

緊急仮設橋の製作

FABRICATION OF EMERGENCY PORTABLE BRIDGES AFTER A NATURAL DISASTER

東 博年* 中本 啓介** 森川 友記***
 Hirotooshi Azuma Keisuke Nakamoto Tomoki Morikawa

1. まえがき

近い将来に発生が予想される南海トラフ巨大地震は、広範囲に渡り巨大津波や強い揺れによって西日本を中心に、甚大な被害想定がされている。東日本大震災では、沿岸部を通る国道45号の橋梁において、津波による橋梁の流失などの被災があったが、比較的被害が小さかった東北自動車道や国道4号を主軸とした三陸沿岸部から道路啓開・復旧が実施され（通称「くしの歯作成」）、震災復興事業の大きな役割を担った。

一方、近畿地方の紀伊半島では、図-1に示すように救援の主軸となる高規格幹線道路が未整備もしくは存在しないのが現状である。特に紀伊半島の串本町以東地域では高速道路事業化に至っていない区間もあるため、幹線道路は国道42号のみであり、国道42号の橋梁が1橋でも流失すると救出・救援車両が通行できず、孤立する地域の発生が予想され、人命に係わる問題になるとともに生存者への緊急支援物資の輸送も困難な状況となる。

そのため、近畿地方整備局では「緊急仮設橋に関する検討委員会」を設置し、緊急車両通行のみに限定し、極めて短時間での設置が可能で、かつ、汎用性のある「緊急仮設橋」を開発することとなった。当社では、この緊急仮設橋の製作工事を平成26年3月に受注し、様々な検討を行い施行した。

本稿では、本工事にて実施した主桁横倒れ座屈、連結部の検討及び試験施工について報告する。

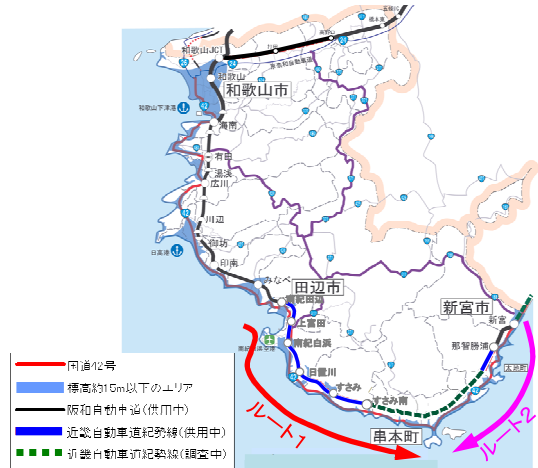


図-1 幹線道路の整備状況と啓開ルート
 (近畿地方整備局 HP より引用)

2. 工事概要

緊急仮設橋の構造一般図を図-2、構造諸元を表-1に示す。また、本橋の構造に関する設定条件は文献1)に示している。

工事名: 緊急架設橋製作工事

工期: 自)平成26年3月4日, 至)平成27年3月30日

総重量: 主構造 88t, カウンター載荷桁 36t, 計 124t

部材数: 主桁 16台(青 6台, 緑 4台, 赤 4台, 灰 2台)

横桁 16台, 縦桁 15台, 横構 13台,

架設補強桁等

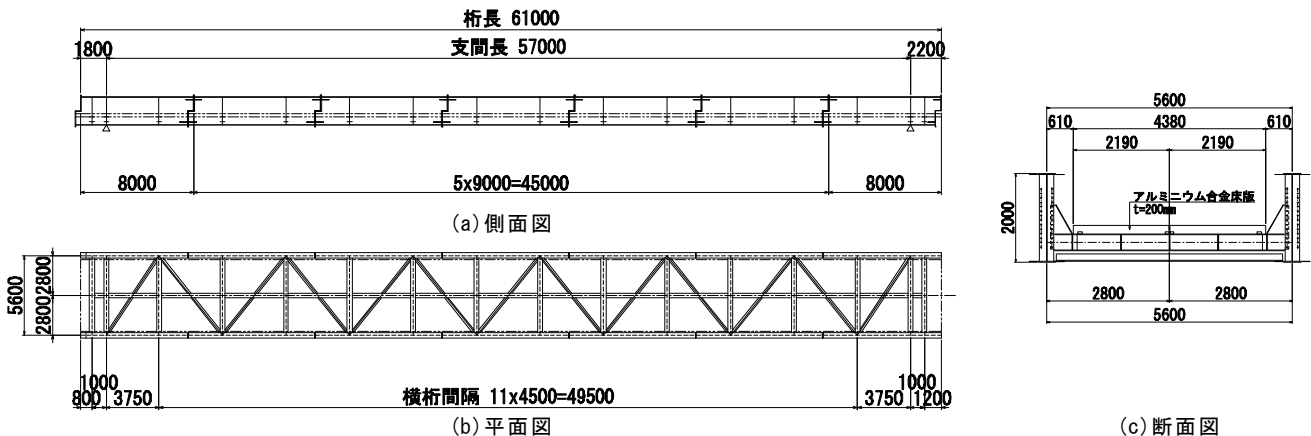


図-2 構造一般図

* 技術本部 橋梁設計部 大阪設計課 ** 橋梁営業本部 橋梁技術研究室
 *** 工事本部 橋梁工事部 計画2課

施 主：国土交通省近畿地方整備局 近畿技術事務所
 業務内容：上部工詳細設計，架設詳細計画，連結部模型
 実験，架設試験施工，走行試験

2.1 開発コンセプトの概要

これまでの応急組立橋は，比較的長期間の使用を前提としており，構造が大規模で架設には大型のクレーンを必要とし，交通解放するまでに1~2ヶ月の日数を必要とする場合が多い．これに対し，災害時の人命救助には72時間を目安としていることから，災害により流失した橋梁の場合，発災後3日以内には緊急車両（救急車や消防車等）が通行可能となるよう仮橋等を準備しておくことが有効となるケースが考えられる．

このような背景から，以下に示すような開発コンセプトのもと後述する各種検討を行い，緊急仮設橋の製作に取り組んだ．

- ① 緊急路構築が最も困難な条件を勘案．
- ② 災害時の緊急車両（救急，消防，最小限の重機）の通行を優先した設計荷重の採用．
- ③ 災害時の混乱状況を勘案し，経験の少ない作業員でも組立が容易に行える構造の選定．
- ④ 運搬・作業性に優れ，組立時間を短縮できる構造形式．
- ⑤ 被災した現地状況に合せた順応性のある構造と架設工法の採用（支間長と架設工法のバリエーション）．

表-1 構造諸元

形 式	下路式鋼単純2主桁橋
設計活荷重	25t吊ラフテレーンクレーン（総重量270kN） 一方向一台の通行規制
橋 長	61.0m（支間長12~57mに対応）
有効幅員	4.380m
現場継手構造	高力ボルト引張接合
架設工法	クレーン一括架設、クレーン・ペント架設、 送出し架設

3. 上部工詳細設計の概要

3.1 設計の概要

本橋は単純2主桁橋で短時間架設を図るため下路式が採用されている．主桁断面は一本梁モデルの最大断面力にて決定し，全主桁ブロックを同一断面とし，主桁の連結方式には短縮め形式の引張ボルト接合が採用された．

3.2 弾塑性 FEM 解析の実施

本橋は，下路式の鋼橋であり，製作部材や架設時の精度確保が，通常，上路橋より安全性に大きな影響を与えると懸念される．特に，主桁の横倒れ座屈に対する安全性の確保が重要であると考えられることから，全体 3

次元モデルによる弾塑性 FEM 解析により，座屈耐力の確認を行った．

(1) 解析条件

解析モデルの概要を図-3に示す．主桁と横桁は薄肉シェル要素，横構は梁要素でモデル化した．荷重は，死荷重として鋼桁と床版（アルミニウム合金床版）自重を考慮し，活荷重としてラフテレーンクレーン荷重を支間中央部に集中荷重として載荷した（図-3）．また，断面内載荷位置は走行帯最外縁に設定した（図-4）．

本橋の構造と用途の特殊性を考慮し，解析では死荷重に加えて活荷重を漸増載荷させるなど想定外鉛直荷重増加に対する安全性の確認を実施した．

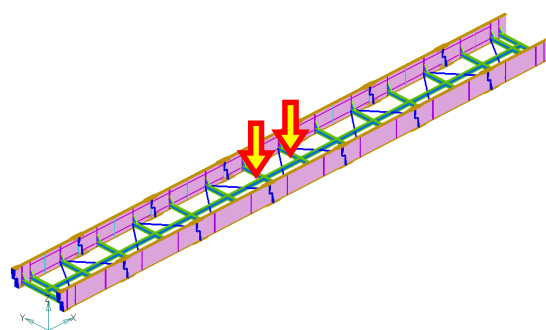


図-3 全体モデルによる座屈解析モデル

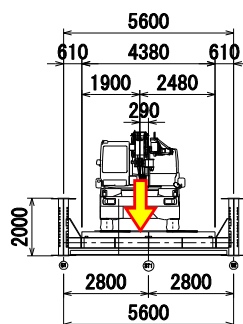


図-4 載荷位置

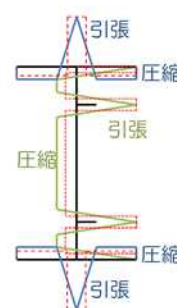


図-5 残留応力

(2) 初期不整の設定

初期不整には，鋼材の製造，製作，組立て，架設の各段階で生じる幾何学的初期不整の初期たわみ（表-2）と，部材を組立てるための溶接による材料的初期不整の残留応力（図-5）を解析に反映した．

(3) 解析結果

解析では，死荷重に加えて道路橋示方書のT荷重に準じた荷重の3倍以上載荷しても降伏や座屈に対して安全が確保されることが確認された．なお鉛直荷重の増加に対して最終的には圧縮フランジが図-6のように横桁を固定点とした座屈挙動を示して不安定化する傾向を示したことから，桁の設計では固定点間距離を横桁間隔とし

表-2 初期たわみ

	概念図	検討した初期たわみの一例	
主桁	①桁の横方向たわみ(通り)		
	②桁の倒れ		
主桁腹板	③板の平面度		
主桁上フランジ	④自由突出板のたわみ		
	⑤フランジ直角度		



写真-1 連結部構造

40%削減された。応力的に最も厳しい全桁長 60m の架橋時には、ボルト本数の増加を抑えるために道路橋では、まだ使用が一般化していない超高力ボルト S14T²⁾ が試験的に採用された。なお、全桁長 60m 未満で使う場合など、架橋形態によっては通常の S10T の高力ボルトでも構造は成立する。

4.2 弾塑性 FEM 解析と実物大模型実験による性能確認

連結部については、新しい多列式引張接合方式を採用したことにより、部材製作や組立施工時の精度管理の条件まで詳細に反映した性能について解析と実験の両方で検証が行われた。

(1) 弾塑性 FEM 解析による連結部の設計

連結部の設計では、図-7 に示すよう全橋をモデル化した FEM 解析モデルを用いた弾塑性解析を実施した。解析モデルでは、End.PL やボルト、補強リブなどを忠実に再現するとともに、着目する引張接合面のボルト導入軸力、鋼板部材間、ボルトとの接触を考慮した。

本橋では、てこ反力³⁾によるボルト軸力の変動と各ボルトへの分担を考慮したボルト配置とするため、連結部の End.PL をフランジ端より突出させている。主桁部材としての連結部からフランジへの荷重伝達と製作時の溶接変形防止のため、補剛材、補強リブを配置し連結部の

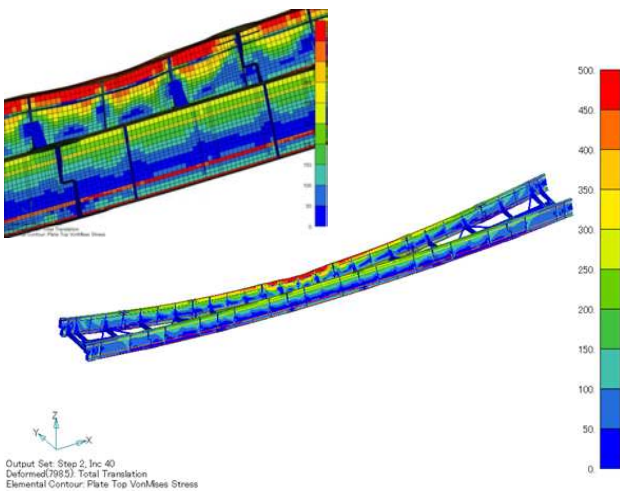


図-6 VonMises 応力カラー図

て道路橋示方書 II.3.2.1 に従う圧縮フランジの許容曲げ圧縮応力度を満足させた。

4. 急速施工を可能にする主桁連結部

4.1 連結部構造概要

緊急仮設橋の主桁の連結方式には、現地での部材組立の時間短縮、材片数及びボルト本数低減を目的として短縮め形式の引張ボルト接合が採用された。写真-1 に連結部構造を示す。主桁連結部では、組立時の安定性や余震による影響も考慮し、主桁を L 形に切欠きフランジをつけた「載せかけ構造」が採用された。高力ボルト引張接合方式としたことで摩擦接合方式に比べボルト本数は約

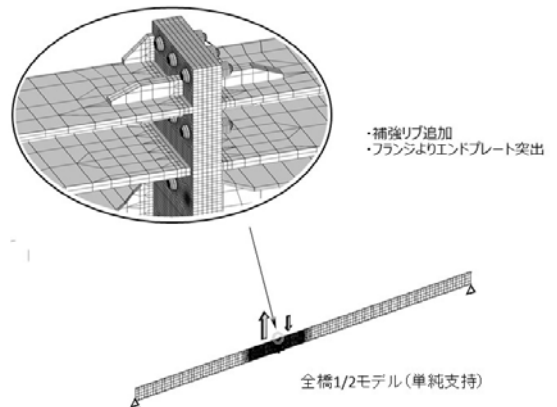


図-7 連結部弾塑性 FEM 解析モデル

剛性を確保した。以上より、実橋の断面力で設計した結果、連結部の End.PL 厚は 38mm となった。

(2) 実物大模型実験

本連結構造のような特殊構造では、解析では再現が困難な、連結部の溶接変形による初期不整なども継手性能に複雑に影響する可能性があると考えられ、実物大の模型桁による 4 点曲げ載荷実験を実施した(図-8, 写真-2)。

載荷は、連結部の製作・施工誤差、ボルト強度に着目し、表-3 に示す 3 ケースの実験を実施した。End.PL の平坦性は、ストレッチゲージを End.PL 表面に押し当て、End.PL とストレッチゲージとの隙間を複数点計測することにより確認した。表中に示す荷重倍率は設計死活荷重に対する載荷荷重の比率である。載荷設備の関係により、載荷試験は弾性範囲内で実施した。

実橋で連結部に作用する曲げモーメントとせん断力の比率を再現するため、2 台のジャッキ荷重比率を維持した状態で所定の荷重まで増大させる単調載荷を繰り返す。変位、ボルト軸力、鋼ひずみなどの諸量を各センサーにより計測した。本実験の載荷荷重は架設時の 1.4~1.8 倍であり、設計活荷重であるラフテレーンクレーン載荷時曲げモーメントの 2.6~4.4 倍に相当する。

支間中央に配置した変位計による荷重-変位関係を図-9 に示す。荷重とたわみの関係は線形関係を保持している。残留たわみは、載荷装置の変形が約 5mm 生じた Case-1 では 1.6mm、残りの Case-2,3 では 0.6mm 程度と、

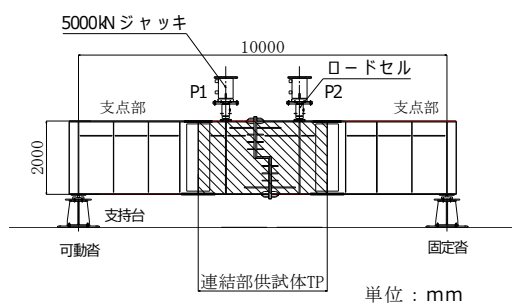


図-8 載荷実験概要図



写真-2 実物大模型実験 (富津工場構造実験棟)

ほとんど発生しておらず弾性域の挙動を示している。

連結部の引張側に配置したボルト軸力増分と荷重倍率の関係において、てこ反力による軸力増分が最も大きかったボルトの結果を図-10 に示す。この図では、載荷開始時の軸力を 0 として表示している。なお、ボルト軸力はボルト軸部に貼り付けたひずみゲージにより測定した(写真-3)。載荷直後からボルト軸力は変動しており、

表-3 載荷実験ケース

ケース	供試体	EndPL 平坦性	連結部 高力ボルト	P1荷重kN (荷重倍率)	単調 載荷数
Case-1	TP-1	0.5mm以下	M24S14T	3323 (1.9)	1
Case-2	TP-2	0.9mm以下	M24S10T	2404 (1.4)	3
Case-3	TP-2		M24S14T	2500 (1.4)	4

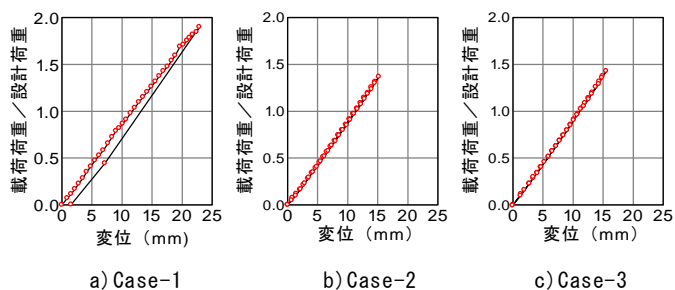


図-9 支間中央における荷重変位関係

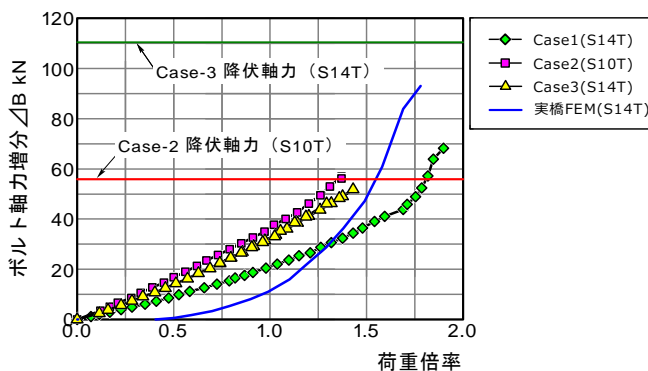


図-10 荷重載荷に伴うボルト軸力増分の比較



写真-3 連結部に配置したゲージ付きボルト

連結部 End.PL の平坦性が異なる Case-1 と 2,3 では変動に差異が生じていることを確認した. S10T ボルトを用いた Case-2 では, 荷重倍率 1.4 程度で降伏域に到達した. S14T の超高力ボルトを用いた Case-1,3 は, Case-2 よりも降伏軸力が向上するため安全性に余裕がある結果となった. FEM 解析と実験では乖離がみられる. これは, 実験供試体は実際の製作で想定される誤差を考慮したものとなっており, End.PL の密着が一樣でなく, その影響が現れたものと考えられる. End.PL の平坦性はボルト軸力の変動に影響するため, 製作時に十分な精度管理が不可欠であることが確認された.

いずれのボルトも載荷前, 載荷後の軸力の差は各ケースとも最大で 10kN 以下と僅かであり, 塑性ひずみは生じていないことを確認した. そして, 他の連結部の離間量, 鋼ひずみなどの計測項目で, 降伏, 破壊に関する変状は確認できなかった.

なお, 本連結構造の特性については, データ数も少なくボルト配置, 補強リブ配置, 載せかけ構造の幾何形状などについては合理化できる可能性もあると考えられ, 今後の課題とされている.

5. 緊急仮設橋の架設と試験施工

緊急仮設橋は断面と連結部構造を共通化するとともに基本ブロック長が 9.0m に統一されている. これにより, 中間ブロックの個数を変化させ, 12.0~57.0m の間で 9.0m 単位に支間長を変化させることが可能である(図-11). 現場連結部については, 切欠きを設けた構造としたため, 新規架設ブロックを架設済みブロックの切欠き部に載せかけて施工することが可能となっている. 1方向からのクレーン架設工法や送出し架設工法においては, 施工時間の短縮と施工の容易性が確保できる構造となっている. そして, 架設時の効率化を図るため各ブロックの種類と向きを即座に認識可能とするため塗装種類は 4

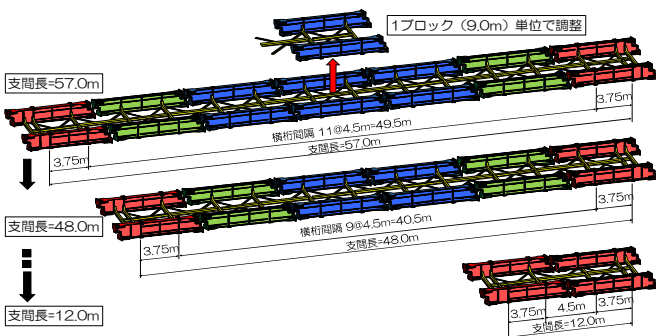


図-11 緊急橋で対応する支間長の組合せ例



写真-4 組立て状況 (和歌山工場)



写真-5 走行試験状況

種類とするなど各種工夫が施された.

試験施工は, 想定したクレーン一括架設工法, クレーン・ベント架設工法, 送出し架設工法の 3 種類の架設工法のうち, 60m 級緊急仮設橋の送出し架設パターンの主桁組合せとし, 災害時の緊急施工を想定した架設手法で桁を組立て, 本体部はボルト本締めまで行った(写真-4).

また, 後方のカウンター載荷桁部は近接箇所において仮組立てした. 桁架設完了後, 床版パネルおよび両側の仮設スロープを設置し, 設計活荷重 (25t 吊ラフテレーンクレーン) の走行試験を実施した(写真-5).

設計・架設計画において課題であった下記項目について, 試験施工により検証を行った.

- ①桁組立て所要時間の検証
- ②災害時を想定した緊急施工での桁組立て精度の検証
- ③死荷重および設計活荷重載荷時の性能検証

5.1 桁組立て所要時間

架設計画でシミュレーションした桁組立てにおける各工種の所要時間に対する実所要時間を表-4 に示す.

表-4 架設所要時間対比表

工程	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
本体桁組立	計画 10時間																								
	結果 8時間										計画より2時間短縮														
本体桁高力ボルト	計画 6時間送付機4台																								
	結果 6時間送付機2台										機械4台で短縮可能														
カウンター載荷桁補強	計画 6時間																								
	結果 6時間																								
アルミ床版設置	計画 6時間																								
	結果 2時間										計画より4時間短縮														

本体桁組立て，ボルト本締め，床版パネル設置については，計画時間以内での施工が立証できた．しかし，後方部のカウンター載荷桁部の組立てについては，小物部材が多く，複雑な部材構造となっており，簡素化の余地があると考えられる．

5.2 桁組立て精度結果

桁架設精度の初期不整として，FEM 解析にて想定した桁の通り誤差(支間中央 70 mm)および主桁の鉛直度(±5mm)に対し，通り誤差は最大 5mm，主桁の鉛直度誤差は最大±4mm であった．その他の主桁間隔，橋長・支間長についても，出来形管理基準を十分満たすことが確認できた．これにより，今回の組立て手順・要領で桁組立てした結果，出来形精度を十分確保できることが立証された．

5.3 桁のたわみおよび走行試験の結果

支点支持状態における死荷重たわみおよび 25t 吊ラフテレーンクレーン支間中央載荷時の死荷重+活荷重たわみを計測した結果を図-12 に示す．死荷重および活荷重たわみともに，設計たわみ量の 90%程度となった．この要因は，支点部における回転拘束とたわみ算出時の縦桁剛性の取り扱いなどが関係していると考えられる．

25t 吊ラフテレーンクレーン走行中の橋梁状態を目視確認した結果，主桁継手部における隙間の発生や異音等は一切なかった．また，活荷重載荷前後における桁断面の変形状態と，たわみ量を計測した結果，両者ともに活荷重載荷前後の計測値に差は生じず，完全に元の死荷重状態の形状に戻ることを確認した．

5.4 試験施工のまとめ

本試験施工により，桁組立て手順および桁組立てタイムスケジュールの妥当性を確認した．そして，設計活荷重の走行試験により，目標とした仮橋としての機能を十分保有していることが確認された．

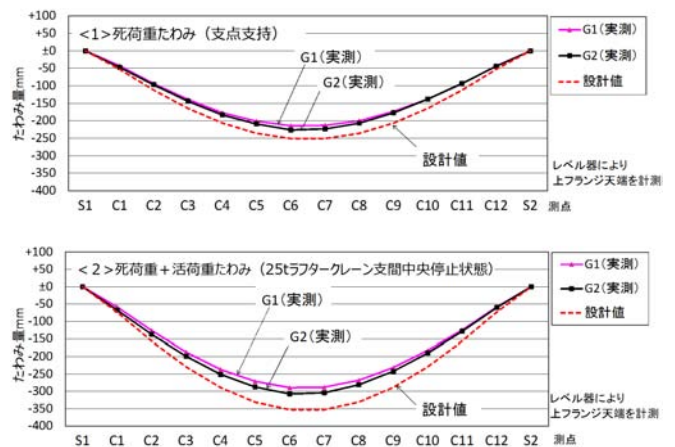


図-12 たわみ管理

6. あとがき

本工事における上部工設計，連結部模型実験，及び各種試験施工の概要について報告した．

本工事期間中には，近畿地方整備局を主なメンバーとした有識者から構成される「緊急仮設橋に関する検討委員会」が開催され，各委員より種々の業務において，貴重なご指導・ご助言をいただき，無事工事を完了することができた．

最後にこの場をお借りし，検討委員各位，ならびに近畿地方整備局の方々に深く感謝の意を表し，厚くお礼申し上げます．

参考文献

- 1)鈴木勝，玉越隆史，沢田道彦：緊急仮設橋の開発について，橋梁と基礎，Vol.49，pp.46-51，2015.11
- 2)玉越隆史，石尾真理，大久保雅憲，加藤浩一，氏本敦：超高力ボルトの橋梁分野への適用に向けた各要因の影響，土木技術資料，第55巻，第5号，pp.34-37，2013.5
- 3)日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針，2004.8