

(15) コンクリート充填H形鋼合成桁の耐荷性状に関する実験的研究

京田 英宏¹・佐藤 昌志²・岸 徳光³・竹原 智久⁴・澤田 純之⁵

¹正会員 (株)構研エンジニアリング 橋梁部 (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1番1号)
h.kyoda@koken-e.co.jp

²正会員 国土交通省 北海道開発局 建設部 道路維持課 課長 (〒065-8511 札幌市北区北8条西2丁目
札幌第一合同庁舎)
satou-m22ag@hkd.mlit.go.jp

³フェロー 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)
kishi@news3.ce.muroran-it.ac.jp

⁴正会員 (株)構研エンジニアリング 橋梁部 (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1番1号)
t.takehara@koken-e.co.jp

⁵正会員 室蘭工業大学研究員 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)
sawada@news3.ce.muroran-it.ac.jp

本研究では、市場性の高いH形鋼を用いたコンクリート充填合成桁の耐荷性状ならびに変形性状を把握することを目的として、充填コンクリートおよびスペーサーとしての高ナットの配置の有無をパラメーターとする供試体を製作し、静的4点曲げ載荷試験を実施した。検討の結果、以下の点が明らかとなった。
1) 高ナットの設置によりウェブの座屈変形が抑制され変形性能が向上する；2) 充填コンクリートにより上フランジとウェブの連成する座屈が抑制される；3) 断面分割法を用いることにより、各合成桁の初期剛性および終局耐力は概ね再現できる；4) 2本のH形鋼で成形される上下の鋼箱形断面材間の合成状態は最大荷重時まで保持される。

Key Words : composite box shape girder, load-carrying capacity, multi-section method

1. はじめに

近年、鋼とコンクリートという対照的な材料の長所を生かした合成構造や混合構造（併せて複合構造と呼ぶ）への取組みが盛んに行われている。その代表的な構造の1つにコンクリート充填鋼管構造があり、橋脚等に広く用いられている。著者らは、このコンクリート充填鋼管構造に着目し、力学的に優れ汎用性にも富む主桁構造として、市場性の高いH形鋼を用いたコンクリート充填合成桁（以下、充填H形鋼合成桁）を提案した。

図-1には、提案の充填H形鋼合成桁について示している。本構造は、H形鋼のフランジ部分をグループ溶接して箱形断面状に成形し、それを上下に重ねて高力ボルト接合により鋼桁を形成するもので、圧縮域となる箱形断面内にコンクリートを充填する複合構造である。本構造は、H形鋼の組み合わせにより充填領域の変更が可能

であり、汎用性の高い構造形式となっている。また、コンクリートを充填することにより、圧縮側フランジやウェブの座屈抵抗力の向上も期待できる。

本論文では、提案の充填H形鋼合成桁に対して、充填コンクリートやスペーサーとしての高ナットの配置の有無を変化させた場合の耐荷性状や変形性状を把握することを目的として、静的4点曲げ載荷試験を実施した。

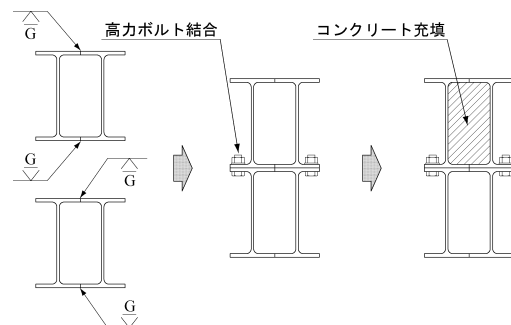


図-1 充填H形鋼合成桁

2. 実験概要

(1) 供試体概要

表-1 には、本実験に用いた供試体一覧を示している。供試体は、充填コンクリートの有無、高ナットの配置の有無を組み合わせた4体である。ここで、鋼桁上段の充填コンクリートには、供試体の内空が狭小であるため、充填性を考慮してモルタルを用いることとした。また、高ナットはウェブのはらみ出し抑制効果を期待したものである。

供試体名の SN はコンクリート未充填の鋼桁、SC は充填鋼桁を表している。また、-H、-N は高ナットの配置の有無を表しており、それぞれ有、無を意味している。図-2、図-3 には、供試体断面図および側面図を示している。本実験では、載荷装置の性能を考慮し、鋼桁部には断面寸法 200×100×5.5×8 の一般構造用圧延 H 形鋼 (SS400) 4本を使用して2つの箱形断面状に成形し、それを上下に高力ボルト接合することにより、桁高 400mm、フランジ幅 200mm、純スパン 4,800mm とした。なお、支点部には局部座屈を防止するために垂直補剛材を設けている。表-2、表-3 には、H 形鋼の鋼材検査証明書に記載されている引張試験結果とモルタルの圧縮試験結果を示している。

表-1 供試体一覧

供試体名	純スパン (mm)	桁高 (mm)	充 填 モルタル	高ナット
SN-N	4,800	400	—	—
SN-H			—	○
SC-N			○	—
SC-H			○	○

表-2 H形鋼の引張試験結果
(鋼材検査証明書より)

降伏点 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	伸び %
316	457	31

表-3 モルタルの圧縮試験結果

圧縮強度 N/mm^2	弾性係数 N/mm^2	ポアソン比
45.1	8.76E+03	0.232

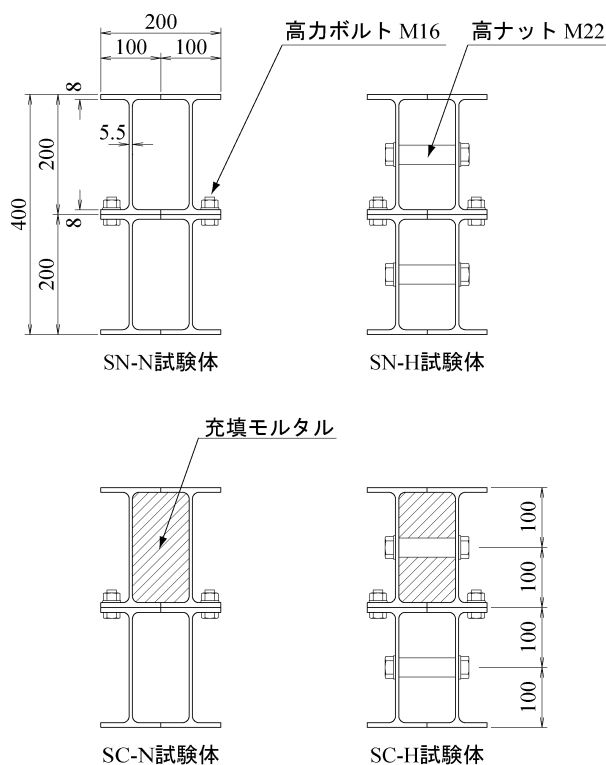


図-2 供試体断面図

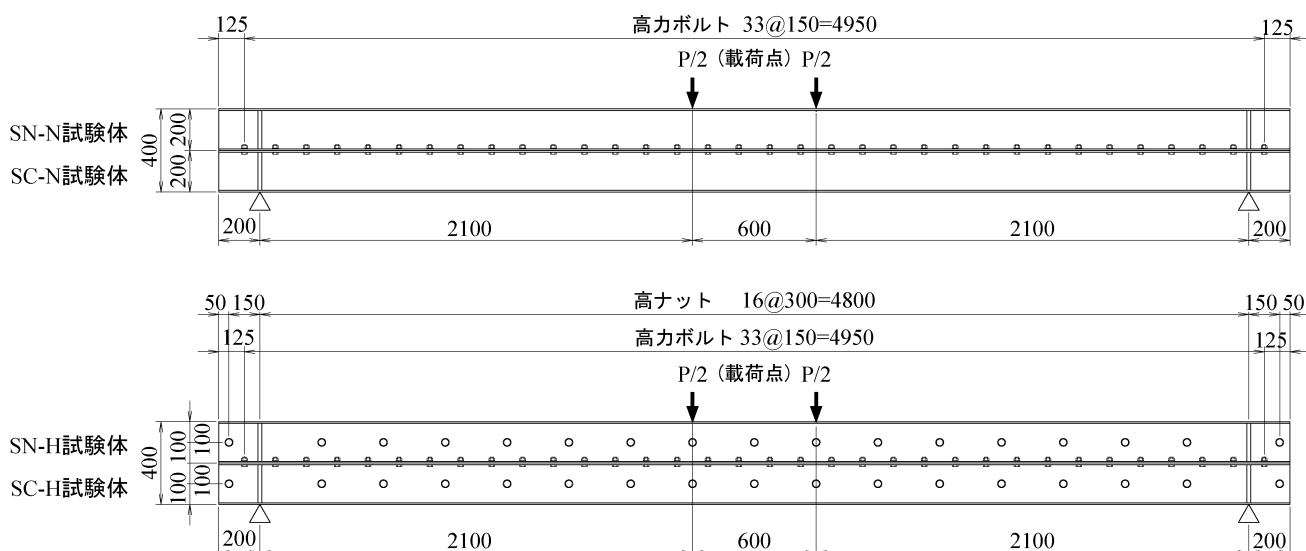


図-3 供試体側面図

(2) 実験方法

実験は、図-3 に示しているように、せん断スパンを 2,100mm、荷重点間隔を 600mm とする 4 点曲げ荷重試験法に基づき実施した。写真-1 には、供試体 SN-N の荷重状況を示している。本実験では、油圧ジャッキの最大ストローク長（150mm）を考慮して、スパン中央点の増分変位が 50mm に至った時点で除荷を行い、荷重装置を残留変位分だけ下げて荷重を行う工程を繰り返すこととした。本研究では、各供試体に関する最大荷重および最大荷重到達以降の変形状態の確認を行っている。なお、荷重装置の性能および実験の安全性を考慮し、スパン中央点における変位量が 250mm を越えた場合には、実験を終了している。

計測項目は、荷重荷重および支点反力（ロードセルにより計測）、鋼桁のたわみ（レーザー式変位計により鋼桁下面中央位置で計測）、鋼桁のひずみ（ひずみゲージにより計測）とした。なお、供試体 SN-H および SC-H に関しては、鋼桁のひずみ計測点が限定されるため、本論文では、等曲げ区間内において高ナットが配置されていない、スパン中央点から 150mm 離れた断面におけるひずみ分布について考察を行うこととする。図-4 には、ひずみ計測位置を示している。

3. 実験結果

(1) 座屈状況および変形状況

写真-2 には、実験終了後における各供試体の荷重点

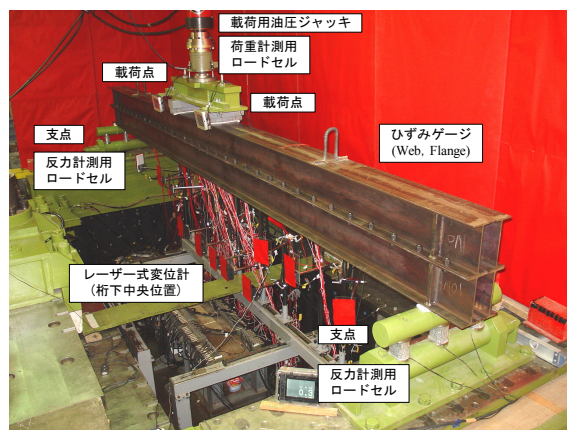


写真-1 荷重状況

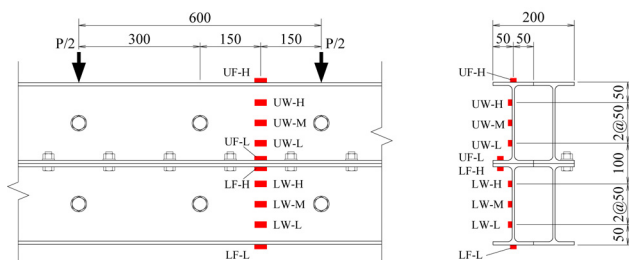


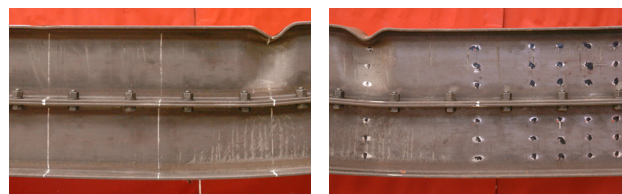
図-4 ひずみ計測位置

前背面の座屈状況を示している。モルタルが充填されていない供試体 SN-N および SN-H に関しては、荷重点の上フランジが変形しており、これに対応してウェブも局部座屈していることが確認できる。ここで、高ナットが設置されていない供試体 SN-N では、前背面ともにウェブが内空側に座屈しており、高ナットが設置されている供試体 SN-H では、高ナットが前面に押し出されるようにウェブが座屈している。

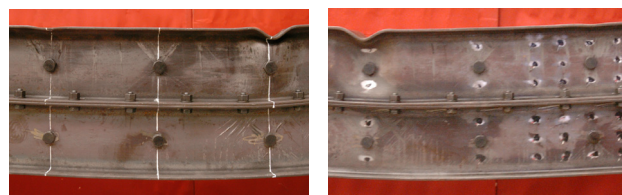
モルタルが充填されている供試体 SC-N および SC-H に関しては、スパン中央点の変位量が 250mm を越えたため、終局状態に至る前の座屈状況を示している。荷重点の上フランジは変形しているものの、充填モルタルによりウェブ部の座屈変形が抑制されていることが分かる。

写真-3 には、各供試体前面の最終変形状況を示している。モルタルが充填されていない供試体 SN-N および SN-H に関しては、荷重点直下の局部座屈に伴い桁の変形状態は左右非対称となっている。しかしながら、モルタルが充填されている供試体 SC-N および SC-H の場合には、ウェブに顕著な局部座屈が発生せず、対称な変形状態を呈している。

なお、本実験を通して、何れの供試体においても高力ボルトの破断および溶接部の破損は確認されていない。



(a) SN-N 試験体 (前面, 背面)



(b) SN-H 試験体 (前面, 背面)



(c) SC-N 試験体 (前面, 背面)



(d) SC-H 試験体 (前面, 背面)

写真-2 最終座屈状況

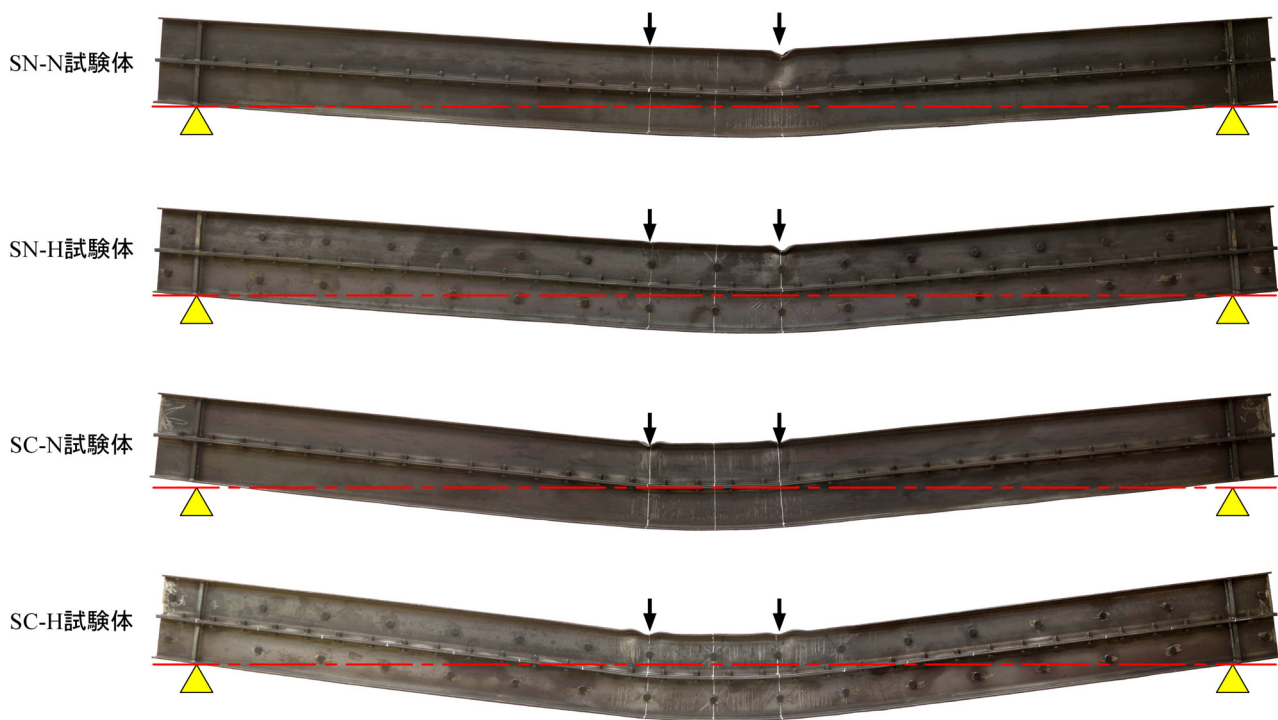


写真-3 最終変形状況（前面）

(2) 載荷荷重－変位関係

図-5 には、スパン中央点の変位を用いた荷重－変位関係（以下、単に荷重－変位関係）を、断面分割法により算出した解析値と併せて示している。また、表-4 には、最大荷重と残留変位を示している。

図より、何れの供試体においても、第1載荷サイクルにおいて上下鋼箱形断面部材の接合面のずれに伴う荷重降下が見られるものの、直に復帰して載荷状態になっていることが分かる。また、除荷勾配と再載荷勾配は、何れの供試体も大略一致しており、第1載荷サイクルに生じた荷重降下も見られない。これは、接合面のずれがボルトによって阻止され、支圧接合的な特性を示していることを暗示している。

モルタルが充填されていない供試体について比較すると、供試体 SN-N は変位 50mm 前後で最大荷重を示しているのに対して、供試体 SN-H は 100mm 前後で最大荷重を示しており、SN-H は SN-N よりも高い変形性能を示している。これは、高ナットによりウェブの局部座屈が抑制されたことによるものと推察される。一方、モルタルが充填されている供試体は何れも高い変形性能を示しており、充填モルタルによる上フランジとウェブの連成座屈に対する抑制効果によるものと考えられる。なお、供試体 SC-H の場合には供試体 SC-N と比較して早期に降伏する傾向を示している。これは、供試体 SC-H には狭小な箱形断面内空に対して更に高ナットが設置されているため、モルタルの充填性等に影響があったことによ

るものと推察される。

次に、各供試体の最大荷重について見ると、高ナットの配置の有無による有意な差は見られないが、モルタルの充填により 20%程度の向上が確認できる。

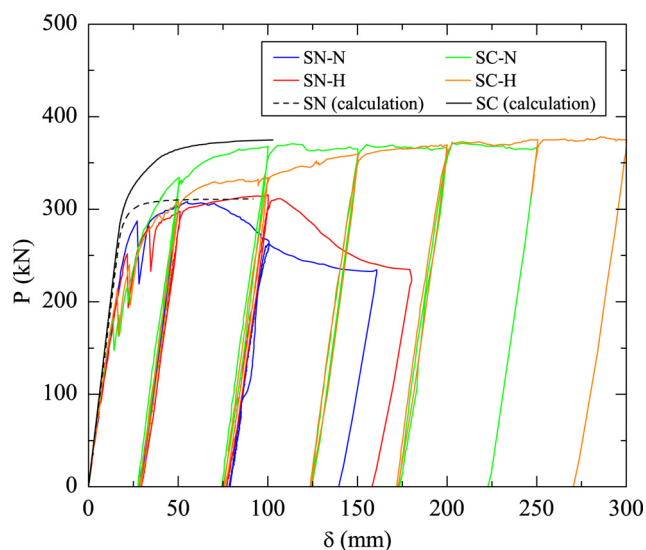


図-5 載荷荷重－変位関係（スパン中央点）

表-4 最大荷重と残留変位

供試体名	最大荷重 kN	残留変位 mm
SN-N	308	140
SN-H	315	158
SC-N	372	223
SC-H	378	270

(3) 断面分割法による解析値との比較

実験結果を検証するため、断面分割法による非線形解析を実施した。図-6 には、要素分割状況を示している。また、図-7 には、本解析に用いた応力-ひずみ関係を示している。材料物性値については、上述の材料試験結果を基に規定している。なお、鋼材の弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ としている。また、モルタルの応力-ひずみ関係については、圧縮試験結果が一般的なコンクリートとは異なることから、バイリニア型モデルで規定した。鋼材については、降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型モデルとしている。

図-5 に示している荷重-変位関係について実験値と解析値を比較すると、何れの供試体も初期剛性と最大荷重については概ね一致しているものの、降伏性状については変位の増加に伴い、実験値は解析値から次第に乖離して行く傾向にあることが分かる。これは、断面分割法では上下鋼箱形断面材の接合面および鋼材とモルタルの境界面を一体と仮定していることに起因しているものと推察される。したがって、降伏性状を正確に再現するには、鋼箱形断面材の接合面や鋼材と充填モルタルの境界面を考慮した解析が必要であるものと考えられる。

(4) 断面内ひずみ分布

図-8 には、各荷重時におけるスパン中央点から 150mm の断面における断面内水平方向ひずみ分布を示している。ここでは、(i)弾性域、(ii)鋼箱形断面材間のずれによる荷重降下時、(iii)ずれの停止直後の荷重再上昇時、(iv)最大荷重時についての断面内ひずみ分布を選定している。

(i)弾性域においては、何れの供試体もひずみ分布は直線状に分布しており、平面保持の仮定が成り立つ完全合成状態にあることが分かる。

(ii)荷重降下時、(iii)荷重再上昇時について確認すると、ひずみは何れの供試体も鋼箱形断面材の接合面を挟んで折れ線状に分布している。また、接合面近傍のひずみ分布は荷重再上昇後も変化が見られない。したがって、鋼箱形断面材間のずれ発生後については、平面保

持の仮定が成立しない不完全合成桁の状態にあることが分かる。なお、供試体 SC-N および SC-H では、モルタルが充填されている圧縮域においてひずみ分布が直線状を示しており、鋼箱形断面材と充填モルタルが一体に挙動していることが推察される。

(iv)最大荷重時を見ると、何れの供試体も上下フランジとその近傍のウェブが降伏状態にあるが、高ナットが設置されている供試体ではウェブ部のひずみレベルがフランジ部よりも抑えられていることが分かる。また、鋼箱形断面材の接合面近傍におけるひずみ分布は、(ii)荷重降下時から変化が見られないことから、接合部の合成状態が保持されていることが確認できる。

(5) 載荷荷重-ひずみ関係

図-9 には、各供試体のスパン中央点から 150mm の断面における載荷荷重-水平方向ひずみ関係を示している。ここでは、第 1 載荷サイクルである変位 50mm までを対象としている。

何れの供試体も上下鋼箱形断面材間のずれが発生するまでは、ひずみは荷重に比例して増加し、その後、下フランジが最初に降伏に達している。また、載荷初期の段階では、桁高中央部の UF-L におけるひずみがほぼ 0 を示しており、中立軸がこの位置にあることが分かる。しかしながら、モルタルが充填されていない供試体では、上下鋼箱形断面材間のずれが生じるまで中立軸が動かないのに対して、充填されている供試体では、中立軸が上方に移動している。この現象は、充填モルタルの引張破壊の進展によるものと推察される。

高ナットが設置されていない供試体について見ると、最大荷重付近で上フランジとその近傍のウェブが同時に降伏しており、上フランジとウェブの連成した座屈変形が発生したものと考えられる。しかしながら、高ナットが設置されている供試体では、上フランジ近傍のウェブの降伏が抑えられており、高ナットの効果が確認できる。

また、何れの供試体においても、上下鋼箱形断面材間のずれが生じる際のひずみの挙動は、概ね接合面に対して上下対称であることが確認できる。

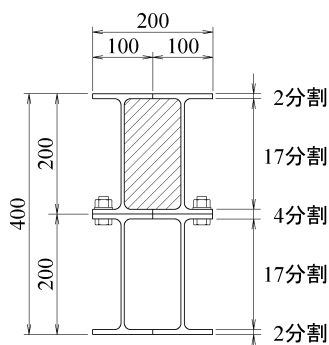


図-6 要素分割状況

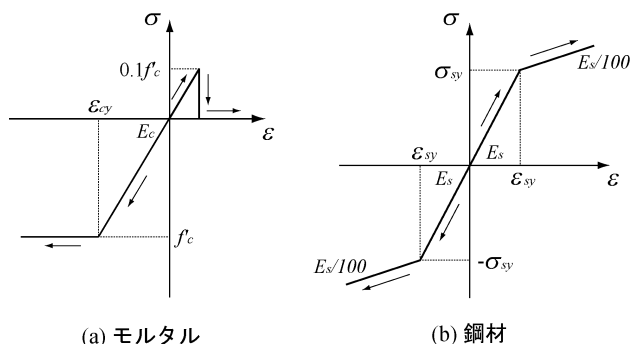
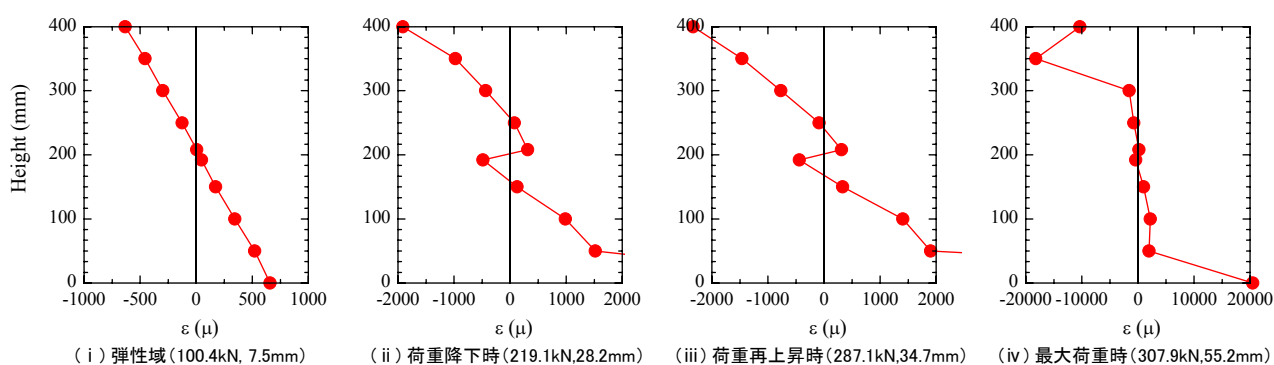
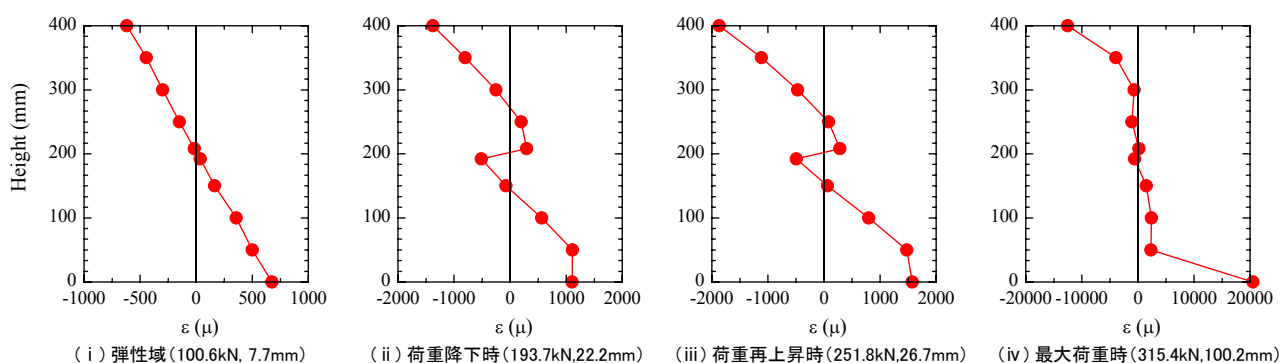


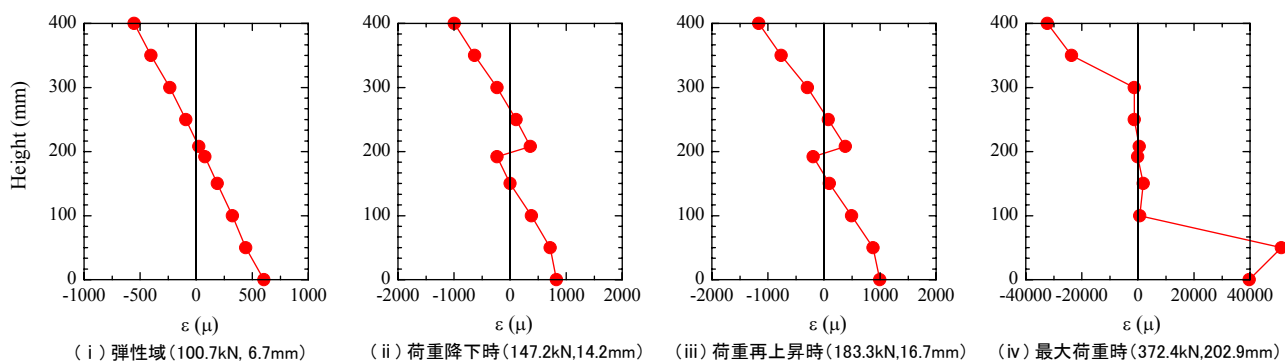
図-7 応力-ひずみ関係



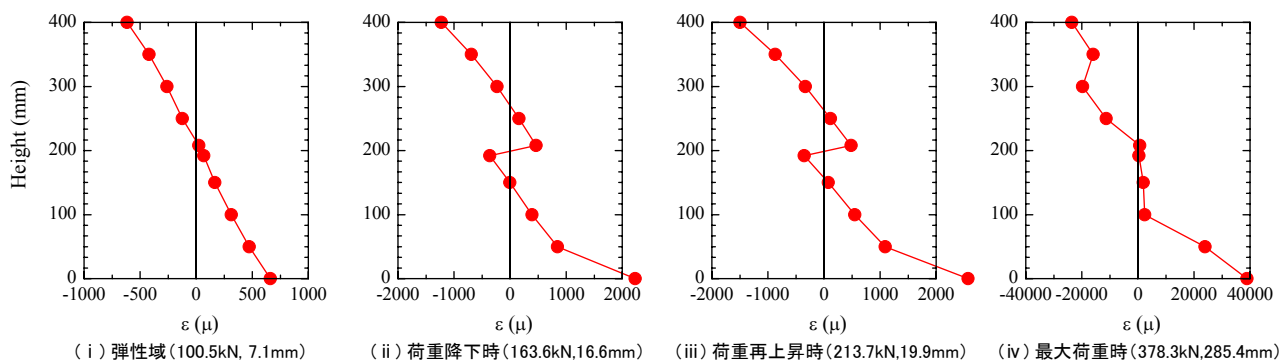
(a) SN-N 試験体



(b) SN-H 試験体



(c) SC-N 試験体



(d) SC-H 試験体

図-8 各供試体の断面内水平方向ひずみ分布 (スパン中央点から 150mm の断面)

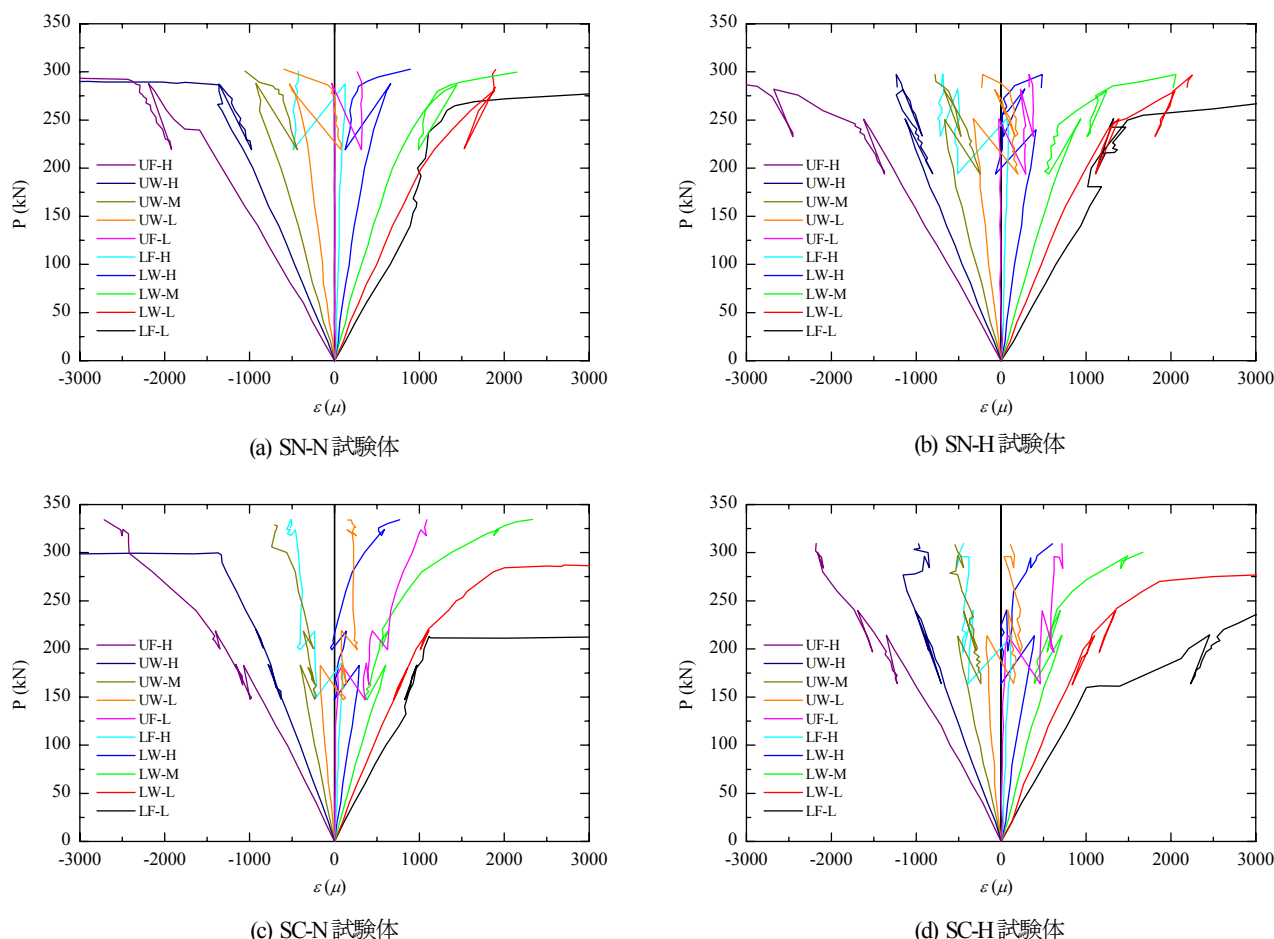


図-9 各供試体の載荷荷重－水平方向ひずみ関係（スパン中央点から150mmの断面）

4. まとめ

本論文では、提案の市場性の高い H 形鋼を用いて造られる鋼箱形断面合成桁に関して、充填コンクリートやスペーサーとしての高ナットの配置の有無を変化させた場合における耐荷性状ならびに変形性状を把握することを目的として、静的4点曲げ載荷実験を実施することにより検討を行った。本実験により得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) モルタルが充填されていない場合には、高ナットの設置によってウェブの座屈変形が抑制されるため変形性能は向上するが、終局耐力への影響は見られない。
- 2) モルタルが充填されている場合には、未充填の場合に比べて終局耐力が 20%程度増加することを確認した。また、上フランジとウェブの連成座屈が抑制され、局部座屈強度が増加する。
- 3) 荷重－変位関係に関して、実験値と断面分割法による解析値を比較した結果、初期剛性および終局耐力は概ね一致することを確認した。なお、降伏性

状の再現については、上下鋼箱形断面材の接合面や鋼材と充填モルタルとの境界面を考慮した解析が必要と考えられる。

- 4) 上下鋼箱形断面材間のずれに伴い発生する接合面近傍のひずみ分布が最大荷重時まで一様であることから、接合部の合成状態が保持されていることが明らかとなった。

なお、実橋への採用に際しては、H形鋼溶接部の疲労等についての課題を有しているが、この点に関しては今後の研究課題としたい。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造物の性能照査指針（案），2004。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002。
- 3) 川田忠樹：複合構造橋梁，技報堂出版，1994。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III鋼橋編，2002。
- 5) 竹原智久，京田英宏，佐藤昌志，岸徳光：H形鋼を用いたコンクリート充填合成桁の耐荷性状に関する実験的研究，土木学会第60回年次学術講演会論文集，CD-ROM，2005。

AN EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD-CARRYING BEHAVIOR OF COMPOSITE BOX SHAPE GIRDERS BUILT FROM H-SECTION BEAMS

Hidehiro KYODA, Masashi SATO, Norimitsu KISHI, Tomohisa TAKEHARA
and Sumiyuki SAWADA

At present, composite structures made considering the merits of material characteristics of both steel and concrete, have been studied. Authors have proposed new composite box shape girders built from H-section beams. In this paper, in order to investigate load-carrying capacity and buckling behavior of the proposed composite girders, four-point loading tests have been conducted with/without filled concrete in the upper box girder and with/without long length nuts. The results obtained from this study are as follows; 1) using long length nuts, local buckling can be restrained and ductility can be rationally improved; 2) In case of concrete filled in the upper box girder, load-carrying capacity can be upgraded by 20% comparing with that in case without filling concrete; and 3) initial flexural stiffness and load-carrying capacity can be rationally estimated by using multi-section method.