

(20) 引張側に張出しRCスラブを有するSRC梁の 曲げ載荷試験

南 邦明¹・杉浦 忠治²・平 暁³・池田 学⁴・三木 孝則⁵

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部（〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1）
E-mail:k.minami@jrtt.go.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部（〒532-0003 大阪市淀川区宮原3-5-36）
E-mail:tad.sugiura@jrtt.go.jp

³正会員 株式会社復建エンジニアリング（〒532-0011 大阪市淀川区西中島3-20-9）
E-mail:taira@fke.co.jp

⁴正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail:manabu@rtri.or.jp

⁵正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail:mikit@rtri.or.jp

スラブ軌道等を有する鉄道橋の桁上には路盤コンクリートが施工されている。この路盤コンクリートは通常は桁と非合成の構造としているが、積雪地においては高さ750mm程度となる場合があり、鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）桁と一体化することにより、死荷重の軽減や桁高の低減が可能となると考えられる。しかし、桁の引張側にRCスラブが張出す構造となるため、これによる桁の曲げ挙動への影響が考えられる。そこで、張出しスラブによる桁のひび割れ性状や曲げ耐力への影響を検討することを目的に、SRC桁の縮小試験体を製作し載荷試験を実施した。その結果、張出しスラブが引張側にあると曲げ剛性や耐力は増大するが、ひび割れは早期に発生しやすい傾向があることを確認した。また、曲げ耐力は鉄道構造物等設計標準により概ね評価可能であることを確認した。

Key Words : reinforced concrete roadbed, steel-framed reinforced concrete beam, loading test, cantilever reinforced concrete slab

1. はじめに

近年、鉄道における軌道構造は、保守軽減を目的としたスラブ軌道や弾性マクラギ直結軌道などの省略化軌道が多く採用されている。新幹線においても、近年はスラブ軌道が圧倒的多数を占めている状況である。さらに、積雪地域において、スラブ軌道に貯雪方式を採用している区間では、積雪により列車の走行に支障をきたすことがないよう、一般に100mmとしている路盤コンクリート高を750mmとして、貯雪スペースを確保する場合が多い。

このような積雪地におけるより経済的な鉄骨鉄筋コンクリート桁（以下、SRC桁という）として、著者らは、路盤コンクリートをSRC桁と一体化させた構造を提案している^{1) -3)}。

通常のSRC桁とこの構造の比較を図-1に示す。通常のSRC桁では、路盤コンクリートは、図-1(a)に示すように、桁上に非合成の部材として設けている。この路盤コンクリートを、図-1(b)のようにSRC桁と合成化させることで、より合理的な構造になると考えられる。本論文では、この構造を“路盤コンクリート一体型SRC桁”という。

路盤コンクリート一体型SRC桁については、これまで、試設計やFEM解析等による検討が行われている^{1) -3)}。試設計の結果によると、路盤コンクリート一体型SRC桁は、支間25~40mにおいて、通常のSRC桁（図-1(a)）よりも死荷重や桁高さを軽減できることが確認されている¹⁾。

一方、支間が短い路盤コンクリート一体型SRC桁は、張出しスラブがSRC桁に対して相対的に下側に位置す

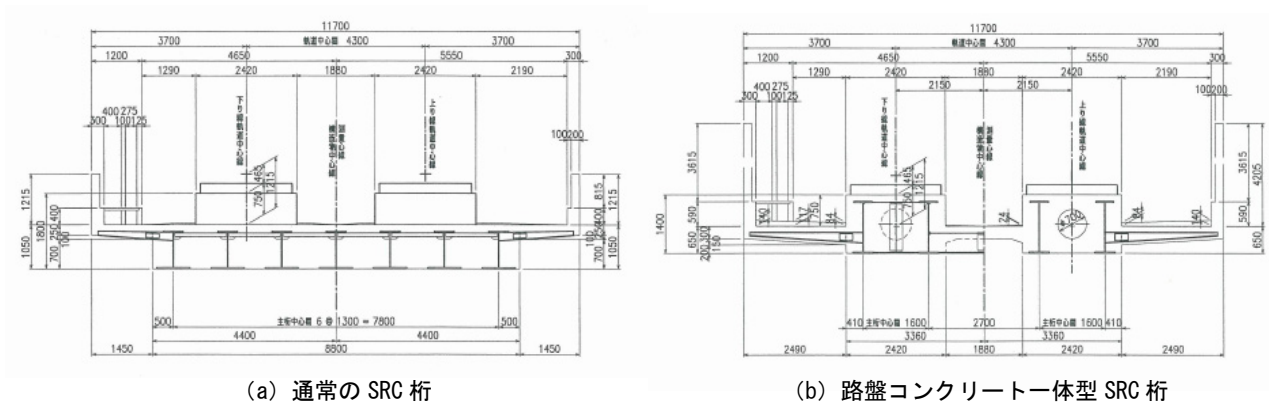


図-1 通常の SRC 桁と路盤コンクリート一体型 SRC 桁

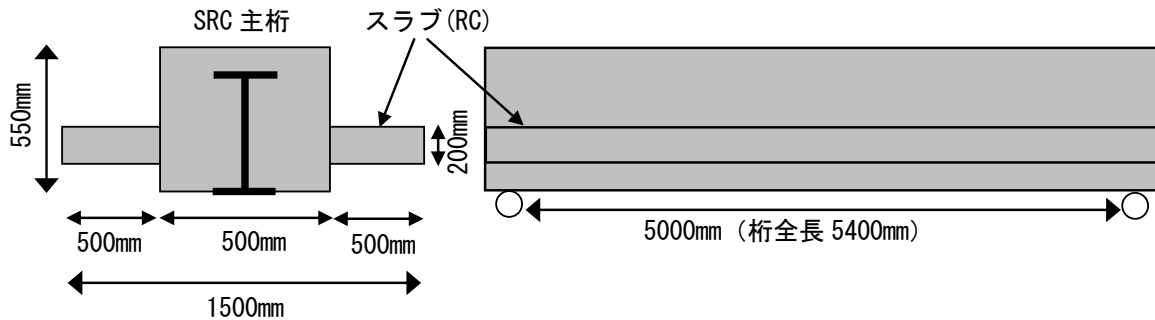


図-2 試験体の概略寸法

るため、列車荷重等の鉛直荷重が载荷されると張出しスラブのほぼ全面に引張力が生じる。そのため、張出しスラブのひび割れの発生の有無や発生状況、これによる桁の剛性や耐力への影響など、载荷時の挙動を確認しておく必要がある。

そこで、SRC 梁の縮小模型試験体による 4 点曲げの载荷試験を実施し、特に引張側にある張出し RC スラブによる SRC 梁の曲げ耐力やひび割れ発生への影響について検討を行った。

2. 試験体概要

(1) 試験体計画と概要

試験体は、図-2 のとおり、実橋の単線分の 1 主桁と両側に張出しスラブ（以下、スラブという）を有する構造とした。試験体は実橋の 1/3～1/5 程度の大きさとした。ただし、スラブの厚さはひび割れ挙動を確認するため、実橋に近い寸法とした。

SRC 主桁の鉄骨は、実橋では、2 主 I 桁または BOX 桁となるが、試験体幅の寸法上の制約や本試験では鉛直载荷時の曲げ挙動に主に着目することから、1 主 I 桁を用いた。

試験体は、表-1 に示すように、SRC 梁の試験体 3 体を製作した。

SRC 梁の試験体のパラメータは、スラブの有無、スラブの高さとした。スラブを設けた SRC 梁の試験体は 2 体（SRCNo.2 および No.3）で、これらはスラブの位置

（高さ方向の位置）を変えている。

実橋を想定すると、路盤コンクリート高さが一定であるため、スパンの大小に応じてスラブの取付け位置が桁高に対して相対的に上下する。本試験においては、SRCNo.2 はスパン 25m 程度の桁、SRCNo.3 はスパン 40m 程度の桁におけるスラブ位置を想定した。SRCNo.2 では、スラブ位置は断面の中立軸より下側に位置しており、鉛直载荷時にスラブが全引張状態となる。一方、SRCNo.3 ではスラブ内に断面の中立軸がある。

図-3 に各試験体の断面略図を示す、SRCNo.3 については SRCNo.2 とスラブ高さ以外は同一である。SRC 梁の試験体 SRCNo.1～SRCNo.3 の 3 体は、主桁断面寸法、鋼材種類、鉄骨および鉄筋の配置などは共通である。また、主桁やスラブの配筋に関しては、鉄筋の定着長や鉄筋比等を勘案して決定した。

コンクリートの打設については、実施工では、スラブ上面まで桁全幅を打設した後に、1～2 週間程度後にスラブ上の SRC 主桁のコンクリートを打設することが想定される。そこで、試験体のコンクリートの打設は、実施工を考慮して、2 回に分けて行った。コンクリートの打設日は、第 1 回コンクリート打設後 10 日後に第 2 回コンクリート打設を行った。コンクリートの打継目については、通常の実施工を考慮して、レイタンス処理のみ行った。

(2) 材料試験結果

表-2 に本試験体に用いたコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。コンクリートの試験については前述のよう

表-1 各試験体の形状

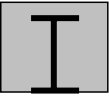
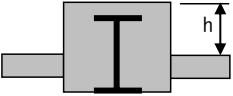
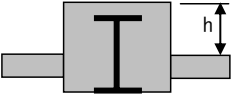
試験体	SRC No. 1	SRC No. 2	SRC No. 3
試験体形状			
試験体の特徴	・スラブ無し	・スラブ有り ・スラブの位置 $h=300\text{mm}$ (支間20m程度の実橋を想定)	・スラブ有り ・スラブの位置 $h=150\text{mm}$ (支間45m程度の実橋を想定)
着目点	スラブが無いSRC梁の挙動	スラブが全引張状態のSRC梁の挙動	スラブの中に中立軸があるSRC梁の挙動

表-2 コンクリートの圧縮強度試験結果

第1回打設コンクリート

材齢(日)	強度(N/mm^2)	載荷試験体
7	25.3	-
28	34.9	-
34	30.2	SRCNo. 3
46	31.0	SRCNo. 1
53	31.3	SRCNo. 2

第2回打設コンクリート

材齢(日)	強度(N/mm^2)	載荷試験体
24	28.8	SRCNo. 3
28	34.3	-
36	30.4	SRCNo. 1
43	30.9	SRCNo. 2

表-3 鉄骨の材料試験結果

	鉄骨(SM400A)	
公称板厚(mm)	14	9
降伏点(N/mm^2)	≥ 245	272
降伏ひずみ(μ)		1358
引張強さ(N/mm^2)	400~510	460
伸び(%)	≥ 18	29

注) 降伏ひずみは降伏点から算出した値である。

表-4 鉄筋の材料試験結果

	鉄筋(SD295A)
公称直径(mm)	9.53
降伏点(N/mm^2)	≥ 295
降伏ひずみ(μ)	1722
引張強さ(N/mm^2)	400~510
伸び(%)	≥ 18

注) 降伏ひずみは降伏点から算出した値である。

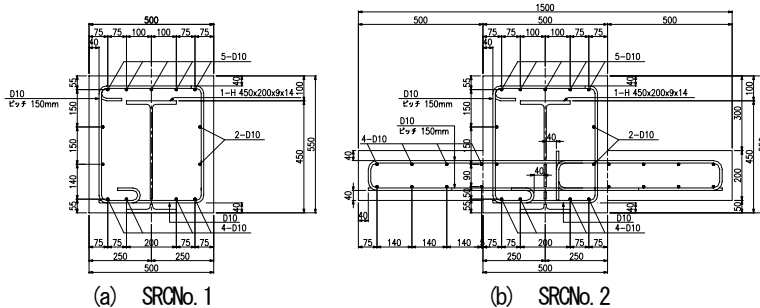


図-3 試験体断面略図

に2回に分けて打設しているため圧縮試験も分けて行った。コンクリートは、呼び強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ に対し、1回目および2回目の打設コンクリートともに、載荷試験時のコンクリートの圧縮強度は $30\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であった。

また、表-3、表-4に鉄骨と鉄筋の材料試験結果をそれぞれ示す。なお、表の数値は各材料試験片3体の平均値を示した。

鋼材については、試験体に用いた鉄骨は細幅系列のH形鋼(H450×200×9×14)で、材質はSM400Aとした。鉄筋については、桁、スラブともに全て異形鉄筋D10で、材質はSD295Aとした。鉄骨の強度は、公称板厚14mm(鉄骨フランジ相当)の場合は降伏強度 $272\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張強度 $460\text{N}/\text{mm}^2$ 、公称板厚9mm(鉄骨ウェブ相当)の場合は、公称板厚14mmより若干高く、降伏強度 $319\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張強度 $479\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

鉄筋の強度は、降伏強度 $344\text{N}/\text{mm}^2$ 、引張強度は $494\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

3. 載荷試験の概要

鉛直載荷時のSRC主桁下面やスラブのひび割れ発生性状や、SRC梁の曲げ剛性、曲げ耐力等を確認することを目的に、SRC梁の鉛直載荷試験を実施した。本試験では、特に、スラブの有無やスラブの高さ方向の位置の違いによる、スラブのひび割れの発生状況、SRC梁の曲げ剛性および曲げ耐力への影響に着目して行った。

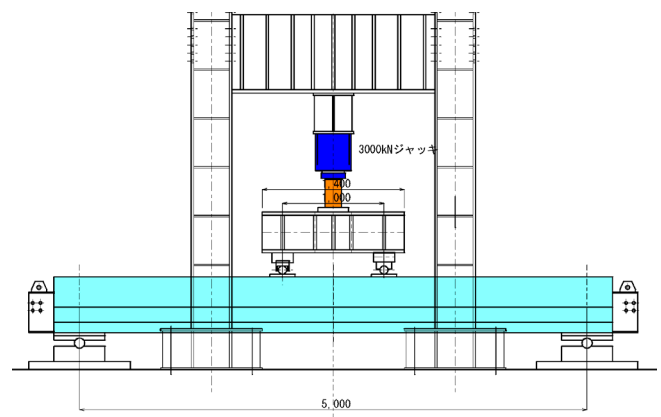


図-4 載荷要領図

(1) 載荷方法

試験体の載荷は、3000kNジャッキを用いて、SRC主桁上(桁中央部)を2点で鉛直下向きに4点曲げの漸増載荷した。図-4に載荷要領図を示す。載荷は曲げひび割れ発生荷重時および曲げ降伏荷重時に一度除荷した後、破壊するまで行った。曲げ降伏荷重は、計算上の降伏荷重を確認しながら、主桁中央部の引張側である鉄骨下フランジのひずみに着目し、この鉄骨下フランジのひずみが、材料試験にて得られた降伏ひずみに達した時点として判断した。写真-1に載荷試験状況を示す。

(2) 計測項目と箇所

載荷試験時の計測項目に関して、図-5に計測断面位置図を、図-6に計測項目の例としてSRCNo.2の-span中央



写真-1 載荷試験状況 (SRCNo.3)

断面Ⅱにおける計測項目を示す。測定はコンクリート用ひずみゲージ、鉄筋用ひずみゲージ、鋼桁用ひずみゲージ、変位計を設置して行った。また、主桁やスラブのひび割れ箇所には π ゲージを設置して、ひび割れ幅の計測を行った。

4. 載荷試験結果と考察

本論文では、載荷試験結果の概要として、荷重とひび割れ発生状況について記述する。

(1) 各試験体の破壊状況

載荷時の各試験体の破壊状況は、各試験体ともに、主桁下面からの曲げひび割れの発生後、鉄骨下フランジや引張鉄筋が降伏し、最終的には桁上面の圧縮側コンクリートが圧壊する曲げ破壊となった。ひび割れの進展状況に差異はあるものの、破壊状況においては、スラブの有無や、高さ位置により大きな影響がないことが確認された。

最大荷重時の試験体の状態として、写真-2にSRC梁上面のコンクリート圧壊状況を、写真-3に試験終了後にコンクリートをはつり、内部の鋼材の状況を確認した際の状況をそれぞれ示す。各試験体ともに圧縮側コンクリートの圧壊後に圧縮側主鉄筋が座屈し、それに伴い桁上面コンクリートが浮き上がるようにひび割れが進展していった。また、試験終了後に桁主鉄筋と圧縮フランジ間のコンクリートはかなり健全な状況であり、また、写真-3に示すように圧縮フランジの局部座屈は見受けられなかった。

(2) 荷重-変位関係

表-5に載荷試験結果の荷重の一覧を示す。なお、荷重値はロードセルで計測した載荷荷重値を表す。本試験では、前述のとおり降伏の判定は、スパン中央断面の鉄骨下フランジのひずみが降伏ひずみに達した時点とした。

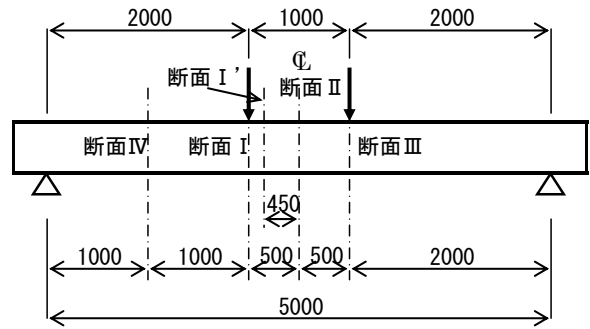


図-5 計測断面位置

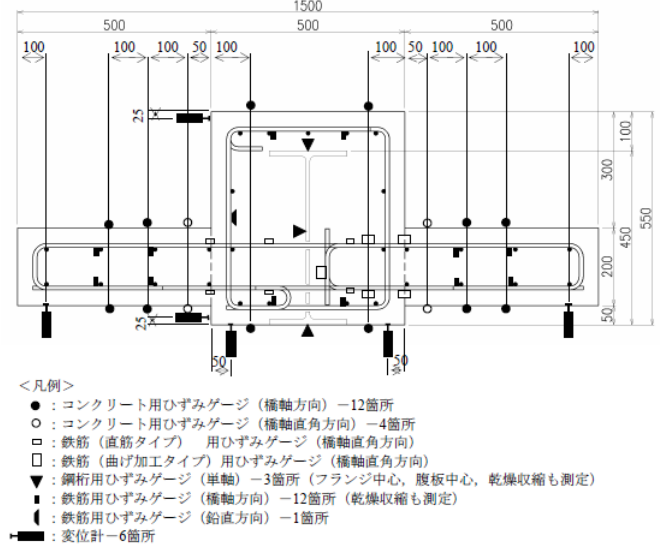


図-6 計測項目図 (SRCNo.2 断面Ⅱ)

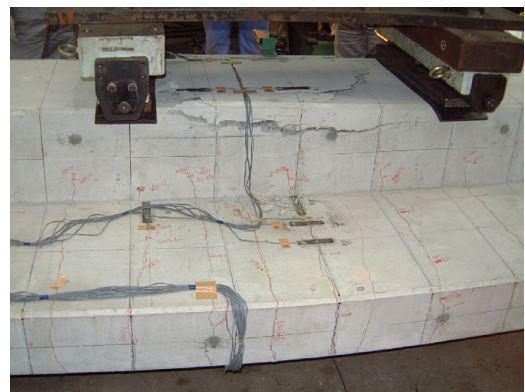


写真-2 SRC 梁上面コンクリート圧壊状況 (SRCNo.2)



写真-3 圧縮鉄筋座屈、鉄骨上フランジ状況
コンクリートはつり後 (SRCNo.2)

表-5 載荷試験結果一覧

試験体No.	初期剛性 (kN/mm)	ひび割れ 荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形態
SRC No. 1	86.9 (100.3)	113 (112.3)	460 (532.0)	766 (735.7)	曲げ
SRC No. 2	125.0 (125.7)	100 (171.0)	645 (582.1)	856 (846.3)	曲げ
SRC No. 3	103.6 (106.9)	114 (115.4)	596 (529.2)	836 (773.8)	曲げ

注) () は複合標準⁴⁾に基づき算定した計算値で、スラブを全幅有効としている。

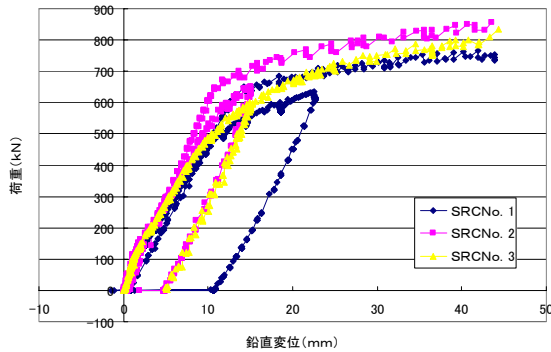


図-7 載荷荷重-鉛直変位関係(断面Ⅱ)

また、図-7 に断面Ⅱにおける荷重-変位関係の実測結果を示す。

載荷試験結果では、降伏荷重および最大荷重ともに、試験体 SRCNo.1, SRCNo.3, SRCNo.2 の順番で荷重が大きくなっている。また、初期剛性も同様な傾向を示している。試験体 SRCNo.2 は、スラブのほぼ全高が引張領域にあるが、スラブ内の鉄筋が引張鉄筋として寄与しているため、一番大きくなったものと考えられる。また、試験体 SRCNo.3 は、スラブ内に中立軸があり、スラブが曲げ剛性や耐力に及ぼす影響は小さいため、試験体 SRCNo.2 よりも小さくなったものと考えられる。

表-5 には、曲げひび割れ荷重、曲げ降伏荷重、最大荷重(曲げ耐力)について、「鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼とコンクリートの複合構造物)」⁴⁾(以下、複合標準という)に基づき、鉄骨を鉄筋とみなして鉄筋コンクリートとして断面耐力を算定した結果も示している。ここでの計算値は、スラブは全幅有効としており、スラブのコンクリートおよび鉄筋をすべて考慮した断面で計算している。計算値は、いずれの試験体とも最大荷重(曲げ耐力)は若干過小評価であるが、概ね実験値を評価できている。また、降伏荷重は SRCNo.1 についてはやや過大、SRCNo.2 と SRCNo.3 についてはやや過小に評価しているものの、実験値との差は 10~15%程度である。また、SRCNo.2 はひび割れが比較的低い荷重で生じているため計算値との差が大きいが、SRCNo.1 と SRCNo.3 はひび割れ荷重の計算値は実験値にほぼ一致している。

(3) ひび割れ性状と破壊状況

載荷試験時における、SRC 主桁とスラブ下面のひび

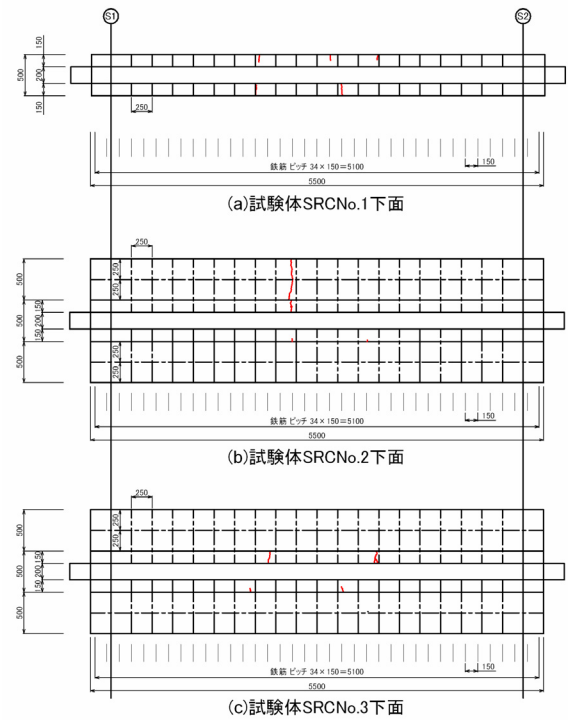


図-8 ひび割れ図(ひび割れ発生時)

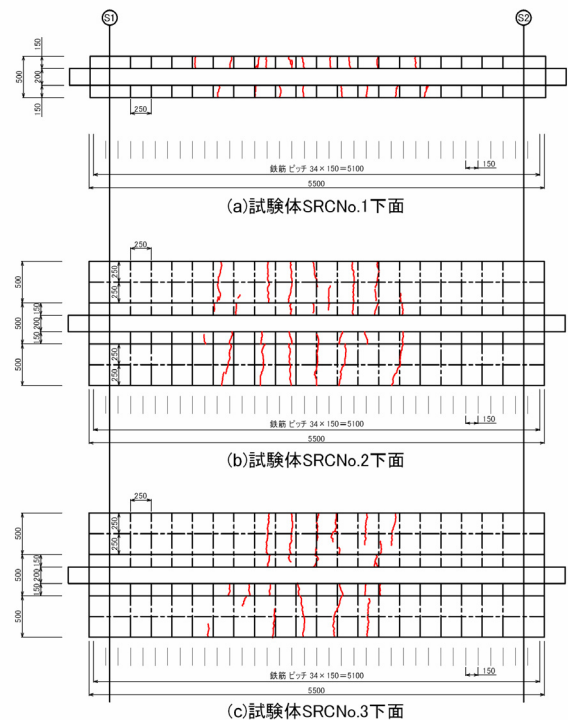


図-9 ひび割れ図(ひび割れ進展時-300kN)

割れ発生とひび割れ進展の状況として、図-8 に各試験体のひび割れ発生時(SRCNo.1 では 113 kN, SRCNo.2 では 100 kN, SRCNo.3 では 114 kN の載荷時)のひび割れ図を、図-9 にひび割れ進展時として 300kN 載荷時のひび割れ図をそれぞれ示す。

各試験体のひび割れ性状としては、試験体 SRCNo.1 は、最初にスパン中央部の下面コンクリートに曲げひび割れが生じた後、載荷にともなってひび割れ本数が増え、ひび割れが主桁側面の上方向に向かって進展していった。

試験体 SRCNo.2 は、最初にスパン中央部の下面コン

クリートに曲げひび割れが発生した時に、スラブ下面にも主桁と同箇所にはひび割れが生じた。その後、ひび割れ本数が増え、スラブ下面のひび割れが側面、上面と進展した。

試験体 SRCNo. 3 は、最初にスパン中央部の下面コンクリートに曲げひび割れが生じた。載荷とともに主桁下面のひび割れ本数が増え、主桁側面からスラブまで進展した。

SRCNo.2 と SRCNo.3 を比較すると、SRC 主桁のひび割れ状況は、張出しスラブの有無による差は明確には見られなかった。張出しスラブについては、ひび割れ発生荷重のスラブ位置による差が確認できた。これは、試験体 SRCNo.3 の張出しスラブが No.2 に比べ中立軸よりの高い位置にあるためである。したがって、路盤コンクリート一体型 SRC 桁をスラブが全引張状態となる短いスパンの桁として使用する場合は、スラブにひび割れが発生するのを抑制するため、ひび割れ防止筋を配置するなどの注意が必要であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、張出しスラブによる SRC 梁のひび割れ性状や曲げ耐力等への影響を検討することを目的に、縮小試験体を用いて静的曲げ載荷試験を実施した。本試験により得られた結論を以下に示す。

- 1) SRC 梁試験体の破壊状況は、張出しスラブの有無や位置によらずいずれの試験体においても、曲げひび割れ発生後、鉄骨下面や鉄筋が降伏し、ひび割れや鋼材の塑性化が進展し、最終的に圧縮側コンクリートが圧壊する曲げ破壊型であった。
- 2) 張出しスラブを引張側に設けた試験体 (SRCNo.2) は、特にスラブ内の鉄筋が抵抗するため、スラブのない試験体 (SRCNo.1) より曲げ剛性や耐力が (2 割

以上) 増大した。ただし、比較的小さい荷重でスラブ下面にひび割れが発生しており、このひび割れ抑制に十分な注意が必要と考えられる。

- 3) 張出しスラブが SRC 梁の中立軸付近にある試験体 (SRCNo.3) は、スラブが曲げにほとんど抵抗しないため、曲げ剛性や耐力はスラブのない試験体 (SRCNo.1) とあまり変わらない結果となった。
- 4) 引張側に張出しスラブを有する SRC 梁の初期曲げ剛性や曲げ耐力は、スラブを全断面を有効とした断面で、複合標準に基づき概ね算定可能であることが確認された。

今後は、鉛直載荷時のひずみの挙動等を含めて、更なる実験結果の検証を行うとともに、FEM による解析的な検討を行う予定である。

謝辞：本載荷試験の実施に当たっては、株式会社東京鐵骨橋梁にご尽力いただきました。関係各位に対して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤原良憲, 池田学, 杉浦忠治, 久保武明: 鉄道橋における路盤コンクリートを有効とした複合桁構造に関する解析的研究, 土木学会, 構造工学論文集, pp.1150-1163, 2009.3.
- 2) 藤原良憲, 杉浦忠治, 池田学, 藤原毅, 久保武明, 堤英康: 非合成部材を考慮した桁構造の検討 (その 1) 合成桁, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.791-792, 2008.9
- 3) 藤原良憲, 杉浦忠治, 池田学, 久保武明, 藤原毅, 堤英康: 非合成部材を考慮した桁構造の検討 (その 2) SRC 桁, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.793-794, 2008.9
- 4) 財団法人鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (鋼とコンクリートの複合構造物), 丸善, 2002

THE LOADING TESTS OF SRC BEAMS WITH CANTILEVER RC SLABS ON THE TENSILE SIDE

Kuniaki MINAMI, Tadaharu SUGIURA, Akira TAIRA,
Manabu IKEDA and Takanori MIKI

The roadbed concrete on the girder of the railway bridge is usually designed as a structure not composited with the girder. The thickness of this roadbed concrete sometimes becomes about 750mm in the snow region. It is considered that the deadweight and the height of the girder can be reduced by integrating the roadbed concrete with steel-framed reinforced concrete (SRC) girder. However, SRC girder integrated with roadbed concrete becomes a structure that the RC slab is positioned on the tension side of the girder. Accordingly it is considered that there is some influence on the bend behavior of the girder because of such structure. Then, scaled down model of the SRC girder was prepared and a loading test was executed. The purpose of the test is to examine the influence on the crack properties and the bend proof strength of the girder by the slab. As a result, it was confirmed that the rigidity in bending and proof strength of the girder increase when the slab is on the tension side, and that the crack is easily generated at the early stage. In addition, it was confirmed that the bending capacity can be roughly evaluated by the design standard for railway structures.