは、 $(P) \cong (P-ID) > (R) > (P-IL)$ となり、(R) と (P-ID) が逆転する。2) (P-ID) は④から⑤に行く過程で初期たわみの影響が無くなったように挙動する。3) (R) と (P-IL) は、③から⑤の過程でのブレースの曲げ座屈を的確に捉え、ほぼ同様な挙動となり、荷重は (P) よりかなり小さくなる。

(P-ID) は単調増大では問題がないが、繰返し荷重の場合、引張荷重下でブレース材の初期たわみが消滅してしまい、直後の圧縮荷重下では曲げ座屈を捉えることが出来ない場合が多いことが分かった。すなわち、③～⑤の過程で剛性行列の固有値は負になることがあるが、分岐座屈解析を行っていないため、主経路 (トラス部材としての変形経路) の解のみを捉えているため、上記 2) のような挙動が得られた。ただし、両解析ソフトとも、変位増分量を試行錯誤的に変えることにより、(P-ID) でも (R)、(P-IL) とほぼ同様な解を得たこともあった。これは、引張から圧縮に移行する際に微小な初期たわみが残留しているためであるが、収束性は一般に非常に悪い。

図-4 は、(R-IL) の結果を (R)、(P-IL) の結果と比較したものである。(R-IL) は、部分的な相違はあるものの (R) とほとんど変わりはない。ただし、収束性が改善されることが分かった。

4. 結論

ブレース材のモデル化として適するのは、ブレース材の曲げ座屈の影響が考慮出来る、剛結モデル (R)、両端ピンで横荷重を与えるモデル (P-IL)、剛結で横荷重を与えるモデル (R-IL) である。部材数が多い複雑な構造物の場合、横荷重を与えることは煩わしいが、動的解析を死荷重載荷の状態から始める場合は、死荷重が初期横荷重の役割を果たすことになる。両端ピンで初期たわみを与えるモデル (P-ID) は、所要の解が求まらない場合が多いので勧められない。また、両端ピンで初期不整を与えないモデル (P) は、ブレース材に生ずる曲げ座屈が考慮できず、構造全体の耐力を過大評価するため使用すべきではない。

本研究は、名城大学「高度制震実験・解析研究センター」の研究課題「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 (2006): 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。

2) 土木学会 (2008): 鋼・合成構造標準示方書―耐震設計編, 丸善。