

バラスト撤去量低減を目的とした 斜ウェブ工事桁に関する解析的検討

Analytical study on diagonal web construction girders aimed at reducing the amount of ballast removal



横澤 幸貴*¹
Kohki YOKOSAWA



古谷 賢生*²
Kenshoh FURUYA



田中 伸尚*³
Nobunao TANAKA



小林 寿子*⁴
Hisako KOBAYASHI



平野 雄大*⁵
Takahiro HIRANO

要 旨

駅改良等の線路下開削工事では、工事期間中軌きょうを仮受けする工事桁が使用される。工事桁架設の際は、事前に架設箇所のバラスト撤去作業が必要となるが、バラスト撤去量が多いと夜間作業時間が増加し、工事費の増加に繋がる場合がある。本研究では、バラスト撤去量が少なくなる新しい工事桁構造である斜めウェブ工事桁を提案する。これにより、工事桁工法の施工期間を短縮し、コストダウンに繋げることを目的とする。具体的には、横桁部材を主桁下フランジで支持する構造を適用することで、バラスト撤去量を低減する。今回は、FEM解析を実施し、工事桁の挙動を確認した結果を報告する。

キーワード：斜めウェブ，工事桁，バラスト

1. はじめに

鉄道の線路下開削工事では、線路下横断工の仮設備として工事期間中に軌きょうを仮受けする工事桁工法が使用される。工事桁架設の際は、事前に架設箇所のバラスト撤去作業が必要となる。バラスト撤去量が多い作業では、線路閉鎖間合に対し、バラスト撤去作業時間の割合が多く、工程や、工事費に波及する場合がある。バラスト撤去量を低減する事で、作業時間を短縮し、工事費の低減につなげることが出来る。

本件では、従来の工事桁の構造を改良し、バラスト撤去量が少なくなる工事桁構造を提案する。バラスト撤去量を減らし、工事桁架設の施工期間を短縮することでコストダウンに繋げることを目的とする。

本件の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社JR東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所殿より宮地エンジニアリング(株)に委託研究された。

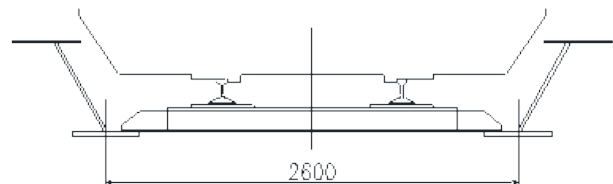


図-1 新工事桁（マクラギ受桁を下フランジで支持）

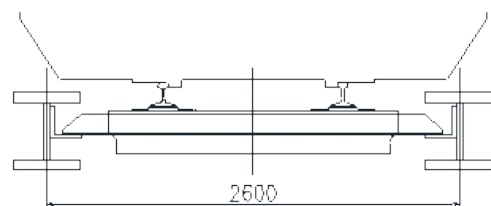


図-2 従来工事桁（形鋼工事桁）

*¹ 技術本部設計部設計第1グループ副主任

*² 技術本部設計部設計第1グループグループリーダー

*³ 技術本部設計部設計第1グループサブリーダー

*⁴ 東日本旅客鉄道株式会社JR東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所鋼・コンクリート構造システムグループ主幹研究員

*⁵ 東日本旅客鉄道株式会社JR東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所鋼・コンクリート構造システムグループ研究員

■ バラスト撤去断面

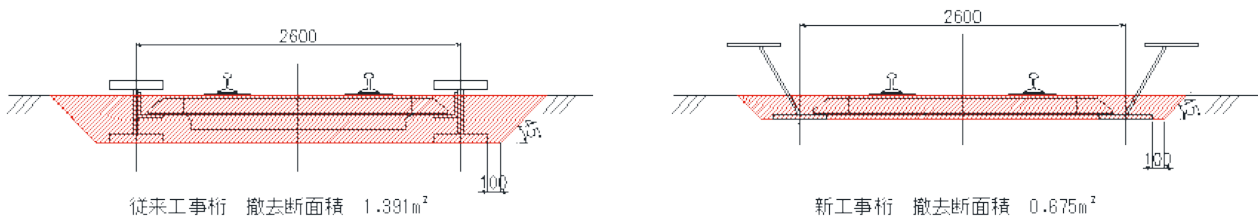


図-3 主桁・横桁設置時のバラスト撤去量イメージ

2. バラスト撤去量の少ない工事桁の構造検討

(1) 新工事桁の概要

本件では、バラスト撤去量低減に向け、横桁（マクラギ受桁）部材を主桁下フランジで直接支持した上で、建築限界を合理的に回避させたウェブを有する工事桁の構造に着目し、最適な断面形状及び構造ディテールを提案する。

新工事桁の断面を図-1に、従来工事桁の断面を図-2に示す。従来工事桁は、形鋼を多用し、高力ボルトによる接合で、溶接作業を少なくすることにより製作費を抑えた構造となっている。本研究で提案した新工事桁は、図-1に示すように、横桁（マクラギ受桁）部材を主桁下フランジで直接支持することで、主桁がバラストに埋まる深さを浅くすることが可能となる。これによって、主桁を設置する際の、バラスト撤去量が減少する。バラスト撤去量が減ると、分割架設時の埋め戻し量が減り、道床突き固めに要する時間が短くなるため、工期および工事費の縮減が可能となる。バラスト撤去量を減らすことで、得られるメリットは大きいと考えられる。

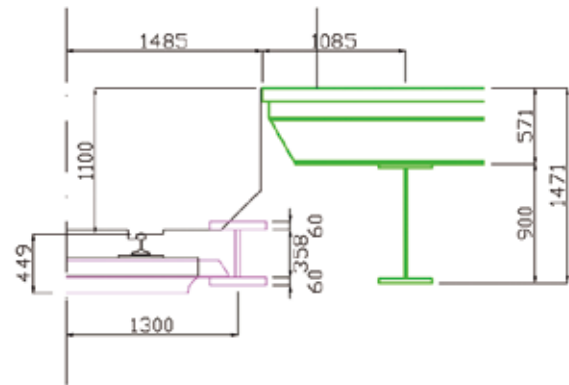


図-4 工事桁1（ウェブ鉛直タイプ）

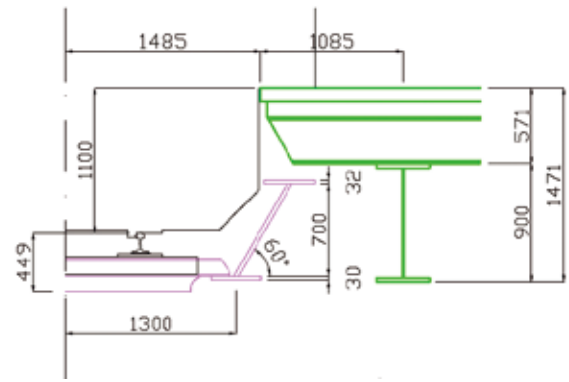


図-5 工事桁2（ウェブ60°タイプ）

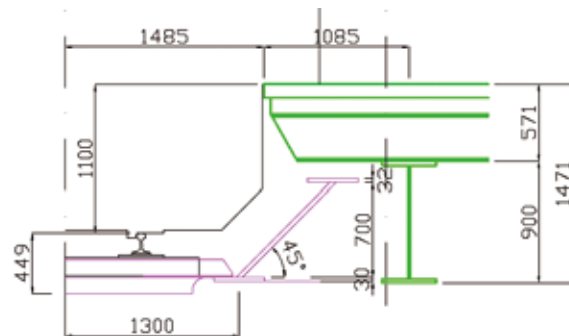


図-6 工事桁3（ウェブ45°タイプ）

(2) バラスト撤去量の削減率

従来工事桁と新工事桁のバラストの撤去量を図-3の赤く囲った斜線部に示す。従来工事桁と新工事桁のバラスト撤去量を比較すると、図-3に示す通り、新工事桁は従来工事桁の撤去量に比べて約50%少なくなっている。新工事桁は、マクラギ受桁部材を直接、下フランジにて支持する構造としたため、従来工事桁のように柵板でマクラギ受桁部材を支持する必要がなく、バラストに埋まる深さが浅くなる。

(3) 工事桁の最適断面の検討

以下に、バラスト撤去量低減に向け、マクラギ受桁を主桁下フランジで支持した上で、建築限界を合理的に回避させた主桁形状を有する工事桁について、最も経済的な断

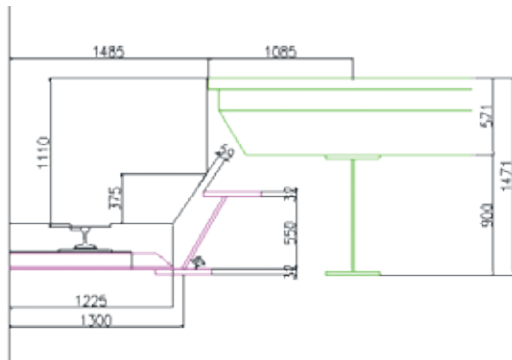


図-7 新工事桁解析断面

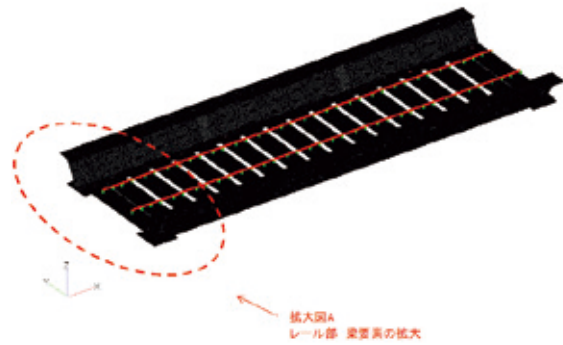


図-8 解析モデル

面形状及び構造ディテールについて検討した内容を示す。
 FEM解析を始める前に、工事桁の構造および建築限界の観点から合理的な断面形状を検討した。図-4～図-6に、基本的な断面形状の工事桁1～工事桁3を示す。今回は、駅のホーム下に桁を設置することを想定し、桁高を検討した。また、工事桁の支間長は10mとし、主桁間隔は2.6mとした。車両の建築限界との離隔（上フランジとの離隔を50mm以上確保）や、桁重量、溶接性、発生応力度、たわみ等を総合的に勘案した。

図-4に示す工事桁1は、主桁ウェブが鉛直であるため、建築限界と上フランジが干渉する。上フランジを偏心させたとしても建築限界との干渉は避けられないため、工事桁1の断面形状は不適切であると判断した。また、干渉を避けるために主桁間隔を広げると、マクラギ受桁の剛性を大きくする必要があり、重量が重くなってしまうという問題点があった。

図-5に示す工事桁2は、主桁ウェブの傾きを60°で検討したものである。ウェブを60°に傾げるだけでは建築限界と上フランジの離れを50mm以上確保することができないため、上フランジを偏心させる必要があった。

図-6に示す工事桁3は、主桁ウェブの傾きを45°としたものである。建築限界との干渉は避けることができるが、フランジとウェブの交角が60°未満のため、首溶接には、すみ肉溶接、部分溶け込み溶接が使用できない。そのため、溶接性の問題がある。また、ウェブが傾斜していることにより、上フランジに水平応力が作用する。その値は、工事桁2と比較して1.7倍となるため、剛性を確保する必要がある。以上のことより、工事桁2を合理的な主桁形状とした。

次に、従来工事桁と同等の剛度を確保するように、ウェブ高を決定した。ウェブ高さを550mmとしたときが、従来工事桁の剛度とほぼ等しくなった。解析断面に用いる工事桁の断面を図-7に示す。

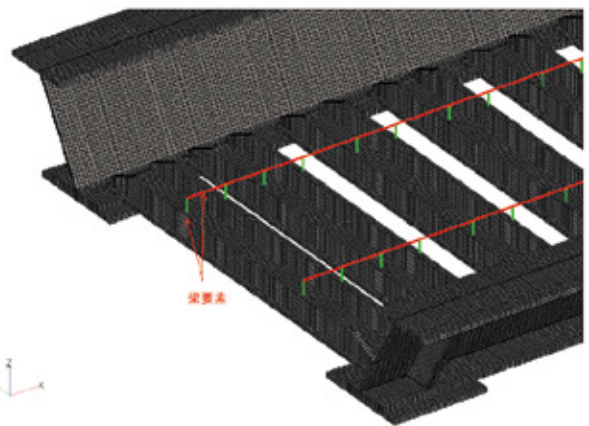


図-9 レール部 梁要素

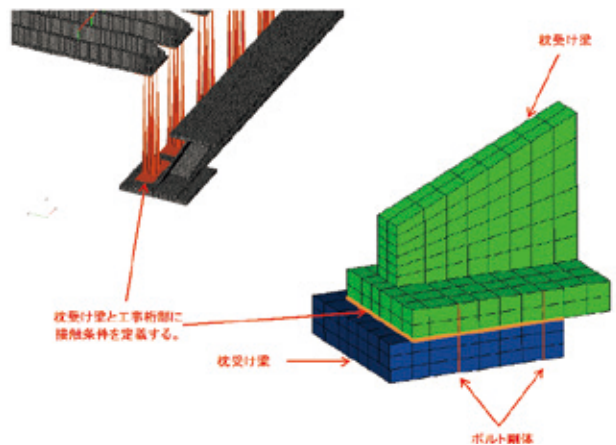


図-10 接触部拡大図

表-1 要素分割数

単位：mm

	寸法		要素分割数	
	幅	厚	幅	厚
上フランジ	427	32	23	2
ウェブ	550	20	33	2
下フランジ	427	32	22	3
枕受け梁	フランジ	340	25	17
	リブ	140	34	6
垂直補剛材	550	12	33	2

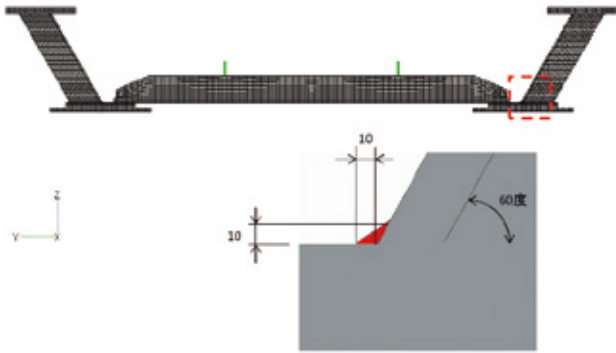


図-11 主桁首溶接部拡大図

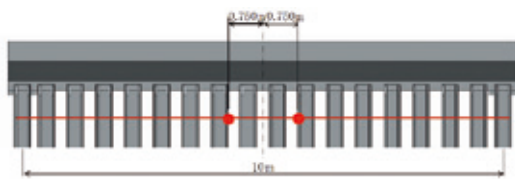


図-12 荷重載荷図

表-2 拘束条件一覧

	S1						S2					
	X	Y	Z	Xr	Yr	Zr	X	Y	Z	Xr	Yr	Zr
G1	Free	Fix	Fix	Free	Free	Free	Fix	Fix	Fix	Free	Free	Free
G2	Free	Free	Fix	Free	Free	Free	Fix	Free	Fix	Free	Free	Free

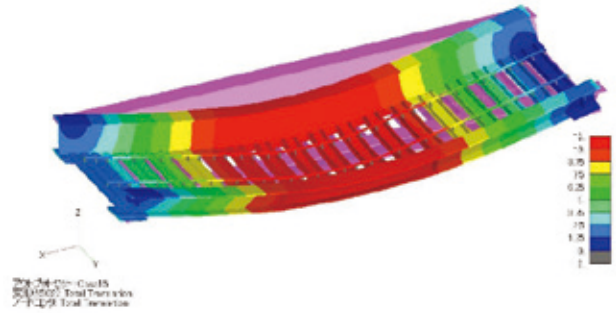


図-13 変形図 (上フランジ側)

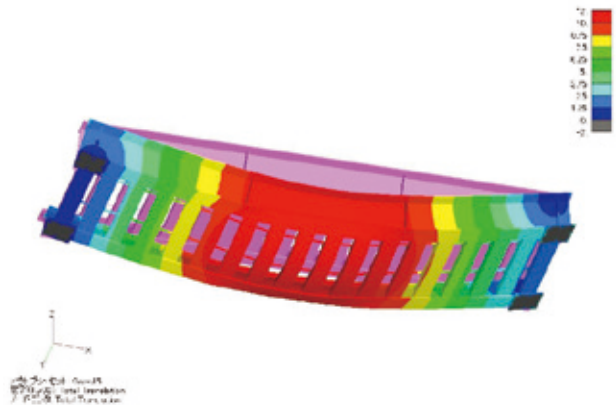


図-14 変形図 (下フランジ側)



図-15 側面からの変形図

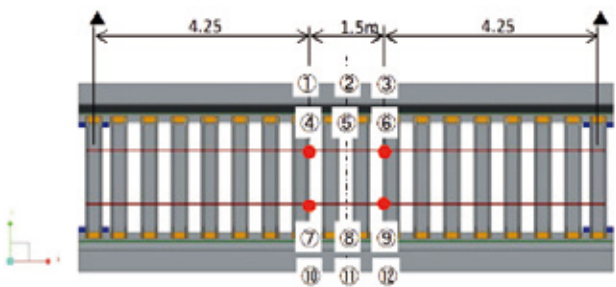


図-16 下フランジ変位量抽出位置

3. 有限要素解析

(1) 解析モデル

図-8～図-10に解析モデルを示す。解析モデルは、工事桁、マクラギ受桁、軌条、接触部、ソールPLの部材構成にてモデル化を行った。最適断面の検討と同様に、工事桁の支間長は10mとし、主桁間隔は2.6mとした。工事桁、マクラギ受桁、ソールPLは、ソリッド要素を使用してモデル化し、軌条は、梁要素を用いてモデル化した。接触部は、図-10に示すように、下フランジとマクラギ受桁を結ぶボルトを剛体バネ要素としてモデル化した。また、主桁首溶接部のすみ肉溶接は図-11に示すようにモデル化した。これは、下フランジでマクラギ受桁を直接支持する構造のため、下フランジの面外変形量を適切に評価するには、溶接部もモデル化する必要があったためである。主桁首溶接をモデル化した場合と、主桁首溶接をモデル化しなかった場合とでは、下フランジの鉛直方向の変形量に差があることを確認している。

解析には、汎用有限要素法解析ソフトウェアABAQUS Ver6.14.5を用いた。要素分割は、その形状が極力正方形となるように配慮し、要素分割数を決定し

表-3 下フランジ変位量一覧

①	②			③					
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
①	1.0	0.3	-11.0	1.2	0.3	-11.3	1.5	0.3	-11.0
④	⑤			⑥					
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
④	1.0	0.3	-12.6	1.2	0.4	-13.0	1.5	0.3	-12.6
⑦	⑧			⑨					
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
⑦	1.0	-0.4	-12.6	1.2	-0.4	-13.0	1.5	-0.4	-12.6
⑩	⑪			⑫					
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
⑩	1.0	-0.3	-11.0	1.2	-0.4	-11.3	1.5	-0.3	-11.0

た。要素の幅は、板厚程度とし、板厚方向も分割を行った。アスペクト比は、最大で4.16とした。

荷重条件は、以下の荷重を載荷した。桁自重は、体積に鋼の単位体積重量 77kN/m^3 を乗じたものを載荷した。

主桁の挙動に注目し、載荷試験を行う予定としていたため、試験体の載荷位置との整合性を考慮した荷重として、片側 106.1kN を載荷した。これは、列車速度 120km/h 相当の列車走行を想定し、それと同等な荷重となるように設定した値である。なお、列車荷重には、**図-12**に示す赤丸の軌条桁位置に集中荷重として載荷し、衝撃を考慮して、 1.461 倍した。レール荷重は、 0.5kN/m を載荷した。

拘束条件を、**表-2**に示す。橋軸方向については、S1側は可動、S2側は固定とした。橋軸直角方向は、G1側の支点を固定、G2側の支点を自由とした。鉛直方向は、全ての支点で固定とした。回転については、全ての方向で自由とした。

(2) 解析結果

1) 変形

下フランジの変形を**図-13~図-15**に示す。支間中央部で変形量が一番大きく、下側に撓んでいる。この変形図より、ウェブや下フランジに局所的な変形が生じていないことが分かる。**図-15**は、側面から見た変形を表したものである。この図よりマクラギ受桁も変形していることが分かる。たわみについては、主桁下フランジで直接、マクラギ受桁を支持していることを考慮し、主桁とマクラギ受桁との合計でのたわみで照査を行うか検討が必要と思われる。**図-16**に下フランジの変位量抽出位置を示す。変位量を抽出した位置は、荷重を載荷した位置とその中心位置とした。**表-3**に、抽出した位置での下フランジの変位量を示す。最大の変位量は、抽出点⑤、⑧で、 13mm 下側に撓んだことがわかる。主桁のたわみの照査において、設計計算では、 $\delta=11.7\text{mm}$ で、許容値は支間長 $10\text{m}/600=16.7\text{mm}$ 以下となり、FEM解析値もたわみの許容値を満足している。主桁下フランジで

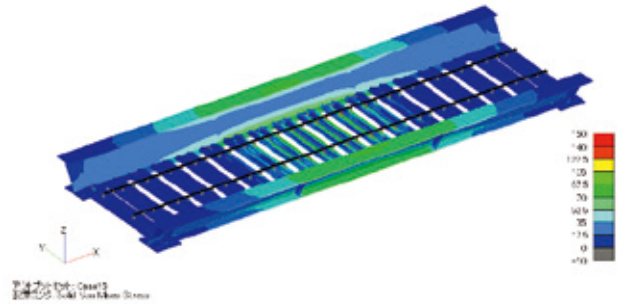


図-17 ミーゼスの応力コンター図

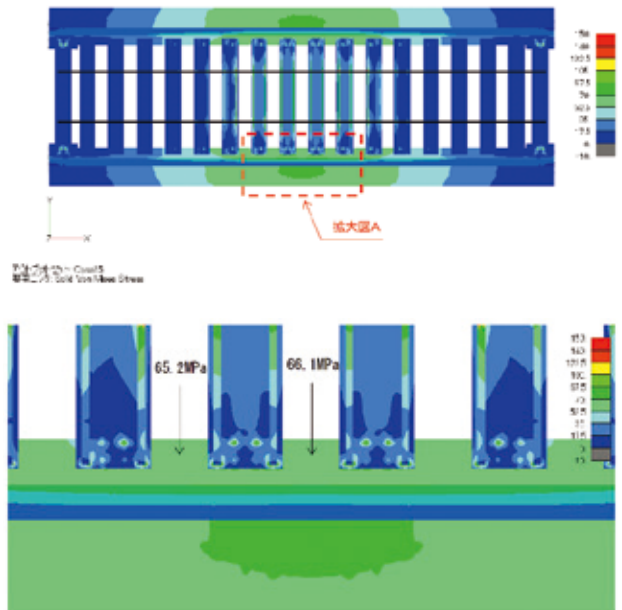


図-18 ミーゼスの応力コンター図 (下フランジ拡大図)

直接マクラギ受桁を支持していることより、下フランジには鉛直方向の荷重が作用するが、下フランジが鉛直方向に大きく変形している箇所は見られない。下フランジの鉛直方向の変位量は、FEM解析結果より最大で 1.7mm であった。しかしながら、鉛直方向の変位は、レール位置でのたわみの制限値への影響は無視できない値となっていると考える。従来の工事桁の設計方法では、マクラギ受桁のみ着目し、レール直下のたわみ量を算出している場合が多いが、本構造では、マクラギ受桁の変位と下フランジの鉛直方向変形を同時に考慮する必要がある。

新工事桁は、下路プレートガーダーの主桁であるため、斜め腹板により上フランジに水平応力が作用するので、鉛直腹板の主桁に比べて、十分な剛性が必要である。**図-13**の変形図より、上フランジには面外方向の変形が起こっていないことが分かる。今回検討した板厚構成で十分な剛性を有することが分かった。

2) ミーゼスの降伏応力度

新工事桁は、下フランジでマクラギ受桁を直接支持することにより、主桁作用による応力（橋軸方向）とマクラギ受桁からの床組による応力（橋軸直角方向）の2方向の応力が加わる。この2軸応力状態を見る必要があるため、ミーゼスの応力状態について確認する。図-17に、ミーゼスの応力度のコンター図を示す。図より、ミーゼスの応力度は、主桁は全体的に許容応力度（＝140N/mm²）以下となっていることが分かる。図-18は、列車荷重を載荷した付近の下フランジの応力度を示す。支間中央付近の最大値は、66.1MPaで、許容応力度に対し約47%である。前項で述べたように、主桁のたわみは許容値に対し、約78%となっている。さらに下フランジの鉛直方向の変形にも考慮が必要となるため、新工事桁では、主桁の応力照査よりたわみの照査の方が厳しいことが分かる。これは、新工事桁の桁高が低いことに起因していると考えられる。また、新工事桁には、主桁の全体座屈や下フランジの局部座屈は生じていないことが分かった。主桁のたわみや応力度は許容値以内であり、新工事桁の構造は、列車が走行するのに問題がないことが分かった。

4. まとめ

本件では、工事桁のバラスト撤去量を減らすことを目的とし、マクラギ受桁を下フランジで直接支持する構造である斜めウェブ工事桁の最適断面を検討した。また、

FEM解析を用いて、工事桁の挙動を確認した。

- ・マクラギ受桁を下フランジで直接支持することにより、従来工事桁と比較して、バラスト撤去量を約50%減らす構造を提案した。
- ・FEM解析により、支間10mの工事桁をモデルケースとして、斜めウェブでも列車速度120km/h相当の列車走行においても、たわみや応力値が許容値内に収まることを確認した。
- ・下フランジがマクラギ受桁を直接支持する構造であるため、下フランジの鉛直方向の変形とマクラギ受桁の変形を同時に考慮したほうが良い。
- ・ウェブの取付角度が60°のため、フランジとの溶接方法、開先の製作性について今後検討が必要と考える。

また、実物大試験体を用いた載荷試験も実施しているため、実験結果などは別途報告することとする。

<参考文献>

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等標準・同解説—鋼・合成構造物，2009.
- 2) 橋梁研究会：鋼橋設計資料（第五版），pp.39-53, 1996.
- 3) (社)日本鋼構造協会：JSS溶接開先標準
- 4) 鉄道ACT研究会：HP，形鋼工事桁工法

2020.6.1 受付

グラビア写真説明

（仮称）気仙沼湾横断橋（国道45号 気仙沼湾横断橋小々汐地区上部工工事）

（仮称）気仙沼湾横断橋は、国道45号三陸沿岸自動車道の気仙沼湾を横断する橋梁で、完成すると東北地方では最大の斜張橋となります。本橋は、平成23年3月に発生した東日本大震災の復興事業のシンボリック構造物であり、震災から丸10年となる令和3年3月の供用を目指して建設が進められています。海上部に位置するため、防錆効果を高める事を目的に主塔・主桁とも継手部には全断面溶接が採用され、非常にすっきりとした外観が特徴です。主塔は、船舶の航行への影響を最小限に抑えるため、3000t吊のFCを使用した大ブロック架設を2回行い設置されました。令和2年6月下旬には無事に主桁の閉合を行い、完成に近い姿となりました。遠方からも見える本橋は、気仙沼のランドマーク的な存在になりつつあります。

（久留宮 航）