

トラス格点合理化構造の強度に関する一検討

A study on the strength of a new type smart truss gusset

保坂鐵矢*, 増田陳紀**, 磯江暁***

Hosaka Tetuya, Masuda Nobutoshi, Iseo Akira

*日本鉄道建設公団 設計技術室 (〒110-0014 東京都千代田区永田町 2-14-2)

**工博,武蔵工業大学 工学部土木工学科 (〒158-0087 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

***工博,川崎重工業 関東技研構造システム研究部 (〒278-8585 野田市二ツ塚 118)

The authors studied the strength of the new type truss gusset by experiment and analysis. To investigate the collapse mode of gusset plate, the thickness of the studied model was set at about 60% of actual one. And to make clear the stiffening effect of filling concrete, another model was examined whose box chord and box branch were filled with concrete. The collapse mode and stress distribution of gusset plate were discussed, including the effects of concrete to fill box members.

key Words: : truss bridge, gusset, concrete filled member

キーワード: トラス橋、ガセット、コンクリート充填部材

1. はじめに

トラス構造は鉄道橋として幅広く活用されており、また複線化、長径間化に伴い研究が進められてきた。トラス構造の場合は弦材と斜材、横桁が交差する格点部の処理が設計上重要であるが、本論文で合理化の前提として取り上げた4面添接形式についても、性能、安全性を確認するためのいくつかの先駆的な研究がある^{1~4)}。ここで著者らが提案している合理化とは、図1に示すようにガセット部を小型化したものであり、フィレット部を深く絞り込むことにより、小型で景観性の良い形式に改良できるという考えが基になっている。また、ガセット厚は一般に斜材フランジおよび弦材ウェブより厚い板が用いられているが、溶接構造であることを勘案して必ずしも適切な板厚が用いられているとは言えず、補強材等の設置などにより斜材フランジ並の薄板化が可能と考えられる。先年度、著者の一部は箱トラス格点部を小型化した合理化構造を提案し、解析により設計荷重を載荷した時の応力分布を明らかにし、同構造が実際の橋梁に適用可能であることをすでに確認している⁵⁾。本論文では、斜材の一方(引張り側)がH断面、他方(圧縮側)が箱断面である格点に対して同様の合理化構造を想定し、荷重載荷時の応力分布および耐力を実験および解析により明らかにした。

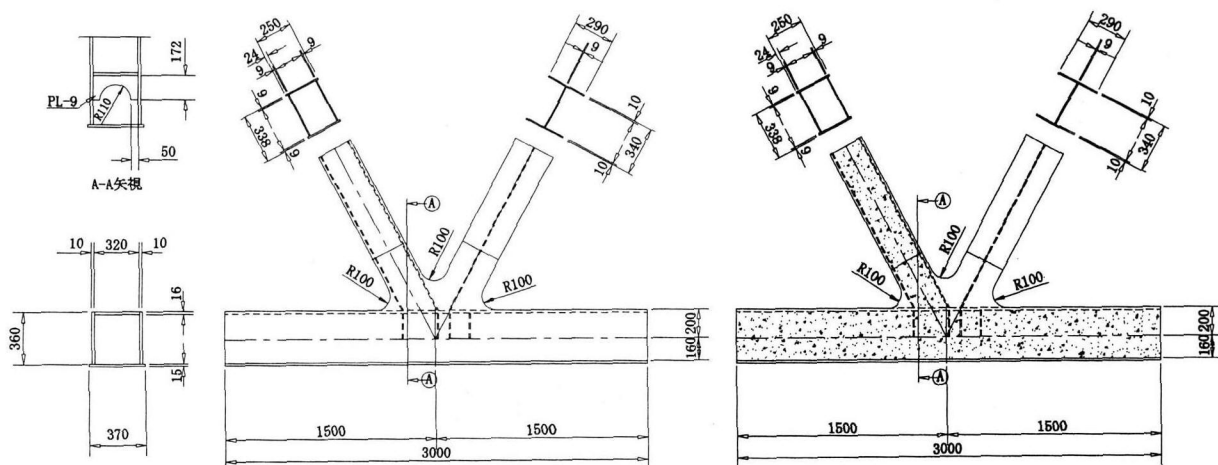
また、格点部の簡易な補強方法の一つとしてコンクリート充填による複合化があるが、弦材および斜材の箱断面内部にコンクリートを充填することにより、どの程度強度が改善されるかを、実験および解析により検討した。

2. 解析対象構造のモデル化と諸元

研究対象としたのは信濃川橋(3径間連続トラス橋、全長 208m)であり、従来の2面添接差込形式の格点を参考に合理化格点(図1(a)参照)を想定し、その強度を検討した。

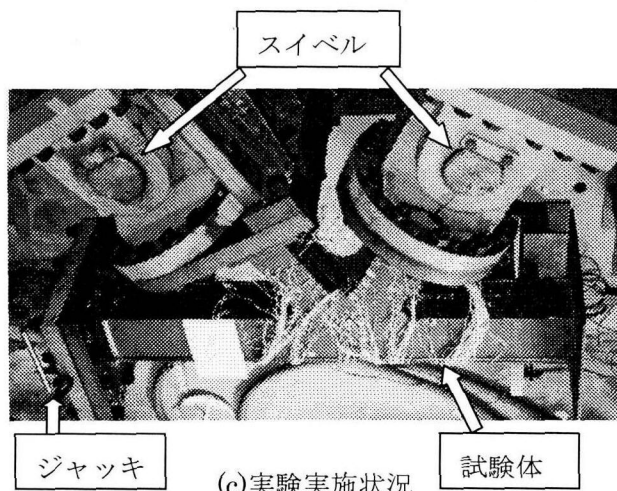
2.1 トラス格点に作用する力

3次元立体フレーム解析を行い着目格点における列車通過時の各部材断面力を求めた。解析結果と設計断面力を表1にまとめた。応力が高い側の斜材(引張り側)に発生する軸力は解析では800kN、列車通過に伴う変動軸力は647kNであり、またこの斜材断面を設計する際に用いられた軸力は906kNである。解析による軸力が小さいのは、フレームの自重以外の死荷重が明らかでなく、無視したためである。実験および解析では、取り出した格点部の弦材および斜材に一組のバランスした力を負荷する必要があり、表1下図に示すような組合せ荷重を採用した。



(a)コンクリート非充填モデル

(b)コンクリート充填モデル



(c)実験実施状況

図1 モデルと荷重状態

2.2 実橋相当モデルのFEM解析

合理化モデルに対して荷重載荷時の挙動を FEM により解析した。ただし、ガセット部の板厚は既存橋梁と同等の板厚の 15mm を用いている。解析の結果格点部は十分な強度を持っており、引張り側斜材が全断面塑性化するレベルまで荷重を上げて、格点部のほとんどの部分は弾性範囲に収まる結果となった。すなわち、崩壊はH断面斜材の全断面降伏によって生じる結果となった。

本研究の目的はガセット部およびその周辺の強度を調査する点にあるので、試験体を格点部で崩壊させるために、以降の研究では弦材ウェブ、ガセット部の板厚を 10mm まで薄くした。また前述したようにコンクリートの充填効果を調べるため、弦材内部および箱断面斜材内部にコンクリートを充填した場合に応力分布および崩壊モードがどのように変化するかを調査した。合理化モデルを図1に示す。

3. 実験および解析方法

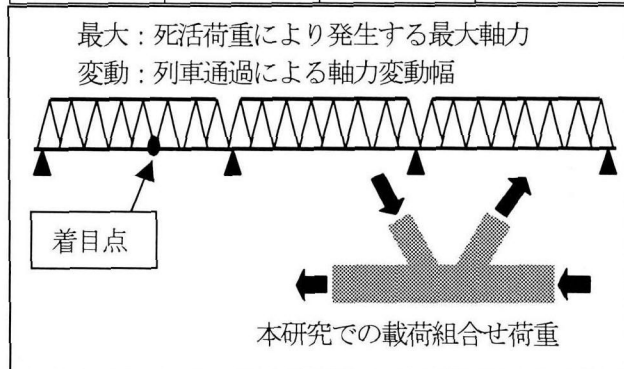
3.1 実験における荷重方法

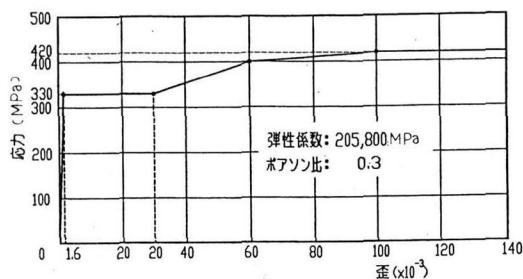
荷重治具および荷重試験器の能力を考慮して、モデルの縮尺は実機の 6/10 倍とした(ただし、板厚は弦材フランジを 9mm、それ以外 6mm とした)。荷重は、図 1(c)に示すように両斜材の端部をピン支持し、弦材の一方を引張る方法で行った。この方法により弦材を1の力で引張ると両斜材にも約1の圧縮および引張り力が導入され、全体がバランスする。荷重は以下のように4段階に分けて実施している。

- 第1ステップ: 0 → 250kN → 0
- 第2ステップ: 0 → 500kN → 0
- 第3ステップ: 0 → 1,000kN → 0
- 第4ステップ: 0 → 最終状態

表1 着目格点における各部材断面力(kN)

	設計断面力	列車荷重 (解析)	
		最大	変動
弦材 (左)	3,174	1297	1,078
弦材 (右)	2,430	823	781
斜材 (左)	-626	-544	430
斜材 (右)	906	800	647





(a) 鋼材



(b) コンクリート

図2 材料データ

模型に載荷する荷重は実機の約 1/3 に相当し、斜材に設計荷重相当の断面力 (906kN) を導入するためには約 325kN の引張り力を負荷すれば良い。

3.2 解析モデルと解析条件

解析に用いる材料特性は、材料試験を行うことにより決定した。図2に解析に用いた鋼板およびコンクリートの材料特性を示す。コンクリートの強度は約 3,000MPa であり、非線形性については弾塑性体として応力-歪関係を4本の折れ線で近似している。鋼とコンクリートとの付着は 100%とした。解析では実機相当のモデルを使用し、載荷面に対する対称性を考慮して 1/2 モデルを用いている。実験結果との比較を行う際には解析結果の値を相対比倍することにより調整した。

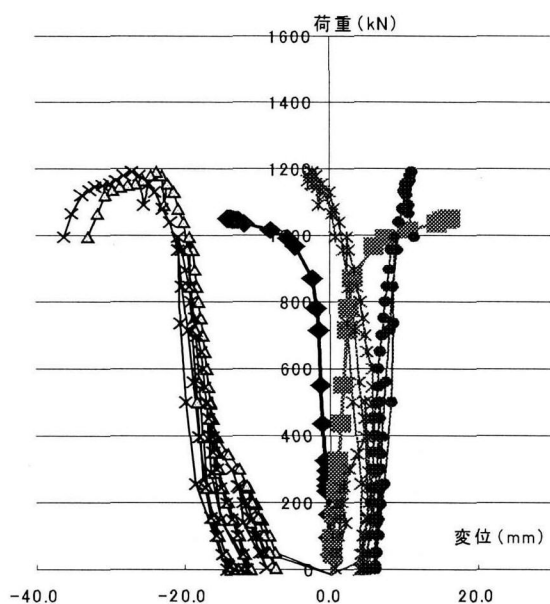
4. 実験および解析結果

4.1 最大耐力と崩壊モード

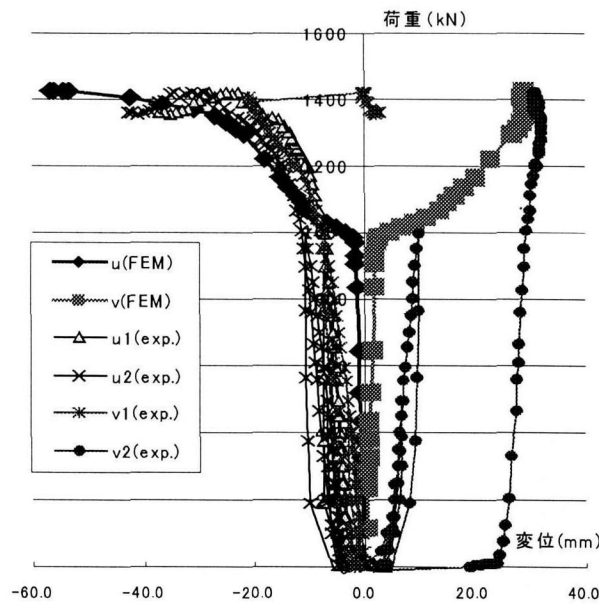
(1) 実験結果

図3に試験体の荷重-変位関係を示す。試験体は、載荷前の各部の応力が0となるように可能な範囲で調整したが、支持治具に遊びがあり、特にコンクリート非充填モデル (以後、非充填モデルと略す) は試験体に力が導入される以前にかなり変位している。このため、載荷の初期に応力が集中し塑性化した部分がある。最大耐力は非充填モデルで約 1,200kN、コンクリート充填モデル (以後、C 充填モデルと略す) で約 1,400kN であった。

図4,5に崩壊モードおよびガセット弦材部 (ダイヤフラム位置) の歪履歴を示す。非充填モデルの崩

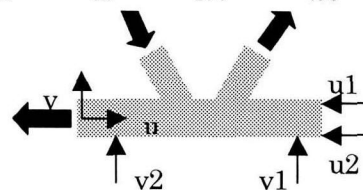


(a) 非充填モデル



(b) C 充填モデル

図3 荷重-変位関係 (実験および解析結果の比較)



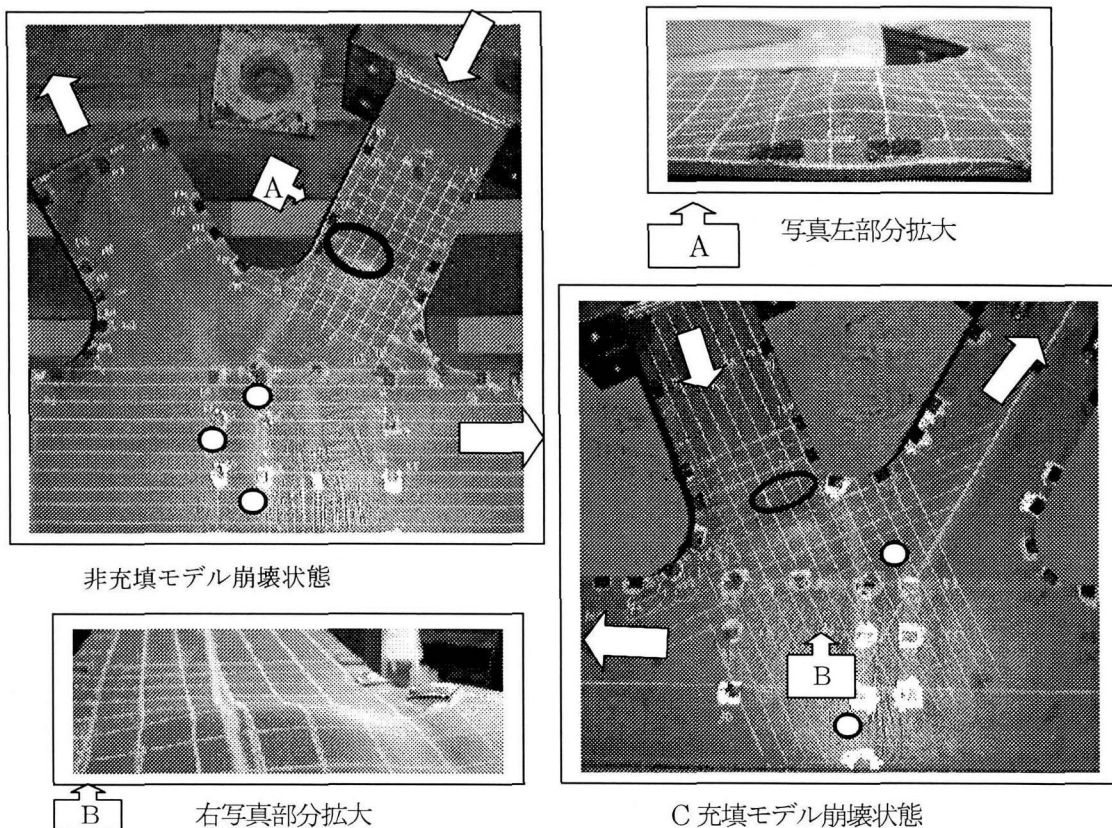


図4 試験体崩壊状況 ○：塑性化した計測点

壊状況を見ると、斜材の箱断面部分が座屈し、図では分かりにくい下フランジが若干S字形に塑性変形している。また、計測点 B2、B4、C3 が塑性化した (図 5(a))。同モデルは事前検討で計画したように、格点部の応力状態が厳しくなり、引張り側斜材 (H 断面) が全断面塑性化する以前に最大耐力に達し崩壊した。

C 充填モデルは、最大耐力付近で斜材の箱断面部分およびフィレット部が面外変形しており (外側に凸)、内部コンクリートは鋼板の座屈を防止するまでには至っていない。写真では分かりにくい、H 断面斜材は塑性変形によりかなり伸びている。図 5(b) の歪履歴を見ると、第 4 荷重ステップの 1,000kN を超えたあたりから剛性が高くなったような挙動が見られる。これは荷重 500kN を超えたあたりから塑性変形が急増し、1,000kN を超えたあたりからコンクリートの支持効果が増加するためと思われる。最大耐力は H 断面斜材の最大耐力 (約 1,400kN) とほぼ等しい結果となり、コンクリート充填により格点部が補強されたことが確認された。

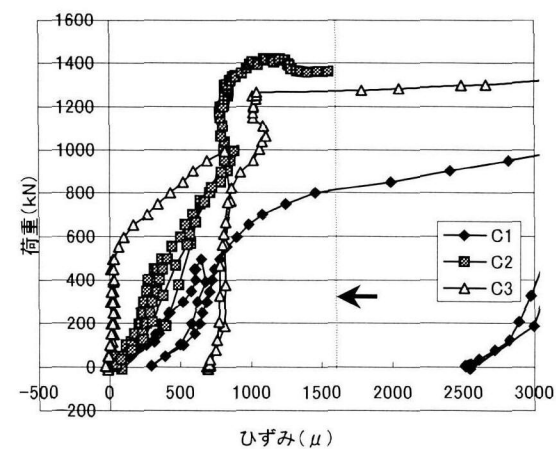
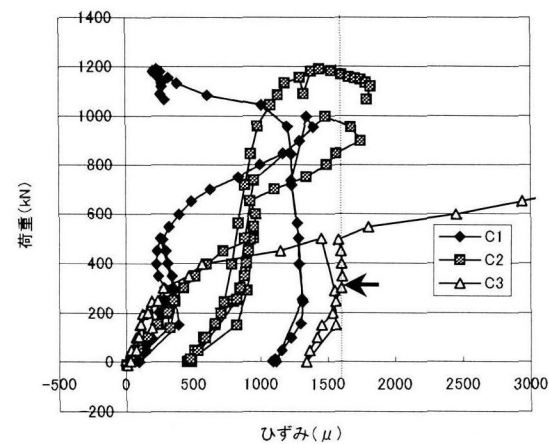
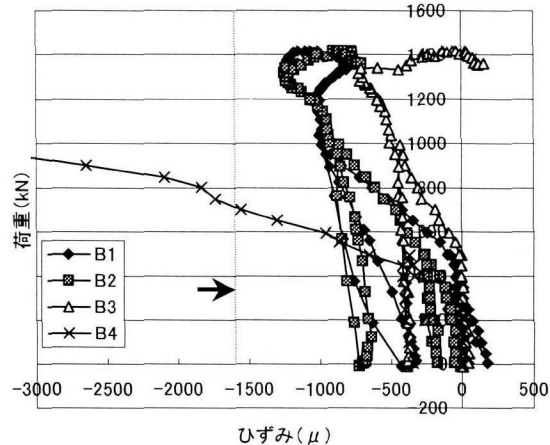
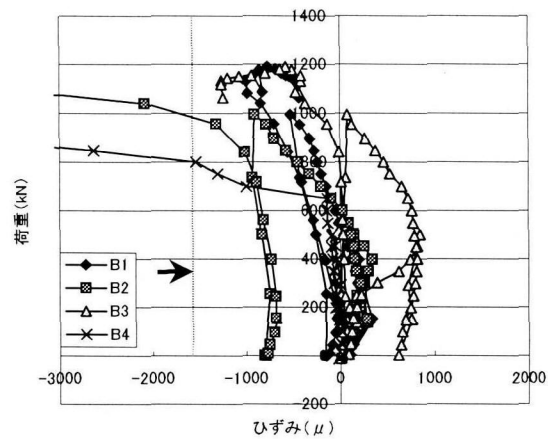
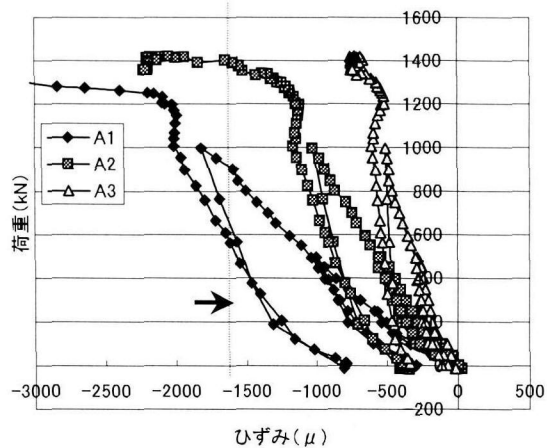
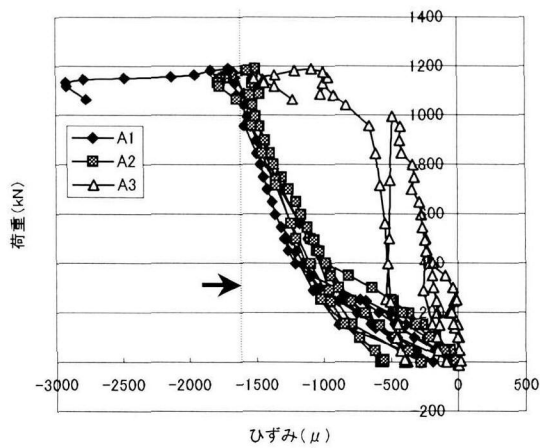
(2) 解析結果

図 3 に解析結果の荷重－変位関係を示した。非充填モデルは載荷荷重が 900kN を超えたあたりから変位が急増し、1,044kN に達した時点で解析が発散

した。C 充填モデルは同じく 900kN を越えたあたりから変位が急増するが、その後若干強度が回復し、最大耐力 1,440kN で引張り側の斜材が全断面降伏する。図 6 に変形状況および歪分布 (ミーゼス歪: σ_M/E) を示す。非充填モデルは、下弦材の左右がせん断により食違う変形をし (図 6(a))、斜材交差部のフィレットから弦材の下フランジまではほぼ垂直に歪の高い帯が生じる (図 6(d))。一方、C 充填モデルは引張り側斜材が塑性により伸び (図 6(b))、歪も引張り側斜材およびその付け根ガセット付近で高くなる。実験でも非充填モデルはガセット部の中央部付近に塑性変形が集中し、充填したコンクリートはこれを緩和する働きが見られた。

4.2 フィレット部の歪

フィレット部の歪分布を図 6 および 7 に示す。実験結果として示してあるのはフィレットに沿った方向の歪であり、解析結果は最小歪 ($\epsilon_{\min}$: 実線) および最大歪 ($\epsilon_{\max}$: 点線) である。フィレットに沿った部分ではフィレット直角方向の歪が小さいので、接線方向歪は引張り場合は最大歪、圧縮の場合最小歪と同程度になると考えられる。また、実験では荷重の載荷に伴い計測値が大きく変動するので、比較的挙動の安定している第 2 荷重ステップの除荷



(a)非充填モデル

(b)C充填モデル

← : 325kNレベル
(設計荷重相当)
点線 : 1,600 μ
(降伏点相当)

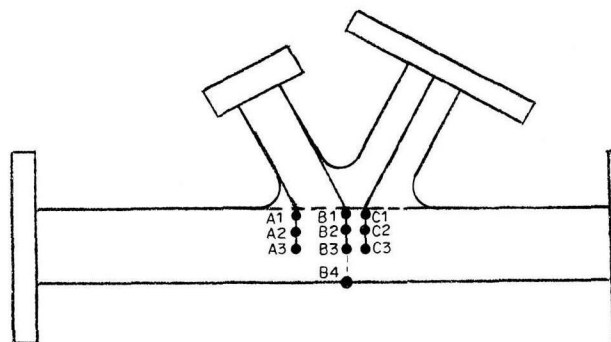


図5 ガゼット部の鉛直方向歪履歴(上面)

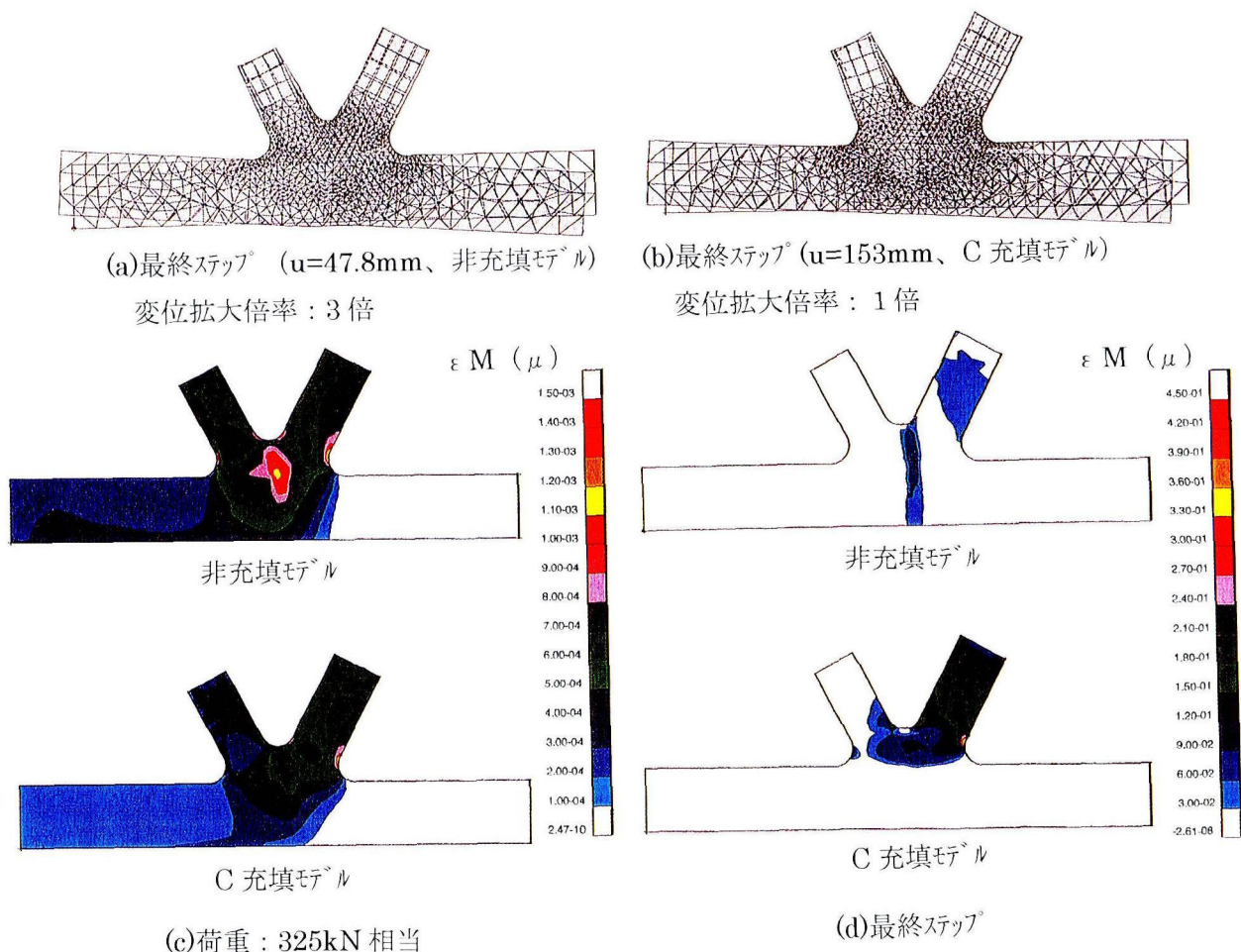


図 6 変位および歪分布（ミーゼス歪）（解析結果）

表2 フィット部の歪集中 (単位: μ)

		フィレット1	フィレット2		フィレット3
			左	右	
ε_0 鋼材一般部平均歪 (計算コンクリート無視)		-430	-430	544	544
$\varepsilon_{\max}$ C非充填					
	exp. 上面	-479 (1.11)	-586 (1.36)	964 (1.77)	—
	exp. 下面	-564 (1.31)	-388 (0.90)	684 (1.26)	305 (0.56)
	FEM	-875 (2.03)	-872 (2.03)	817 (1.50)	1,070 (1.97)
$\varepsilon_{\max}$ C充填					
	exp. 上面	-271 (0.63)	-383 (0.89)	599 (1.03)	667 (1.23)
	exp. 下面	-330 (0.77)	-435 (1.01)	616 (1.13)	401 (0.74)
	FEM	-431 (1.00)	-574 (1.33)	702 (1.29)	939 (1.73)

カッコ内は $(\varepsilon_{\max}/\varepsilon_0)$ ，図7参照

表3 斜材ウェブ下端の断面力 (単位: kN)

	NA	NB	NC
一般部(計算)	-98	-98	124
斜材ウェブ下端			
C非充填(exp.)	-35	-69	28
(FEM)	-47	-53	60
C 充填(exp.)	-47	-54	65
(FEM)	-51	-55	91

実験および解析における歪の最大値を、表2に整理した。実験結果は解析結果よりも小さいが、歪の分布図から判断して解析でピークとなる点の歪を計測していたら実験データの最大値は解析にもっと近づいたと考えられる。斜材に作用する断面力を「斜材の断面積×鋼のヤング率」で割って歪に換算した値（ ε_0 、以下平均歪と呼ぶ）を、表の上段に示した。また、実験および解析で得られた最大歪をこの平均歪で割り、歪集中の度合いを計算し、表中括弧内に記した。歪の集中度は非充填モデルでは箱断面斜材フィレット部で最大2.03倍、C充填モデルではH断面斜材フィレット部で最大1.73倍となった。実験および解析の結果からコンクリート充填の効果

過程データを参照し、500kNから175kNまでの荷重変化（325kN）に相当する歪増分を求めた。

解析では図6からも理解できるように、フィレット部R（曲線部）の始点と終点付近に応力集中が発生する。実験結果は計測点が約40mm間隔であり、必ずしも最大点を捉えているとは言えないが、解析と同様にRの始点と終点で歪が高くなる傾向が分る。

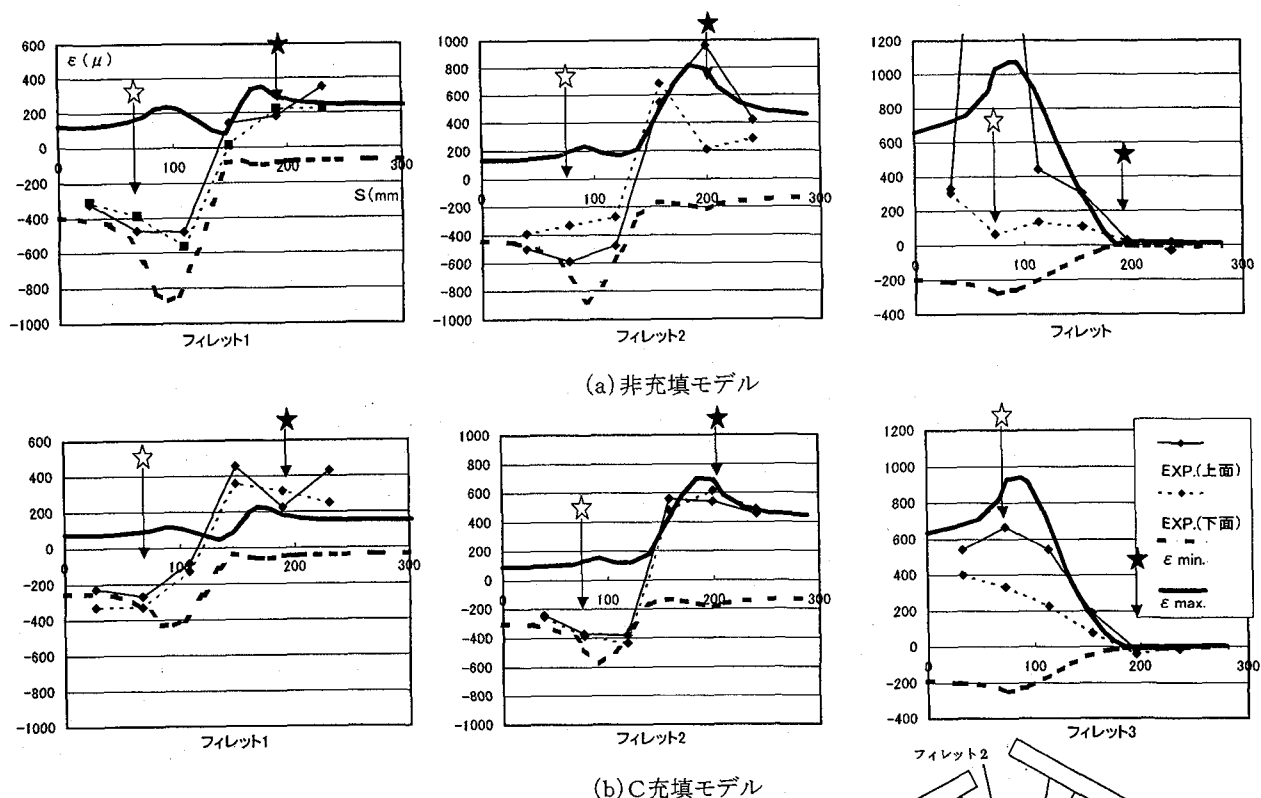


図7 フィット部の歪分布 (荷重; 325kN)
(☆, ★: フィットの曲線部の始点と終点)

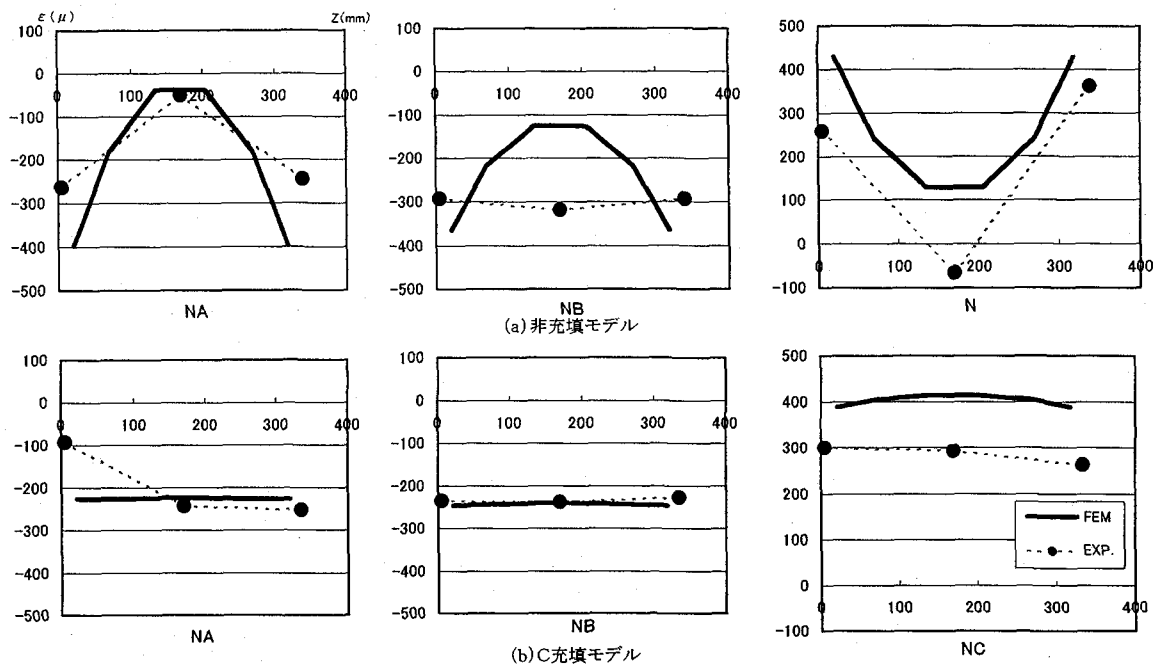
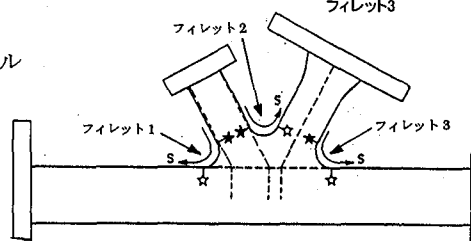
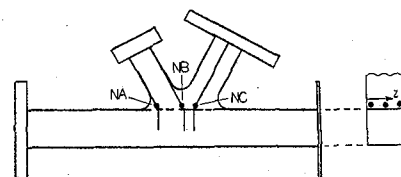


図8 斜材ウェブ下端の鉛直方向歪 (荷重; 325kN)



を検討すると、圧縮側斜材のフィレット応力集中はコンクリートを充填することにより明らかに減少しており、またコンクリートを充填していないH断面斜材においても幾分減少している。

4.3 弦材内ダイヤフラムの働き

斜材ウェブの下端は弦材内部のダイヤフラムと結合されており、この部分の歪を見ることからダイヤフラムに導入される力が理解できる。図8に斜材ウェブ下端の歪を示す。先に示したフィレット部の歪と同様、実験では第2載荷ステップの除荷過程から歪値を求めている。非充填モデルではウェブ中央で歪が小さく、ダイヤフラム中央部には力があまり伝達されていないことが理解できる。一方、C充填モデルはコンクリートを充填したことによりダイヤフラムが固定され、斜材ウェブをしっかりと支持しており、結果としてウェブ中央も両端同様の歪が生じている。

表3に、斜材ウェブの断面力を示す。表上段の「一般部の断面力」は、斜材に作用する軸力が断面に一樣に分布していると考えて各ウェブの分担力を計算したものである。「斜材ウェブ下端の断面力」は、実験、解析とも図8の歪分布から求めている。圧縮側斜材についてはコンクリート充填によってもそれ程変化がないが、引張り側斜材のウェブ断面力(NC)は実験結果、解析結果ともコンクリート充填によってかなり増加している。この影響は、前述した引張り側フィレット部の応力集中の緩和にも現れていると考えられる。

5. まとめ

以上の検討をまとめると、以下のようになる。

- ① 既存のトラス橋を対象に、2面添接差込形式の格点を4面添接角形式でかつフィレット部を絞り込んだ合理化格点に変更した場合の強度について検討した。ただし、ガセット部の板厚は10mmに縮小した(既存橋梁は15mm)。実験および解析の結果、合理化格点は十分な耐力を有しており、当該橋梁に採用可能であることが分った。また、ガセット板厚を小さくしたことにより格点はガセット部で崩壊したが、コンクリートを充填することにより補強し、引張り斜材が全断面降伏しても崩壊しないところまで強度を上げることができた。
- ② 合理化格点はフィレットR部(曲線部)の始点と終点で歪が集中することが解析から予想されたが、実験でもこの挙動が確認された。実験では計

測点数の制約から必ずしも歪のピーク値を取られなかったが、解析結果と合わせて検討し、フィレット部の最大歪は斜材一般部の歪(すなわち斜材断面の平均歪)の約2倍と思われる。また、箱断面斜材(圧縮側)フィレット部の応力集中はコンクリートを充填することにより著しく低下し、またコンクリートを充填していないH断面斜材(引張側)の応力集中も緩和された。

- ③ 合理化格点では斜材ウェブが弦材フランジに直接結合されており、斜材軸力の一部は弦材内部のダイヤフラムを介して弦材ウェブへと伝達される。ここで仮定したダイヤフラム寸法の場合、ダイヤフラム中央部は斜材ウェブを有効に支持していないことが、実験および解析により分った。ダイヤフラムの支持力を上げる一つの方法として高さを増やすことが考えられる。また、弦材内部にコンクリートを充填した場合、コンクリートがダイヤフラムの変形を拘束し、結果として斜材ウェブ支持力が上がることを確認した。

以上、合理化格点の有効性と特性を実験および解析により確認した。また、箱断面内部にコンクリートを充填した場合の補強効果が理解できた。実際に合理化格点をトラス橋に採用する場合はガセット部板厚の合理的な決定方法が重要になるが、ガセット部の応力分布、特にフィレット部の応力は、フィレット部R寸法、弦材内部のダイヤフラム寸法により変わるので、今後これらの影響を整理する必要があると考える。

参考文献

- 1)井口光男：曲線連続下路トラス橋の設計、構造物設計資料、No.73, pp.27-30, 1983
- 2)池内一雄、清水進、小島滋：3主構ダブルデッキワーレン型トラス鋼鉄道橋の設計・施工、橋梁と基礎、86-3, pp.1-9, 1986
- 3)保坂鐵矢：下弦材と鋼床版床組を一体化した低床式トラス、橋梁と基礎、93-8, pp.135-138, 1993
- 4)田島二郎、山本一之、柴田陽一、池内一雄、須賀武、山中浩：トラス格点部における4面添接形式ガセットの板厚に関する研究、構造物設計資料、No.88, pp.45-48, 1986
- 5)保坂鐵矢、堀地紀行、磯江暁：トラス格点部合理化構造の検討、構造工学論文集 Vol. 46A, pp.1353-1364, 1999

(2000年9月14日受付)