

座屈拘束部材を用いた損傷制御型トラス梁の加力実験

Loading Tests of Damage-controlled Truss Beam with Buckling Restrained Member

技術研究所	江頭 寛	HIROSHI EGASHIRA
技術研究所	川島 学	MANABU KAWASHIMA
技術研究所	原田 浩之	HIROYUKI HARADA
技術企画部	小坂 英之	HIDEYUKI KOSAKA
建築技術部	森岡 研三	KENZO MORIOKA
構造設計ディビジョン	和田 卓	TAKASHI WADA
構造設計ディビジョン	宮口 大	MASARU MIYAGUCHI

座屈拘束部材を用いた損傷制御型トラス梁の塑性変形能力を確認するために、トラス梁の加力実験を行った。試験体は従来型トラス梁の TRUSS1 と、損傷制御型トラス梁である TRUSS2, TRUSS3 の 3 体である。TRUSS3 は座屈拘束部材の周辺部材の変形追従性を向上させるために、座屈拘束部材直上の上弦材と斜材の接合部を半剛接合とした。加力実験の結果、TRUSS1 は部材角 $R=0.0125\text{rad}$ 近傍で圧縮側弦材に局部座屈が生じ、耐力が劣化した。一方、TRUSS2 と TRUSS3 は、 $R=0.02\text{rad}$ に至るまで安定した塑性変形能力を示し、個材の座屈は生じなかった。TRUSS2 は座屈拘束部材の周辺部材に軽微な損傷が見られたが、TRUSS3 の損傷は皆無であった。

キーワード： 平行弦トラス、座屈拘束部材、損傷制御、塑性変形能力

In order to confirm plastic deformation capacity of damage-controlled truss beam, loading tests of truss beam with buckling restrained member were conducted. The specimens are comprised of three models, one is normal type TRUSS1, the others are damage-controlled type TRUSS 2 and TRUSS3. TRUSS3 had a semi-rigid connection of diagonal and horizontal members just above the buckling restrained member to improve rotational deformation performance. As a result, TRUSS1 showed strength deterioration due to local buckling of the compression horizontal member in angle $R = 0.0125$ rad. TRUSS2 and TRUSS3 showed stable plastic deformation performance up to $R = 0.02$ rad, and no buckling was observed. TRUSS2 showed slight damage around the buckling restraint member, but TRUSS3 didn't show any damage.

Key Words: Parallel Chord Truss, Buckling Restrained Member, Damage Control, Plastic Deformation Capacity

1. はじめに

生産施設等の大空間構造を実現するにあたり、古くからトラス架構が用いられている。トラス架構は、長期荷重に対して合理的な設計が可能である。地震力に対しては、トラス梁の弦材の細長比および幅厚比を十分に小さくし、かつ、塑性化する弦材の区間長さのトラス梁全長に対する比を大きくした場合は、ある程度の変形能力が期待できることが明らかにされている¹⁾。しかしながら、トラス架構の終局耐力と変形性能は、トラス梁を構成する個材の座屈によって規定されるため、H形鋼梁などの

充腹材と同様に扱うことは困難である。したがって、現行の耐震設計では、トラス架構に靱性を見込まず、個材の座屈が生じる以前を限界状態と定義して架構の弾性設計を行うことが一般的である。

一方、トラスは軸力材によって構成されるため、軸力材の一部に応力制限機構を設けることで靱性を確保し、ひいては、塑性化部位を特定した損傷制御構造を実現することが可能である。これまでに応力制限機構としてせん断パネル²⁾や偏心接合部の塑性化³⁾、および二重鋼管などによる座屈拘束部材⁴⁾⁵⁾を利用し、トラス架構の塑性変形能力の改善が検討されている。

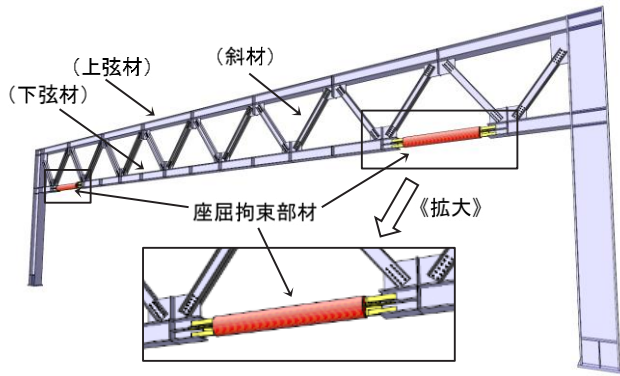


図-1 損傷制御型トラス梁の概要図

表-1 試験体一覧

試験体	タイプ	座屈拘束部材	上弦材接合部
TRUSS1	従来型	なし	剛接合
TRUSS2	損傷制御型	あり	剛接合(スチフナ補強)
TRUSS3			半剛接合

表-2 材料試験結果

部材	断面	材質	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)	
上弦材	フランジ	H-150x150x7x10	SN400B	306	444	43
	ウェブ			329	457	40
斜材	2C-75x40x5x7	SS400	312	478	33	
シアプレート	PL-12	SN490B	372	576	33	
ガセットプレート, スチフナ等	PL-9	SS400	370	464	38	
座屈拘束部材(心材)	t=16, w=80	SN400B	293 [※]	440 [※]	36 [※]	

※ミルシート値

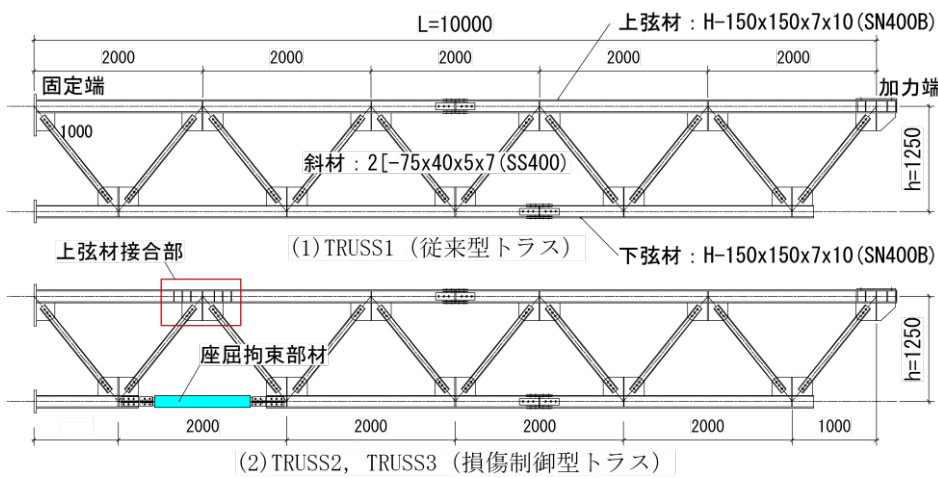


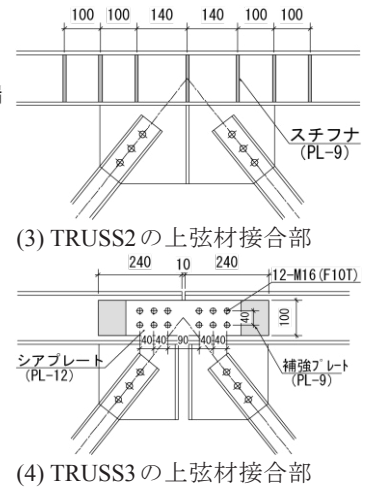
図-2 試験体図

本研究では、大スパンの平行弦トラス梁を対象とし、座屈拘束部材をトラス梁の固定端近傍の下弦材部分に用いた損傷制御型トラス梁(図-1)の耐力と塑性変形能力についての性能検証を行った。本報では、座屈拘束部材の有無および、座屈拘束部材の周辺部材の変形追従性に着目したトラス梁の加力実験について報告する。

2. 実験計画

(1) 試験体概要

試験体図を図-2に、試験体の一覧を表-1に示す。試験体はスパン40mのワーレントラス梁を対象にし、その半スパン部分を取り出して1/2に縮小した片持ち梁形状の平行弦トラスである。試験体右側の加力端に鉛直方向の集中荷重を作用させることで、対象としたトラス梁の地震時応力を再現する。試験体の固定端から加力端までの長さは、L=10mで、上・下弦材の重心位置間距離はh=1.25mである。弦材には、圧延H形鋼H-150x150x7x10(SN400B)を用い、対象としたトラス梁と同様に強軸が加力平面に直交するように配置した。斜材には溝形鋼



C-75x40x5x7(SS400)を2丁合わせて用いた。試験体は、個材の接合に偏心のない剛接トラスであり、弦材と斜材は、弦材のフランジに溶接したガセットプレートを介して高力ボルトで摩擦接合した。

試験体はトラス梁における座屈拘束部材の有無と、座屈拘束部材直上の上弦材と斜材の接合部(以下、上弦材接合部と呼ぶ)の固定度を実験要因としたTRUSS1, TRUSS2, TRUSS3の3体である。図-2(1)に示すTRUSS1は、座屈拘束部材を用いない従来型のトラス梁、図-2(2)に示すTRUSS2, TRUSS3は固定端から2番目の下弦材位置に座屈拘束部材を取り付けた損傷制御型のトラス梁である。

座屈拘束部材は厚さ16mm,幅80mmの心材(SN400B)を鋼管コンクリートにより被覆した構造になっている。座屈拘束部材の心材の軸降伏荷重は375kNである。心材降伏時の個材の存在応力に対する当該個材の座屈耐力の比(余裕率)を2.5程度確保し、個材に座屈が生じないように設定した。

TRUSS2とTRUSS3の変形概念図を図-3に示す。座屈拘束部材に心材の塑性化による軸変形が進行すると、同

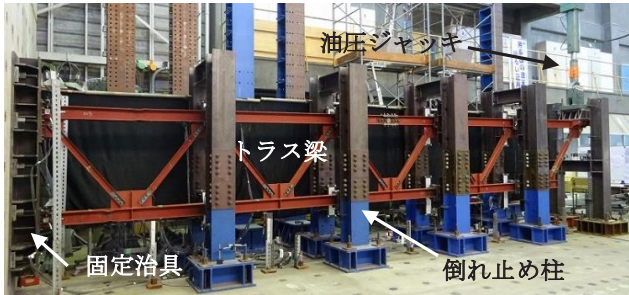
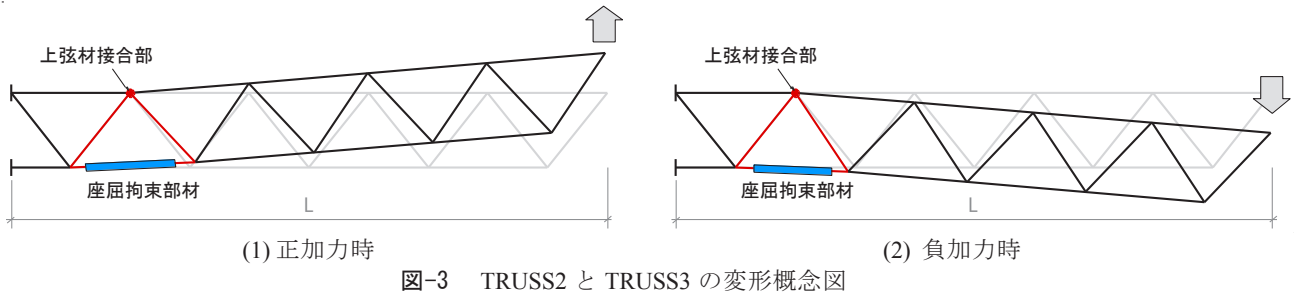
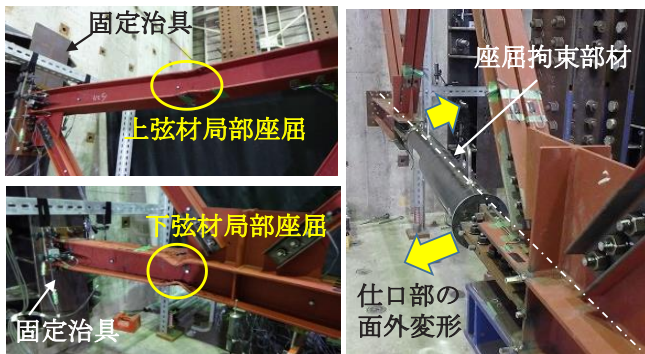


写真-1 加力状況 (TRUSS1)



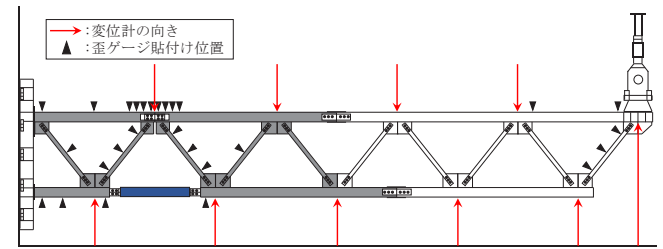
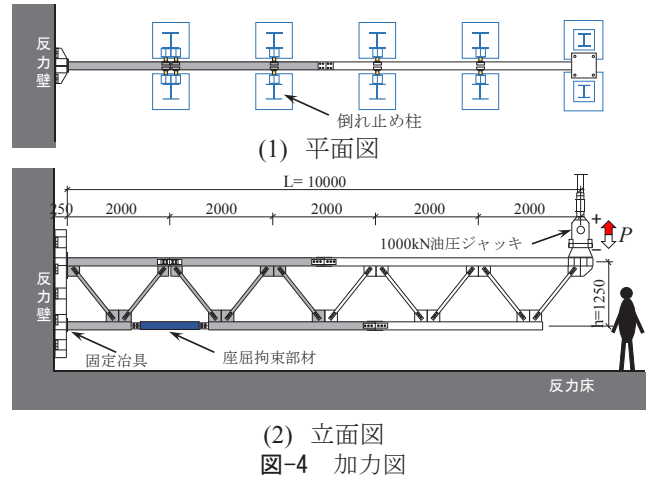
(1)TRUSS1 (2)TRUSS2

写真-2 加力終了後の損傷状況

図に示すように、トラス梁は上弦材接合部で折れ曲がる変形状態を示すため、当該部には相応の変形追従能力が求められる(例えば)。ここで、TRUSS2の上弦材接合部は、他の接合部と同様の剛接合とするが、図-2(3)に示すように、当該部をスチフナで補強するディテールとした。一方、TRUSS3は図-2(4)に示すように上弦材接合部を分離し、当該上弦材のウェブを、シアプレート(PL-12)を介して高力ボルト(12-M16)で摩擦接合する半剛接合のディテールとした。高力ボルトの締め付け方法はナット回転法とした。このとき、上弦材接合部のウェブの耐力不足を補うために、当該ウェブの両面に補強プレート(PL-9)を溶接する補強を行った。このように、TRUSS3の上弦材接合部はピン接合を模擬したディテールとし、TRUSS2と比較して変形追従性の向上を図った。トラス梁を構成する部材に使用した材料の引張試験結果を表-2に示す。

(2) 加力および計測方法

加力状況を写真-1に、加力図を図-4に示す。試験体は、



固定治具を介して反力壁に固定した。試験体と固定治具は弦材固定端に溶接したエンドプレートを通じて高力ボルトで接合した。試験体の先端に1000kNの油圧ジャッキを接続し、鉛直方向に静的な加力を行った。トラス梁の横補剛に関しては、図-4(1)に示すように、トラス梁の上弦材と斜材が交叉する全ての位置において倒れ止めの柱を設け、当該位置の上・下弦材の水平移動を拘束する方法を用いた。

加力方法は、油圧ジャッキの鉛直変位をスパンLで除した部材角を制御変位とした正負交番の漸増载荷である。加力サイクルのピーク値は、 ± 0.0025 、 ± 0.005 、 ± 0.0075 、 ± 0.01 、 ± 0.0125 、 ± 0.015 、 ± 0.02 radとし、各サイクルを2回ずつ繰り返す加力を基本とした。なお、最終加力サイクル後に加力が可能な場合は、ジャッキのストロークの限界に達するまで正側に加力した。

計測点の配置図を図-5に示す。計測項目は、トラス梁先端の鉛直荷重、同図に示す赤い矢印位置での鉛直変位、および各個材の▼位置のひずみであり、それぞれ油圧ジャッキに接続したロードセル、所定の位置に設けた変位

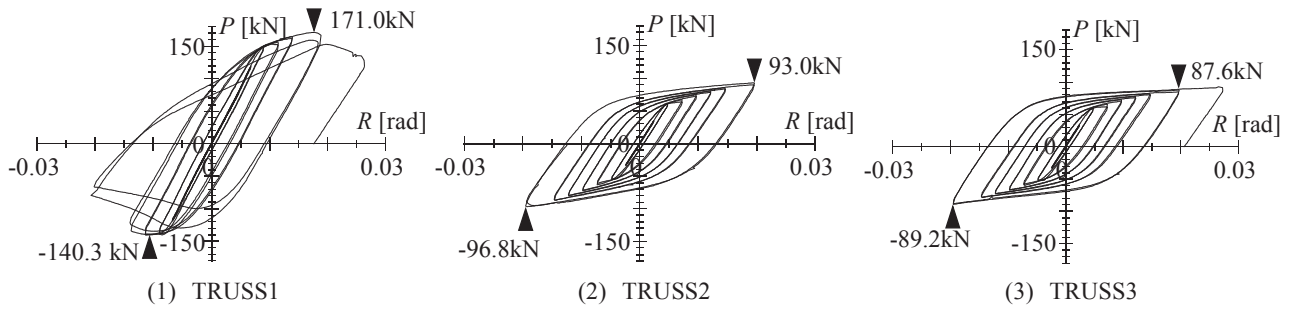


図-6 荷重 - 部材角関係

計，ひずみゲージで計測した。

3. 実験結果

(1) 加力終了後の損傷状況

写真-2に，加力終了後における各試験体の損傷状況をそれぞれ示す。同写真 (1) に示す従来型トラス TRUSS1 は，固定端部の上・下弦材のフランジに局部座屈を生じて崩壊に至った。上弦材接合部を剛接合とした TRUSS2 は，同写真 (2) に示すように座屈拘束部材両端の仕口部分がそれぞれ面外方向に折れ曲がるような変形を示したが軽微な変形であり，個材の座屈や座屈拘束部材の性能の低下は生じていない。また，座屈拘束部材の塑性化に伴って上弦材接合部に発生した付加曲げの影響により，当該部を跨ぐ上弦材に曲げ変形がわずかに残留した。一方，上弦材接合部を半剛接合とした TRUSS3 には，TRUSS2 のような座屈拘束部材の仕口部や上弦材の曲げ変形は生じず，個材の座屈はもとより目視確認できる損傷は生じなかった。

(2) トラス梁の荷重と部材角の関係

各試験体の荷重 - 部材角関係を図-6に示す。同図の縦軸は油圧ジャッキの鉛直荷重 P を，横軸は部材角 R を表している。また，図中の▲の点は， $R = \pm 2.0\%$ に至るまでの最大荷重点であり，それぞれの値を併記した。

従来型トラスである TRUSS1 は，図-6(1) に示すように $R = \pm 0.005\text{rad}$ まではほぼ線形弾性的な挙動を示した。その後の加力で剛性低下を生じたが， $R = \pm 0.01\text{rad}$ までは安定した履歴曲線を描いた。 $R = 0.0125\text{rad}$ 近傍で固定端部の下弦材に局部座屈が発生し，負側の最大荷重 - 140.3kN に達したところで耐力劣化が生じた。正側の加力は $R = +0.02\text{rad}$ 近傍で最大荷重 171kN に達した。この時点で固定端部の上弦材に局部座屈等の損傷は確認されなかったが，その後の加力で局部座屈を発生し，正負加力ともに耐力劣化が進行した。

一方，図-6(2),(3) に示した TRUSS2 と TRUSS3 の荷重 - 部材角関係は，安定したバイリニア型の履歴曲線を示

表-3 トラス梁の等価塑性変形倍率

	TRUSS1	TRUSS2	TRUSS3
正加力	0.9	6.6	5.6
負加力	0.2	6.5	6.1

した。両者ともに $R = \pm 0.005\text{rad}$ 近傍で座屈拘束部材が塑性化して剛性低下を生じ， $R = \pm 0.02\text{rad}$ に至るまで緩やかな耐力上昇を示した。 $R = +0.02\text{rad}$ における荷重は，TRUSS2 が 93.0kN，TRUSS3 が 87.6kN， $R = -0.02\text{rad}$ では，TRUSS2 が -96.8kN，TRUSS3 が -89.2kN となり，TRUSS1 の最大荷重の半分程度の値となった。これは座屈拘束部材が応力制限機構として機能したことを示すものである。なお，TRUSS2 の荷重の方が TRUSS3 より 1 割程度大きい理由は，TRUSS2 の上弦材接合部が剛接合であるため，この部分の曲げ抵抗分が付加されたものと考えられる。

(3) トラス梁の塑性変形能力

図-6に示した荷重 - 部材角関係の骨格曲線より求めたトラス梁の正負両加力における等価塑性変形倍率を表-3に示す。等価塑性変形倍率は， $R = \pm 0.02\text{rad}$ までの荷重 - 部材角関係を対象に，文献 8) に示された方法で求めた。

従来型トラス梁である TRUSS1 の等価塑性変形倍率は正加力が 0.9，負加力が 0.2 であり塑性変形能力に乏しい。一方，損傷制御型トラスである TRUSS2 の等価塑性変形倍率は正加力が 6.6，負加力が 6.5，TRUSS3 は正加力が 5.6，負加力が 6.1 である。いずれも正負両加力において同等な値であり，優れた塑性変形能力を示した。

(4) トラス梁の鉛直変位の分布

各試験体の座屈拘束部材周辺における弦材の鉛直変位分布を図-7に示す。同図の○印は，TRUSS2，TRUSS3 の座屈拘束部材の塑性化が始まる $R = \pm 0.005\text{rad}$ での変位分布を，●印は座屈拘束部材の塑性化が進んだ $R = \pm 0.01\text{rad}$ での変位分布を示している。同図 (1) に示した TRUSS1 の鉛直変位分布は，両部材角ともに滑らかな変形曲線を示した。その大きさは部材角に比例していることからおおむね弾性範囲内での変形曲線であるといえる。

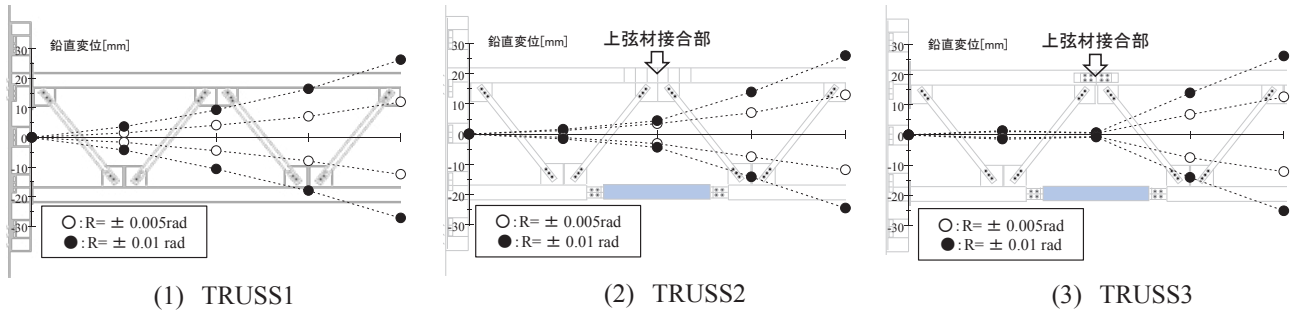


図-7 座屈拘束部材周辺における弦材の鉛直変位分布

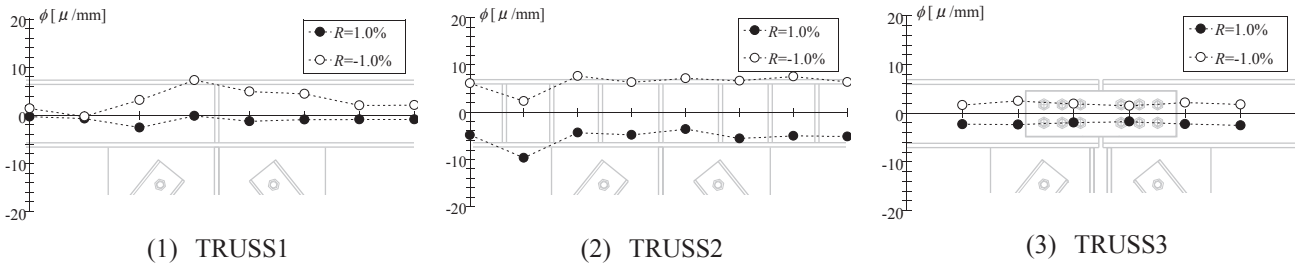


図-8 上弦材接合部近傍の弦材の曲率分布

一方、同図 (2) に示した TRUSS2 は、 $R = \pm 0.005\text{rad}$ では TRUSS1 とほぼ変わらないが、 $R = \pm 0.01\text{rad}$ になると上弦材接合部の位置を起点として折れ曲がる変形曲線を示した。これは、部材角が 0.005 から 0.01rad の間に座屈拘束部材の塑性変形が進行し、トラス梁の曲げ変形が上弦材接合部に集中したためであり、図-3 と同様な変形状態を裏付ける結果である。図-7(3) に示した TRUSS3 の鉛直変位分布も TRUSS2 と同様な傾向を示した。鉛直変位は固定端から上弦材接合部にかけてほぼ零であるが、上弦材接合部を起点に生じ、その値は直線的に増加している。これにより、TRUSS3 の上弦材接合部はピン接合的に挙動していることが分かる。

行したことにより、上弦材接合部に付加曲げが作用したことを示している。一方、TRUSS3 の曲率分布は全体的に小さく、●○印ともに TRUSS2 の半分以下の $\pm 2 \mu / \text{mm}$ 程度の値となっている。TRUSS3 の上弦材接合部は半剛接合のディテールであり、当該部の曲げ剛性は剛接合のディテールとした TRUSS2 と比較して小さい。これは TRUSS3 の上弦材接合部がピン接合的に挙動したため、その近傍の弦材に座屈拘束部材の塑性変形に伴う付加曲げ応力がほとんど生じなかったことを示しており、図-7(3) に示した変形状態とも対応している。

(5) 上弦材接合部近傍の弦材の曲率分布

各試験体の $R = \pm 0.01\text{rad}$ における上弦材接合部近傍の弦材の曲率分布を図-8 に示す。当該部の曲率は上弦材の上下フランジに貼付した歪ゲージの計測値の差分を弦材のせいで除して求めており、上端引張を正とした。

同図 (1) に示した TRUSS1 の $R = +0.01\text{rad}$ における曲率分布 (●印) はほぼ零であり、軸力材としてのトラスの特徴を示している。一方、 $R = -0.01\text{rad}$ における曲率分布 (○印) で、上弦材接合部中央の値がやや大きくなっているのは、同時点において生じた下弦材の局部座屈に伴って生じた応力変化の影響によるものと考えられる。いずれにせよ曲率は小さく、おおむね $\pm 5 \mu / \text{mm}$ 以内に納まっている。同図 (2) に示した TRUSS2 は比較的一定値の曲率分布となった。その値は●印で $-5 \mu / \text{mm}$ 程度、○印で $+8 \mu / \text{mm}$ 程度であり、全体として TRUSS1 よりも大きい。これは TRUSS2 の座屈拘束部材の塑性変形が進

4. まとめ

座屈拘束部材を用いた損傷制御型トラス梁の加力実験を行い、以下の知見を得た。

- ① TRUSS1 は、固定端部分の上・下弦材のフランジに局部座屈が生じて崩壊に至る損傷状況となった。TRUSS2 は、座屈拘束部材両端の仕口部に面外方向に折れ曲がるような変形を生じ、上弦材接合部に緩やかな曲げ変形が残留した。一方、TRUSS3 では座屈拘束部材以外に損傷を受けた部材がなく、靱性を確保しながらも応力制限機構により損傷を制御した。
- ② TRUSS1 の荷重 - 変形角関係は、 $R = \pm 0.01\text{rad}$ までは安定した履歴曲線を示したが、 $R = -0.0125\text{rad}$ 近傍で固定端部の下弦材に局部座屈が発生し、耐力劣化が生じた。一方、TRUSS2 および TRUSS3 は $R = \pm 0.005\text{rad}$ 近傍で座屈拘束部材が塑性化して剛性低下を生じ、 $R = \pm 0.02\text{rad}$ に至るまで緩やかに耐力上昇する安定した履歴曲線を示した。

- ③ TRUSS1 の等価累積損傷倍率は正加力が 0.9 , 負加力が 0.2 であり塑性変形能力に乏しい結果となった。一方, TRUSS2 の等価塑性変形倍率は正加力が 6.6 , 負加力が 6.5 , TRUSS3 は正加力が 5.6 , 負加力が 6.1 であり, 優れた塑性変形能力を示した。
- ④ TRUSS1 の弦材の鉛直変位分布は, 滑らかな変形曲線を示した。一方, TRUSS2 と TRUSS3 の鉛直変位分布は, 座屈拘束部材塑性化後に上弦材接合部の位置で折れ曲がる変形曲線を示した。その傾向は TRUSS3 のほうが顕著であり, TRUSS3 の上弦材接合部がピン接合的に挙動していることを確認した。
- ⑤ TRUSS1 の $R=+0.01\text{rad}$ における上弦材接合部近傍の弦材の曲率分布はほぼ零であり, 軸力材としてのトラスの特徴を示した。一方, TRUSS2 の曲率分布は $R=+0.01\text{rad}$ で $5 \mu / \text{mm}$ 程度となり, 付加曲げの影響を呈した。TRUSS3 は上弦材接合部がピン接合的に機能し, $2 \mu / \text{mm}$ 程度の小さな曲率分布となった。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鋼構造座屈設計指針, 2018.2
- 2) 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 今井一郎, 石原 直: セン断パネルを配置した偏心トラス梁の力学特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 560 号, pp.185-192, 1999.12
- 3) 鈴木敏郎, 今井一郎, 石原 直: 偏心接合した平面トラス梁の力学特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 519 号, pp.103-109, 1995.5
- 4) 多田元英: 応力制限機構を挿入した 2 層トラスの載荷能力に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 433 号, pp.103-112, 1992.3
- 5) 向 秀元, 渡辺 厚, 岩田 衛, 和田 章: トラス構造の靱性性能改善に関する縮小模型実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 448 号, pp.141-152, 1993.6
- 6) 藤本盛久, 和田 章, 佐伯栄一郎, 渡辺 厚, 人見泰義: 鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究, 日本建築学会 構造工学論文集, Vol.34B, pp.249-258, 1988.3
- 7) 吉敷祥一, 山田 哲, 竹内 徹, 鈴木一弁, 岡田健, 和田 章: 損傷を梁端下フランジの接合要素に限定する新しい鋼構造骨組 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 575 号, pp.113-120, 2004.1
- 8) 山田哲, 鄭景珠, 吉敷祥一: 繰り返し荷重を受ける鋼部材と鋼材の損傷の関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 603 号, pp.139-146, 2006.5