

上路式鋼トラス橋の格点部の剛性が地震時応答解析結果に 与える影響に関する一検討

谷上裕明¹・小野潔²・松村政秀³・三好崇夫⁴

¹学生会員 大阪大学 大学院博士前期課程（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

²正会員 博士（工学） 東京工業大学 准教授 大学院理工学研究科
（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

³正会員 博士（工学） 大阪市立大学 講師 大学院工学研究科
（〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138）

⁴正会員 博士（工学） 大阪大学 助教 大学院工学研究科（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

1. はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震における道路橋の被害を受け、兵庫県南部地震のような非常に大きな地震に対しての新たな耐震設計手法の確立の必要性が改めて認識された。そして、兵庫県南部地震以降に改訂された道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾（以下、「道示V」という）では、レベル2地震動に対して、鋼製橋脚等の鋼部材の塑性化を許容した耐震設計法が導入された。しかし、鋼トラス橋については、塑性域での耐力・変形性能が未だ十分に解明されていないため、塑性化を許容した具体的な設計法が確立されておらず、不合理な設計が行われている場合もあると考えられる。鋼トラス橋の耐震設計法を確立するためには、レベル2地震動作用時における耐震性能を把握することが必要となってくる。鋼部材の耐震性能は、鋼部材に作用する断面力特性が大きな影響を与え、さらに鋼トラス橋の格点部のモデル化は、その断面力特性に影響を与えると考えられる。しかしながら、鋼トラス橋の格点部のモデル化の違いが非線形時刻歴応答解析から得られる断面力の応答特性に与える影響については、今までほとんど検討されていない。

鋼トラス橋の格点部を適切にモデル化するには、実験結果等をもとに、その挙動を把握することが必要不可欠である。しかしながら、鋼トラス橋の格点部の挙動に関する研究^{2), 3)}は非常に少ない。そのため、適切な鋼トラス橋の格点部のモデル化について未だ具体的なものは提案されていない。このような

状況下で、実設計では、トラス格点部のモデル化として、トラス弦材と腹材とを剛結合もしくはピン結合としたモデルにより動的解析を行い、それら2つの解析結果を参考にして安全側となるよう鋼トラス橋の耐震設計を行うことも可能であると考えられる。

著者らは既往の研究⁴⁾で、上路式鋼トラス橋を対象に、トラス弦材と腹材の格点部の曲げ剛性を剛結合およびピン結合とした場合についてファイバーモデルでモデル化して複合非線形時刻歴応答解析を行い、格点部の剛性と断面力の応答特性の関係について検討を行った。本研究では、格点部の曲げ剛性として、剛結合およびピン結合の他、半剛結合とした場合についても複合非線形時刻歴応答解析を実施した。そして、その解析結果をもとに、上路式鋼トラス橋の格点部におけるトラス弦材と腹材との曲げ剛性とレベル2地震動作用時にトラス部材に発生する断面力特性との関係について検討を行ったので報告するものである。

2. 解析モデルおよび解析条件

本研究では、複合非線形骨組解析プログラムとして、汎用プログラムEERC⁵⁾を用いた。解析は、3次元ファイバーモデルを用いた骨組解析により行った。

ところで、鋼トラス橋のレベル2地震動に対する耐震設計法およびモデル化については、そもそも鋼トラス橋の各部材にどの程度の塑性化を許容するのか、もしくは床版のモデル化をどのようにするのか

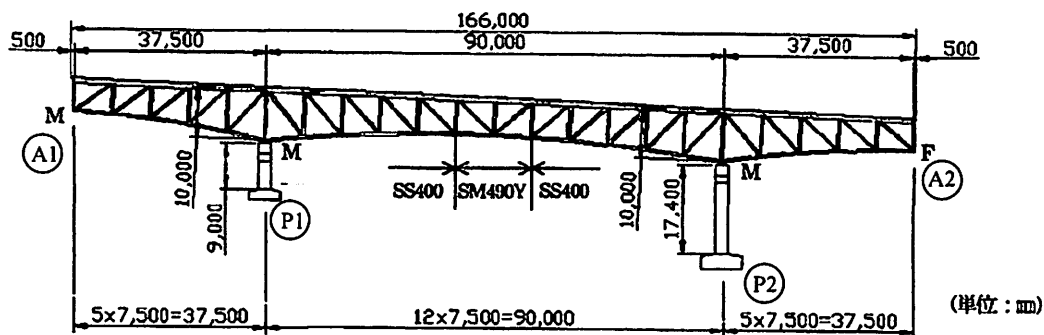


図-1 対象橋梁⁶⁾

表-1 設計条件

型 式	三径間連続上路式トラス橋
橋 長	166.0m
支 間 割	37.5m + 90.0m + 37.5m
全 幅 員	9.75m

表-2 拘束条件 (変位)

支点	橋軸方向	橋軸直角方向	鉛直
A1, P1, P2	自由	拘束	拘束
A2	拘束	拘束	拘束

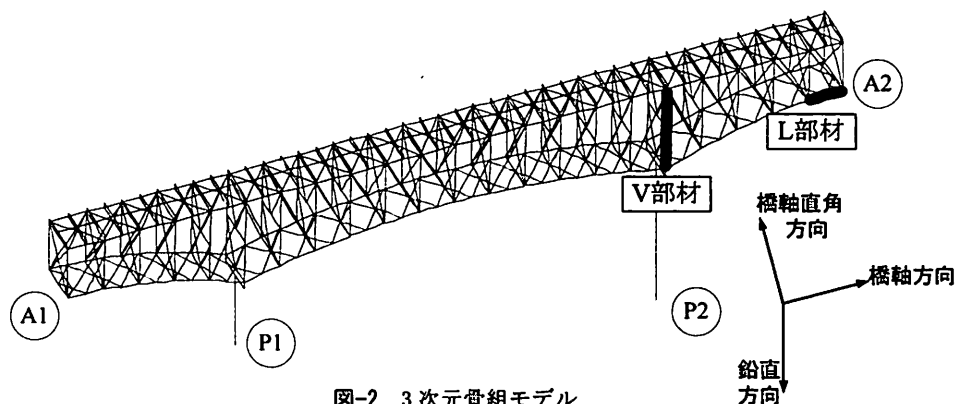


図-2 3次元骨組モデル

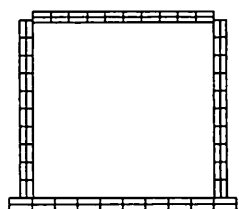
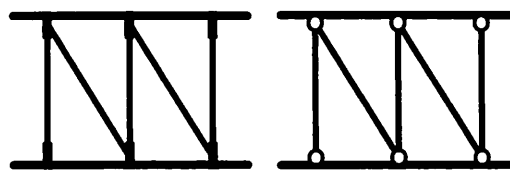


図-3 下弦材の要素分割



(a) 剛結合 (b) ピン結合

図-4 格点部のモデル化

等々、格点部のモデル化以外についても検討すべき事項がいくつか残されている。しかし、本研究の主たる目的が、上路式鋼トラス橋の弦材と腹材の格点部の曲げ剛性の違いが断面力特性に与える影響の把握であるため、格点部以外の床版等のモデル化については、既往の研究⁶⁾と同様のモデル化を行った。よって、鋼トラス橋の各部材に許容される塑性化の程度、鋼トラス橋の動的解析に必要な床版等の適切なモデル化については、今後、検討する必要があると考えられる。

(1) 構造モデル

対象とした上路式鋼トラス橋（図-1および表-1参照）を3次元ファイバーモデルを用いてモデル化した骨組構造を図-2に示し、各支点部の変位の拘束条件を表-2に示す。各支点部の回転については、すべての支点部で橋軸回りの回転のみ拘束とした。また、各部材の部材軸方向の要素分割は、1つの部材につき4分割以上に分割した。

なお、RC橋脚であるP1およびP2のいずれもファ

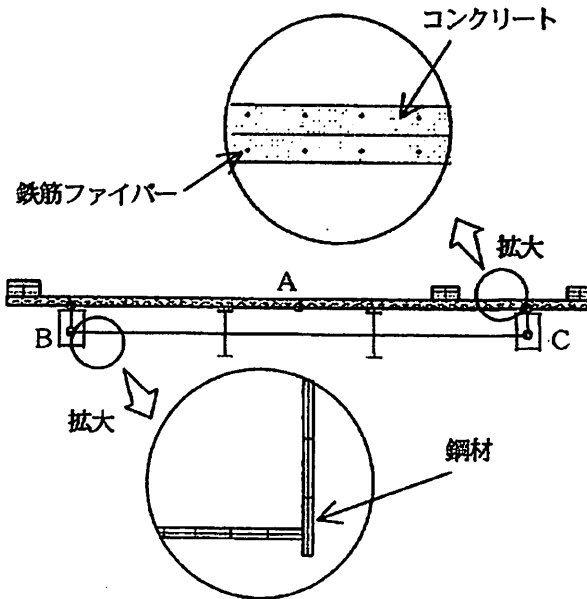


図-5 床版および接合部のモデル化⁶⁾

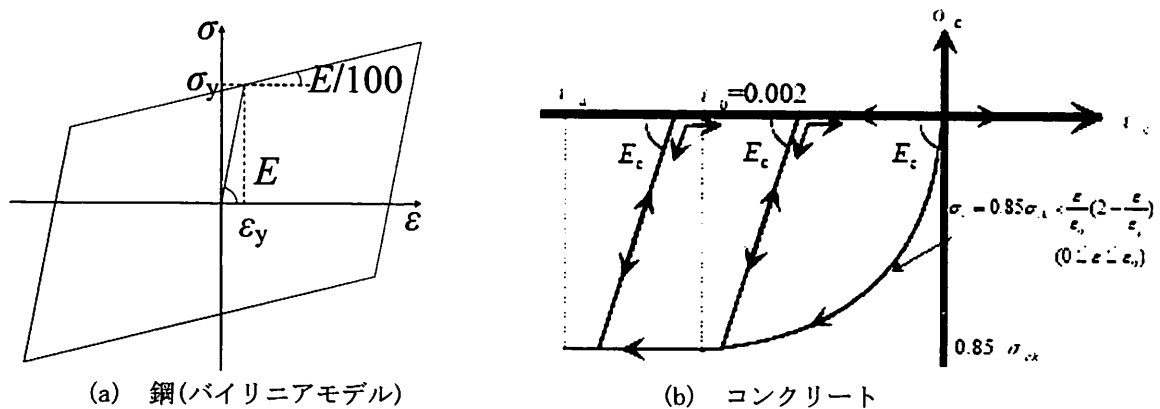


図-6 材料構成則

イバーモデルを用いてモデル化を行った。PIおよびP2とも橋脚基部は固定であるとした。

(2) 主部材の断面

主部材である上下弦材の断面は、無補剛断面である。断面内の要素分割の一例として、図-3に下弦材の要素分割の図を示す。

(3) 部材の結合条件

部材端部の結合条件は、レベル2地震動作用時以外の常時の設計においては、ピン結合と仮定している場合が多い。しかし、本研究では、トラス格点部のモデル化の違いが各部材に発生する断面力特性に与える影響について検討することが主たる目的である。そのため、トラス弦材と腹材の格点部における結合条件として、図-4に示すピン結合、剛結合の他

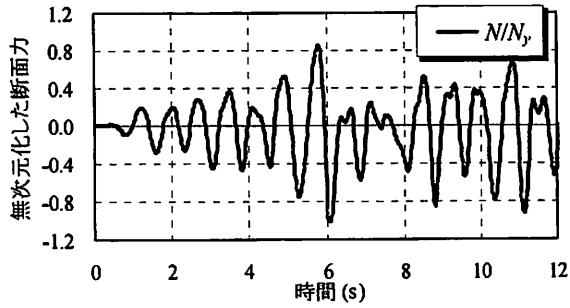
に、両者の中間的な曲げ剛性とした半剛結合の3通りのモデル化を行い解析を行った。これらの結合条件の取り扱いについては文献7)を参照されたい。

(4) 斜材、対傾構等のモデル化

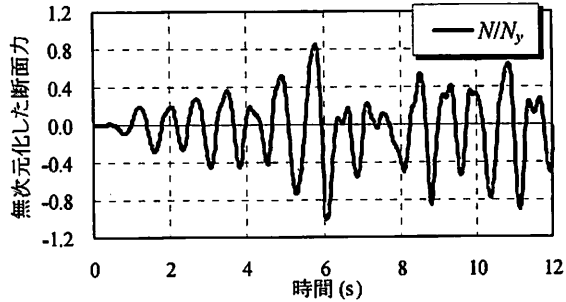
2次部材である斜材や対傾構等も、主部材と同様にファイバーモデルを用いてモデル化を行った。要素分割については、ひとつの部材を部材軸方向に4分割以上に分割した。

(5) 床版のモデル化

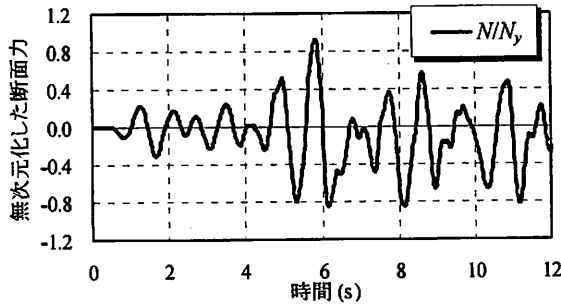
床版と上弦材の断面に対するファイバー要素分割を図-5に示す。ファイバー要素の部材軸としては、床版の部材(軸心A)と2つの上弦材の部材(軸心B, C)がある。床版は、コンクリート、鉄筋および縦桁からなり、文献6)と同様にして、図-5のようにモ



(a) 剛結合モデル

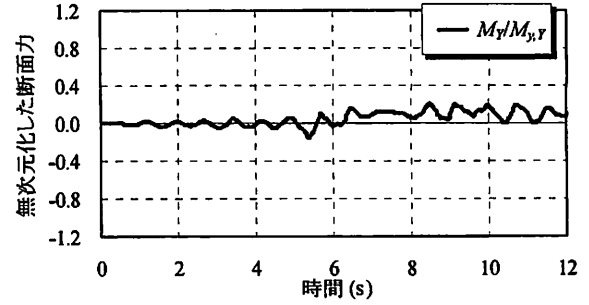


(b) 半剛結合モデル

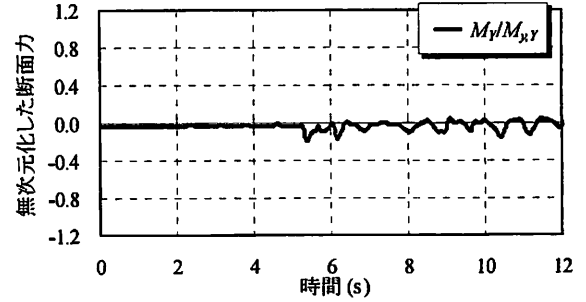


(c) ピン結合モデル

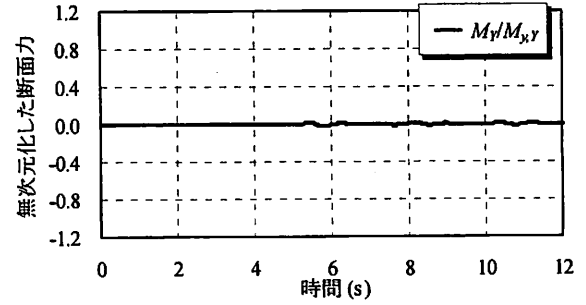
図-7 L部材（下弦材）の N/N_y の時刻歴応答



(a) 剛結合モデル



(b) 半剛結合モデル



(c) ピン結合モデル

図-8 L部材（下弦材）の $M_y/M_{y,r}$ の時刻歴応答

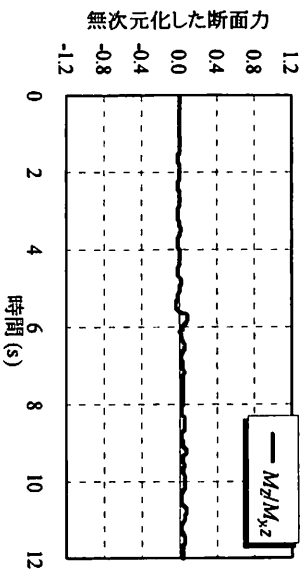
デル化を行った。ここでは縦桁を床版の一部と考えて両者を剛結し、鉄筋については、一本の鉄筋に対して1つの円形断面のファイバー要素とした。また、床版と上弦材のスラブアンカーを想定した非線形パネにより接合した。床版のモデル化の詳細については文献6)を参照されたい。

(6) 材料構成則

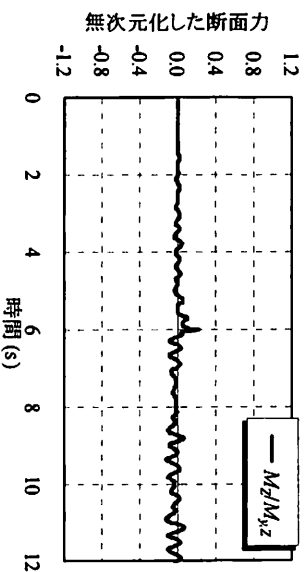
上下弦材、斜材、対傾構、床版の鉄筋等の鋼材の構成則は、図-6(a)に示すひずみ硬化を考慮（2次勾配を $E/100$ ）したバイリニアモデルとし、硬化則は移動硬化則とした。コンクリートの構成則は、図-6(b)に示すモデルを採用した。

(7) 動的解析条件

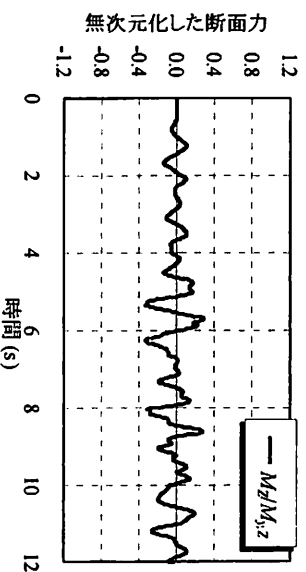
入力地震波としては、道示V¹⁾の参考資料に示されているI種地盤のレベル2地震波II-I-1を用いた。なお、著者らの既往の研究⁴⁾で、橋軸方向入力と比較して橋軸直角方向入力の方が、剛結合とピン結合とで解析から得られる応答断面力に違い見られたことから、本研究においては、橋軸直角方向にのみ入力地震波を作用させて解析を行った。対象橋梁に対して、死荷重が作用した時の静的解析を行い、この状態を初期状態として、複合非線形時刻歴応答解析を行った。数値積分法として、ニューマークの β 法を用い、 $\beta=1/4$ とした。減衰はレーリー減衰を使用し、減衰定数を0.01とした。このレーリー減衰の設定で採用する2つのモード次数は、固有値解析の結果をもとに、格点部が剛結合の場合は1次と7次、半剛結合の場合は1次と7次、ピン結合の場合は1次と6



(a) 剛結合モデル

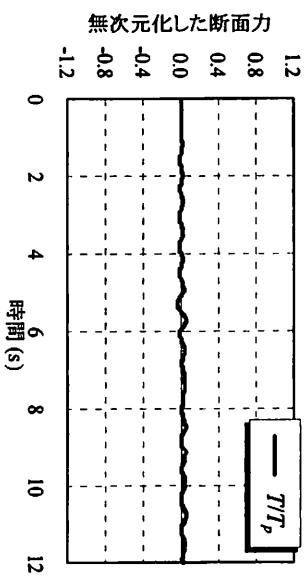


(b) 半剛結合モデル

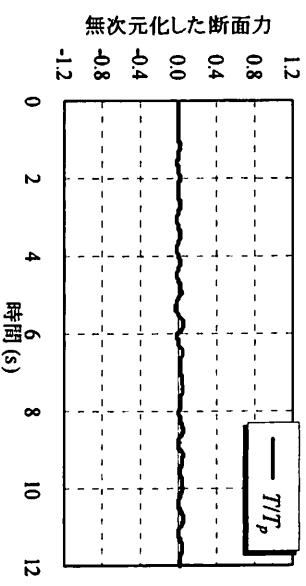


(c) ピン結合モデル

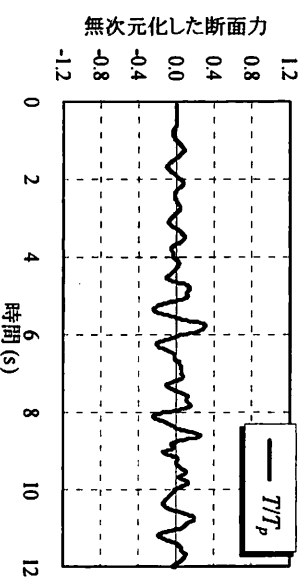
図-9 L部材（下弦材）の $M_z/M_{y,z}$ の時刻歴応答



(a) 剛結合モデル



(b) 半剛結合モデル



(c) ピン結合モデル

図-10 L部材（下弦材）の T/T_p の時刻歴応答

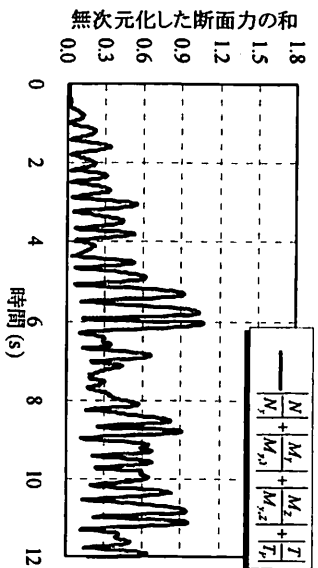
次を採用した。なお、固有周期は、剛結合の場合で0.78秒（1次），半剛結合の場合で0.78秒（1次），ピン結合の場合で0.88秒（1次）であった。

3. 解析結果

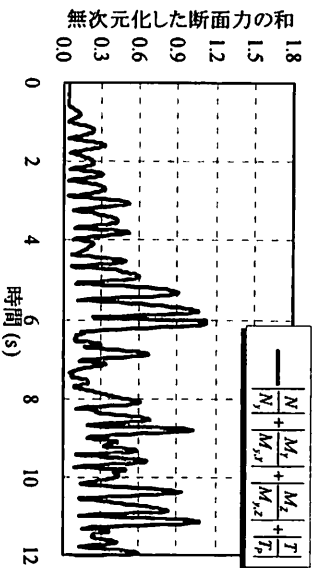
レベル2地震動を作用させた場合、図-2において太く示した下弦材（L部材）および垂直材（V部材）の断面力である軸力 N 、面内曲げモーメント M_y 、面外曲げモーメント M_z 、ねじりモーメント T を、それぞれ降伏軸力 N_y 、降伏面内曲げモーメント $M_{y,y}$ 、降伏面外曲げモーメント $M_{y,z}$ （ $M_{y,y}$ 、 $M_{y,z}$ は断面諸元から決定される軸力を考慮しない降伏曲げモーメント）、 $T_p = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} (2B_y I_y + 2B_z I_z)$ （ B_y ：フランジ幅、 B_z ：ウ

ェブ幅、 I_y ：フランジ厚、 I_z ：ウェブ厚）で除すことで無次元化した値の履歴を図-7～図-16に示す。図-11および図-16は、各断面力の絶対値の和の時刻歴応答を示している。各図において、(a)は格点部を剛結合、(b)は半剛結合、(c)はピン結合としてモデル化したときの時刻歴応答を示す。なお、本研究では主に断面力の応答値の最大値について検討するため12秒までの時刻歴応答のみを示している。

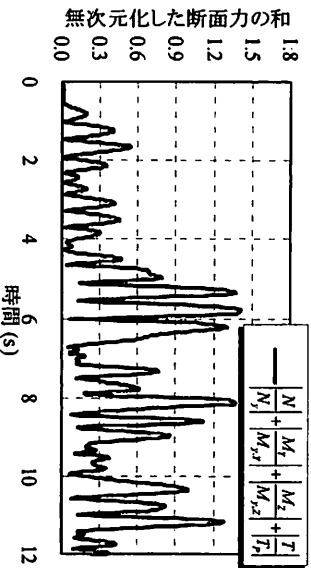
L部材（下弦材）の時刻歴応答を図-7～図-11に示している。図-7より無次元化した軸力 N/N_y については、格点部のモデル化による影響はほとんど見られない。図-9、図-10より無次元化した面外曲げモーメント $M_z/M_{y,z}$ 、ねじりモーメント T/T_p については、格点部をピン結合とモデル化することにより断面力の応答値が大きくなっていることが見られる。この



(a) 剛結合モデル



(b) 半剛結合モデル

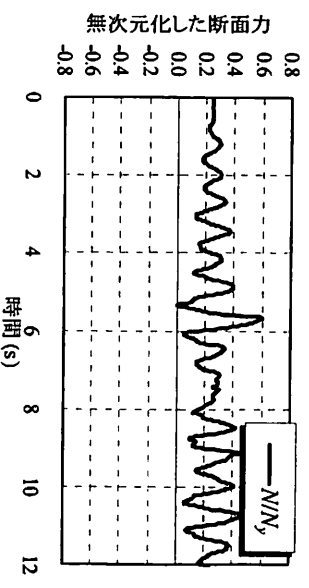


(c) ピン結合モデル

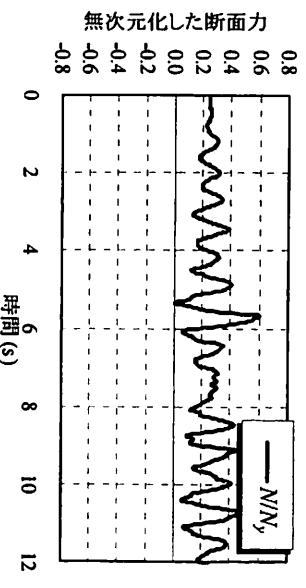
図-11 L部材（下弦材）の各項の和の時刻歴応答

影響により，部材に作用する無次元化した断面力の絶対値の和については，図-11より格点部をピン結合とモデル化することにより断面力の応答値の最大値が大きくなった。また，下弦材については格点部を半剛結合モデル化としても剛結合モデルとほぼ同様な断面力の応答を示すことが分かった。

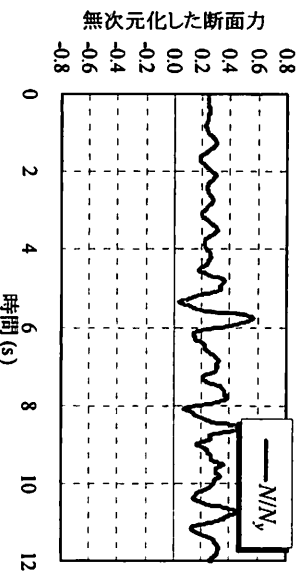
さらに，V部材（垂直材）の時刻歴応答を図-12～図-16に示す。無次元化した面内曲げモーメント以外の断面力 (N/N_y , $M_x/M_{x,y}$, T/T_y) の応答については，格点部のモデル化による影響はほとんど見られなかった。無次元化した面内曲げモーメント $M_y/M_{y,y}$ については，格点部を剛結合から半剛結合にすることにより応答が小さくなり，さらにピン結合とすると応答がほぼ0となっていることが見られる。この影響により，部材に作用する無次元化した



(a) 剛結合モデル



(b) 半剛結合モデル

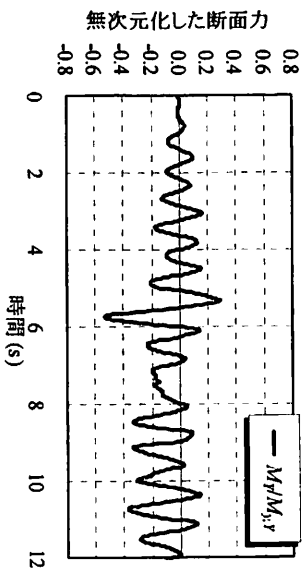


(c) ピン結合モデル

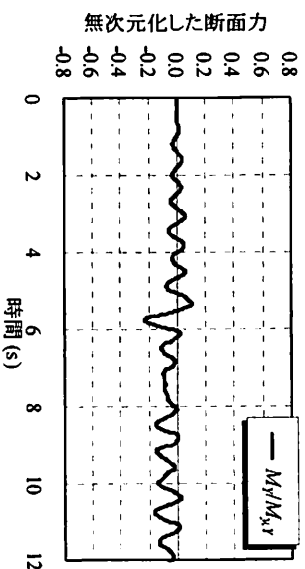
図-12 V部材（垂直材）の N/N_y の時刻歴応答

断面力の絶対値の和については，図-16より格点部の曲げ剛性を小さくすることにより，断面力の応答値の最大値が小さくなっていることが分かる。また，垂直材については格点部を半剛結合とモデル化すると剛結合モデルとピン結合モデルのほぼ中間的な時刻歴応答を示すことが分かった。

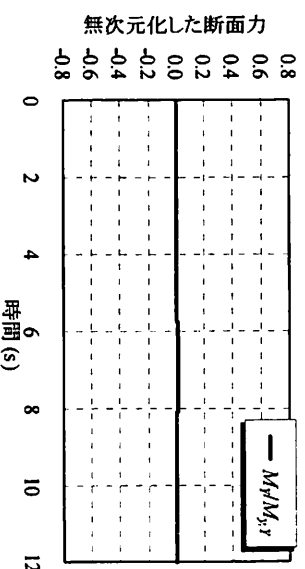
このように，格点部の曲げ剛性を変化させてモデル化することによって，下弦材では曲げ剛性を小さくすると断面力の応答値の最大値は小さくなり，垂直材では曲げ剛性を小さくすると断面力の応答値の最大値は小さくなる結果となった。また，格点部を半剛結合とモデル化した場合，下弦材においては剛結合モデルと同様の時刻歴応答となるが，垂直材においては剛結合モデルとピン結合モデルの中間的な時刻歴応答を示す結果となった。



(a) 剛結合モデル

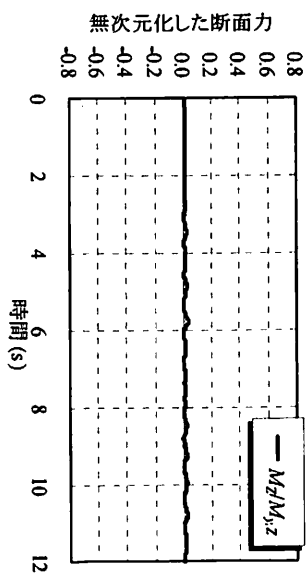


(b) 半剛結合モデル

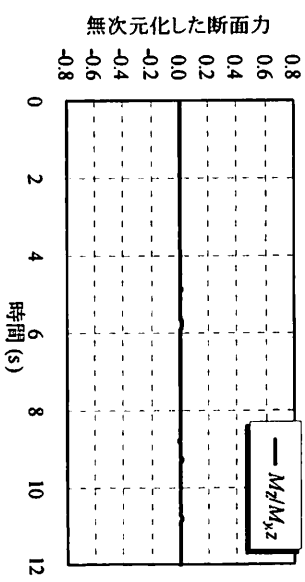


(c) ピン結合モデル

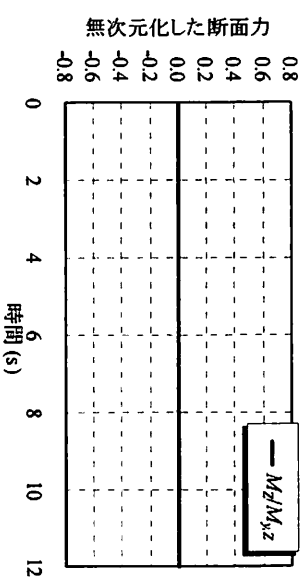
図-13 V部材（垂直材）の $M_1/M_{1,r}$ の時刻歴応答



(a) 剛結合モデル



(b) 半剛結合モデル



(c) ピン結合モデル

図-14 V部材（垂直材）の $M_2/M_{2,z}$ の時刻歴応答

4. 結論

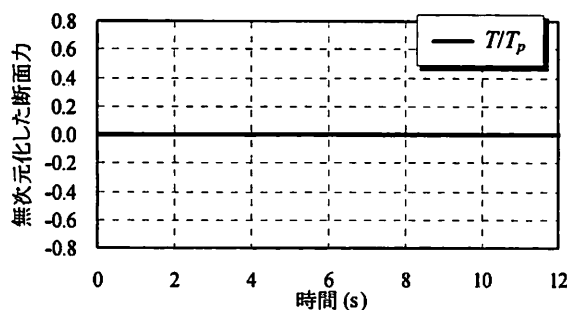
本研究では、鋼トラス橋の格点部の曲げ剛性のモデル化の違いがトラス主構部材の断面力の応答特性に与える影響を把握するため、上路式鋼トラス橋を対象に、トラス弦材と腹材の格点部をフレイバーモデルを用いて剛結合、半剛結合、ピン結合の3通りのモデル化をして、レベル2地震動を入力地震動とした複合非線形時刻歴応答解析を行った。

その結果、本研究で対象とした上路式鋼トラス橋の時刻歴応答解析結果では、格点部を剛結合、半剛結合、ピン結合とモデル化した場合で、下弦材においては曲げ剛性を小さくすると断面力の応答値の最

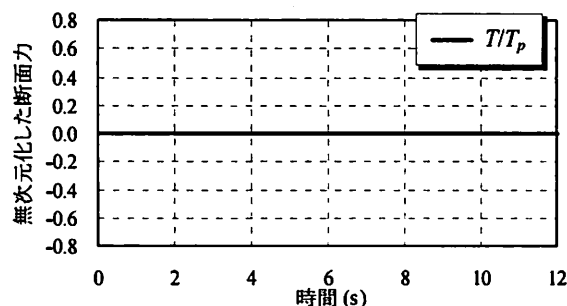
大値は大きくなり、垂直材においては曲げ剛性を小さくすると断面力の応答値の最大値は小さくなるという結果が得られた。

また格点部を半剛結合とモデル化した場合、下弦材においては剛結合モデルと同様の時刻歴応答となり、垂直材においては剛結合モデルとピン結合モデルの中間的な時刻歴応答を示す結果が得られた。

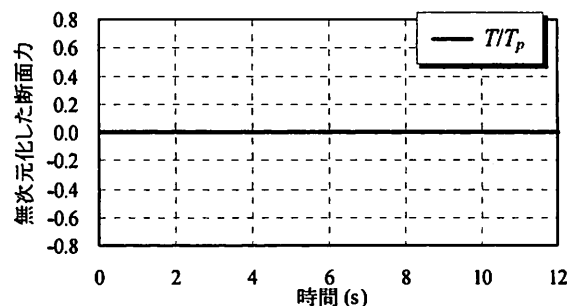
なお、本研究で示した検討結果は、1つの上路式鋼トラス橋に対する時刻歴応答解析結果にもとづくものである。よって、他の鋼トラス橋を対象に行うと異なった断面力特性が得られる可能性もあると考えられる。そこで、今後、幾つかの鋼トラス橋に対して、格点部のモデル化と断面力特性について検討していく必要がある。



(a) 剛結合モデル

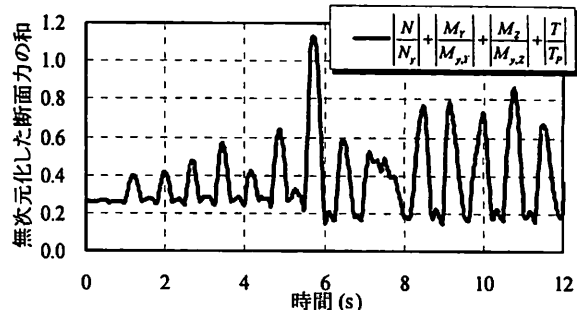


(b) 半剛結合モデル

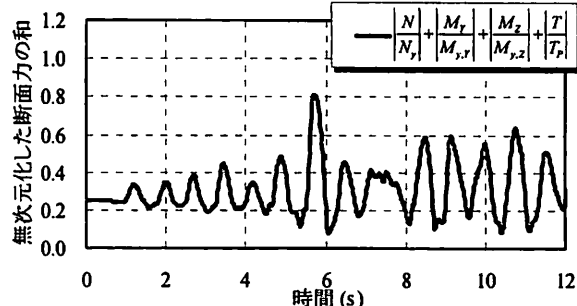


(c) ピン結合モデル

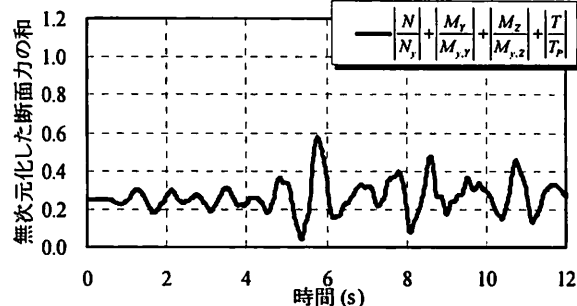
図-15 V部材（垂直材）の T/T_p の時刻歴応答



(a) 剛結合モデル



(b) 半剛結合モデル



(c) ピン結合モデル

図-16 V部材（垂直材）の各項の和の時刻歴応答

5. 謝辞：本研究で用いた解析モデルの作成にあたり，(株)地震工学研究開発センターの野中哲也氏および岩村真樹氏にご協力いただきました。また，本研究の一部は，「日本鉄鋼連盟 鋼構造研究・教育助成事業（土木一般研究）（代表者：大阪市立大学大学院 講師 松村政秀）」の一環として行ったものがあります。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.3.
- 2) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会・構造分科会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査

研究報告書 別冊3 トラス格点構造設計指針(案)，1976.1.

- 3) 北沢正彦，金治英貞，大南亮一，古川満男：東神戸大橋の主構トラス格点部の設計，土木学会論文集，No.489/I-27，pp.269-276，1994.4.
- 4) 谷上裕明，小野潔，徳永宗正，三好崇夫，西村宣男：動的解析における上路鋼トラス橋格点部のモデル化に関する一検討，鋼構造年次論文報告集，Vol.17，pp.459-466，2009.11.
- 5) (株)地震工学研究開発センター：EERC/Fiber User's Manual，2007.
- 6) 野中哲也，宇佐美勉，坂本佳子，岩村真樹：上路式鋼トラス橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp.531-542，2003.3.
- 7) 藤谷義信，藤井大地，野中哲也：パソコンで解く骨組の静的・動的・弾塑性解析，丸善，2000.3.