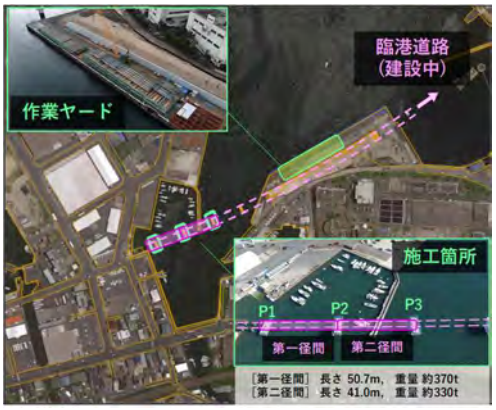
プレビーム合成桁橋の海上一括架設における合理化施工の取り組み

東亜建設工業(株)　正会員　○府川　裕史　河村　誠
東亜建設工業(株)　柏木　亮太　日高　健寿
東亜建設工業(株)　若松　宏知　江口　浩敬

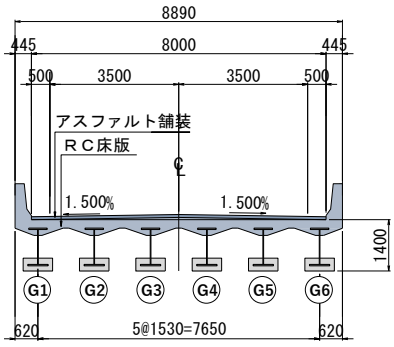
１．はじめに

鋼桁とコンクリートを合成してプレストレスを導入したプレビーム合成桁は，桁の剛性が高くたわみが小さいため，他形式に比べ低い桁高とすることが可能である．経済的な設計・施工の計画ができることから，これまでに，桁高が制限される橋梁桁や建築物の梁等に多く適用されている[1),2)]．

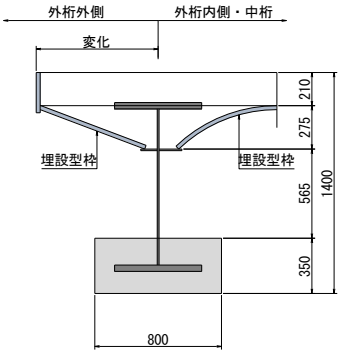
当社が施工したプレビーム合成桁橋の上部工工事の概要を**図-1** に示す．上部工は，6 本の主桁（プレビーム合成桁［G1～G6］）および主桁同士を結合する横桁で構成される．本工事は，橋脚 P1～P3 間の 2 径間を対象とし，海上域での上部工架設の際は，施工の安全性確保および工程短縮を目的として，事前に作業ヤードにて横組みした 6 主桁のプレビーム合成桁を，大型起重機船により一括架設することを計画した．プレビーム合成桁橋の架設作業は，事前に横組みした複数主桁を一括架設した事例はあるものの，その施工は陸上クレーンによる 3 主桁までのものであった．本施工のように大型起重機船を用いて海上域から複数本の主桁を一括架設する事例はこれまでに実績がなく，前例のない試みであった（プレビーム振興会へのヒアリング結果）．本稿では，このような大型起重機船を用いたプレビーム合成桁の海上一括架設に関して，生産性向上や施工効率化を念頭に，当社が実施した施工合理化の取り組みについて報告する．



(a) 施工位置図



(b) プレビーム合成桁
（主桁 G1～G6）



(c) プレビーム詳細
（主桁一般図）

図-1　工事概要

２．施工上の課題

海上一括架設に関する施工上の課題を**表-1** に示す．これらの課題を，陸上クレーンによる一般的な単独桁架設の場合と比較して要因別に分類すると，「A：海上施工特有の課題」，「B：大型起重機船の作業に起因する課題」，「C：主桁を連結した一括架設の課題」に大別される．各課題に対する主要な対応策は**表-1** に記載の通りであり，施工検討段階から関係者で協議を重ね，諸対応策を施工計画に盛り込んだ．その中でも，「C：主桁を連結した一括架設の課題」に関しては，特段の留意事項として，起重機船による吊り上げ時に吊り荷重が不均等になり，各部材にねじれが生じることにより，主桁や横桁といった主構造部材を損傷することが懸念された．そのため，一括架設作業において各部材の健全性を確保することが，本施工における重要課題となった．

キーワード　プレビーム合成桁，海上一括架設，施工合理化，計測施工
連絡先　〒163-1031　東京都新宿区西新宿 3-7-1 新宿パークタワー31F 東亜建設工業株式会社 土木本部 設計部　ＴＥＬ 03-6757-3844

表-1　大型起重機船による海上一括架設の施工上の課題と主な対応策

課題の分類	施工上の課題	主な対応策
A：海上施工特有の課題	・浅い海域のため潮位変動により作業船の喫水が確保できなくなる等の施工上の制限 ・狭隘な施工域周辺の制約条件の中，一括架設に必要な吊り能力を有する大型起重機船をどのように配置計画するか	・作業時間（潮間作業）を考慮したうえで，1 日に 1 径間ずつを架設する計画で作業スケジュールを立案 ・十分な吊り能力を有する大型起重機船（2,200t 吊）を配備，架設時の船体移動を支障なく行えるよう，アンカリング用のシンカーブロックを岸壁および海中に複数配置
	・船体揺動や強風により吊り荷のブレが生じることが想定されるなか，橋脚部への据付け精度の低下をどのように防ぐか（特に径間部の仕口合わせへの影響）	・据付け時は，橋脚部に取付けたアンカーピースと主桁をワイヤーで接続し，レバーブロックで位置を微調整 ・第一径間と第二径間の主桁間にはセッティングビームを設置し，ジャッキにより，仕口合わせの際の位置を微調整
B：大型起重機船の作業に起因する課題	・吊点が多数となる大型架設において，極力，桁に余計な応力が生じないように，吊り荷を均等に吊り上げるにはどうすべきか	・吊り枠の使用で鉛直吊りとし，吊り荷にかかる偏荷重等を防止 ・主桁 1 本ずつ，同位置に 2 箇所ワイヤーを取付け（吊り点：6 主桁×2 点＝12 点），全体を 4 ブロックに分割したうえ，平衡滑車（イコライザ）を用いて，ブロック内の 3 吊り点の張力を均等化
C：主桁を連結した一括架設の課題	・吊り上げ作業の地切りや据付け作業の仮置き時に，吊り荷重の不均等により，主桁間に変位差が生じ，横桁に想定外の断面力が作用して部材を損傷するおそれ	・地切時や仮置時に想定される主桁の支持条件を考慮し，発生が予想される断面力に対して部材の健全性を照査 ・横桁部材の損傷を防止するための補強対策として，架設補強横桁を設置
	・主桁間の変位差に起因する版のねじれの発生状況を施工時にどのように把握するか	・一括架設時の計測施工を実施，部材に発生するひずみを計測し，実際に生じている部材の応力度をモニタリング管理

３．検討内容

本工事の重要課題である一括架設に起因する吊り荷重の不均一等の課題に対して，本工事で実施した検討の流れを**図-2** に示す．事前検討では，二次元フレーム解析による不均等状態の検討として，地切りや仮置きといった一括架設時の不均等状態において各部材に発生する断面力を確認した．その後，主桁および横桁の健全性照査として，不均等状態における各部材の発生断面力に対する応力度照査を実施した．また，応力度照査の結果を受け，部材の健全性が保てない場合として，横桁の補強対策工（架設補強横桁）を検討した．計測施工においては，一括架設の実施工時に，無線式ロードセルによる吊り荷重の計測や，光ファイバーセンサおよびひずみゲージによるひずみ（応力度）の計測を行った．施工中の不均等状態の把握や，部材の健全性確認を行うとともに，事前検討結果との比較を行った．

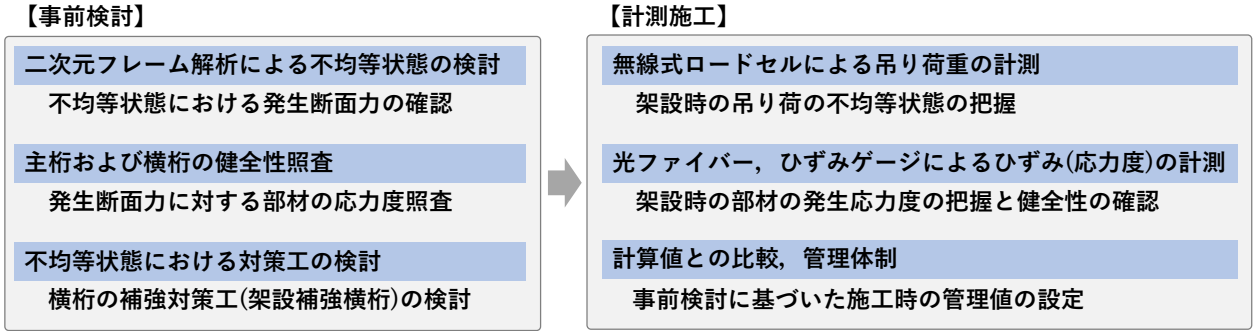


図-2　検討の流れ

４．事前検討

(1) 検討内容

a) 二次元フレーム解析による不均等状態の検討

二次元フレーム解析により一括架設時の不均等状態における各部材の状態を検討するにあたり，まずは，一括架設時の作業工程と桁部材の支持条件について整理する．**図-3** には，一括架設における主要な作業工程を示す．作業工程としては，【仮組み】（作業ヤードで主桁同士が横桁により結合され，各横桁部を支承にして全面的に平置きされた状態）や【吊り上げ】（主桁の吊り点を介して 12 本の吊りワイヤーにて上空に完全に吊り上げられた状態），【据付け】（施工場所の橋脚に桁が据付けられ，桁が橋脚に座った状態）があり，それらの工程間には，【地切り】（【仮組み】から【吊り上げ】にかけて，桁部材が完全に吊り上がるまでの状態）や【仮

置き】（据付け作業において，一部分が接地するなどして荷重の一部が橋脚に預けられた状態）という段階がある．**図-4** には，各主要工程における桁部材の支持条件を示す．特に【地切り】や【仮置き】といった支持条件が変化する段階では，部分的な吊り上げや接地により吊り荷重が不均等となり，主桁や主桁同士を連結する横桁に想定外の荷重が作用するおそれがあった．

図-5 には不均等状態を再現する支持条件の設定方法，**図-6** には具体的な支持条件の設定例（不均等状態：No.4 および No.5）を示す．全 12 点あるワイヤーの吊り荷重は，吊り荷重の不均等対策として，起重機船の平衡滑車（イコライザ）により，A～D の 4 区分のうちそれぞれ 3 点が均等化されている．事前検討の支持条件としては，これら 4 ブロックの吊り荷重と，据付け時の橋脚部の支点条件を組み合わせることで，No.1～8 の不均等状態を設定することとした（地切時：4 通り，仮置時：4 通り）．ちなみに，吊り点や接地点等の有無で表現するこれらの支持条件は，例えば，4 ブロックの吊り区分のうち，吊上げ荷重が完全に作用する区分と全く作用しない区分が混在する状態を示すもので，桁部材の不均等状態としては，かなり極端な状況を再現するものである．しかし，現実的には，吊り荷重が不均等な状態であっても，ある程度の荷重分担がなされる状況が予想される．本工事の一括架設作業でも，検討条件のような極端な不均等状態となる場面は想定しにくいものの，これまでに実績のない海上一括架設の不均等状態を検討するうえで，施工上の安全性や部材の健全性を確保する観点から，十分に安全側の検討条件となるよう配慮したものである．

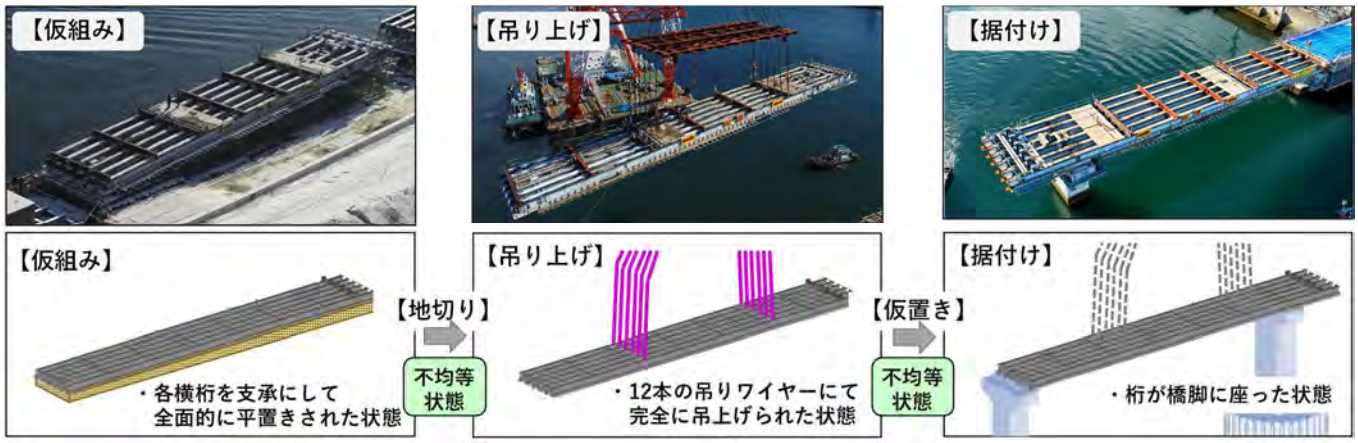


図-3　架設時の主要な作業工程

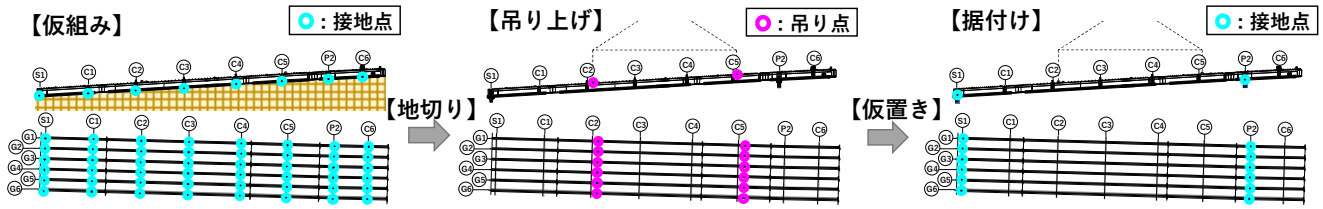
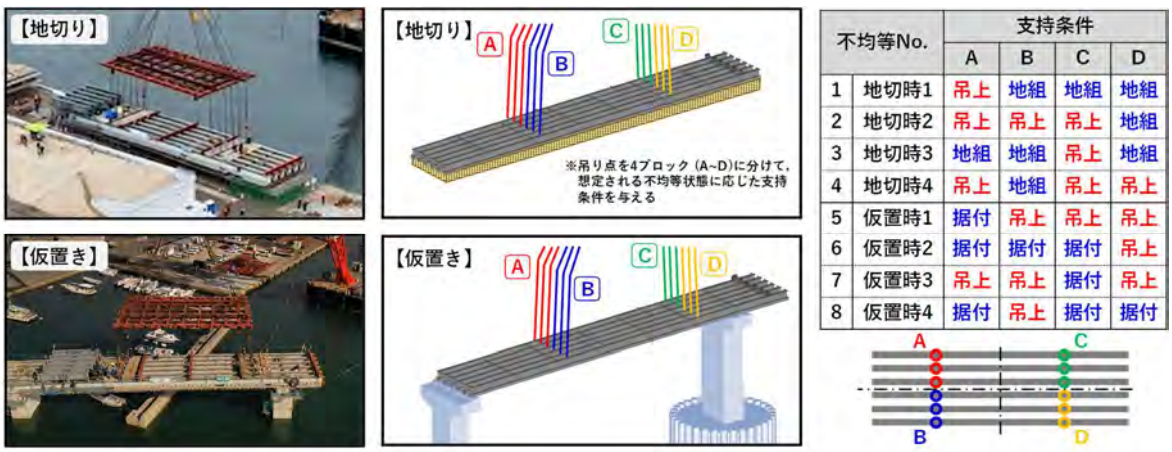


図-4　桁部材の支持条件の変化（第一径間）



不均等No.		支持条件 A	B	C	D
1	地切時1	吊上	地組	地組	地組
2	地切時2	吊上	吊上	吊上	地組
3	地切時3	地組	地組	吊上	地組
4	地切時4	吊上	地組	吊上	吊上
5	仮置時1	据付	吊上	吊上	吊上
6	仮置時2	据付	据付	据付	吊上
7	仮置時3	吊上	吊上	据付	吊上
8	仮置時4	据付	吊上	据付	据付

図-5　不均等状態を再現する支持条件の設定

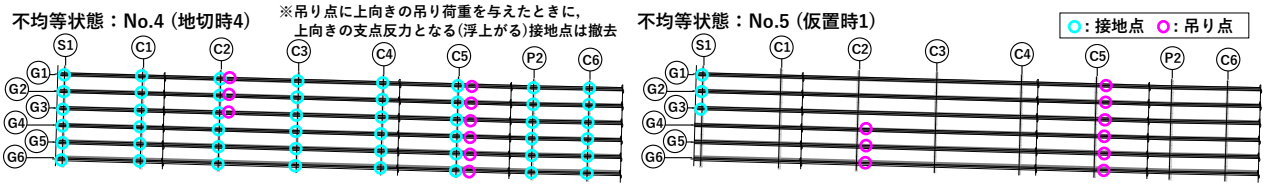


図-6　支持条件の設定例（不均等状態：No.4，No.5）

b)主桁および横桁の健全性照査と対策工の検討

二次元フレーム解析により算出した不均等状態における主桁および横桁の発生断面力に対し，各部材の応力度照査を行った．横桁は，溝形鋼および等辺山形鋼により構成される（図-7）．発生断面力による応力度が許容値を超えて，横桁部材が損傷する可能性があることから，補強対策として，発生断面力に対して十分な断面を有する架設補強横桁を，施工上支障のない範囲の横桁上部に追加配置することとした（図-8）．

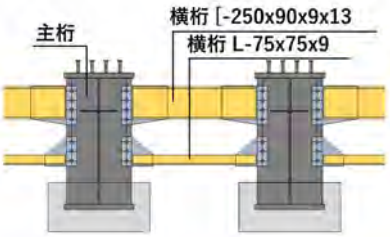


図-7　横桁の構造

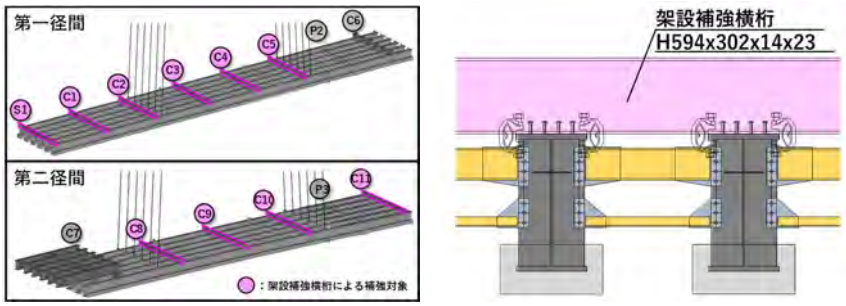


図-8　横桁の補強対策（架設補強横桁）

(2)検討結果

横桁の補強対策を実施しない場合において，不均等条件での発生断面力に対し桁部材の健全性を検討した結果，一部の横桁において許容応力度を超える箇所が確認された．図-9 にはその一例として，【地切り】段階の不均等状態（第一径間，不均等 No.4）の結果を示す．この不均等状態は，【仮組み】から【吊り上げ】に移行する間の【地切り】段階において，4 つのうち 3 つの吊りブロックの吊り荷重は作用するが，残り 1 方は未だ接地した状態を想定したものである．図-9 の分布図は，桁部材の上下縁における発生応力度（σ_{su}, σ_{sl}）を示しており，不均等の影響が大きく表れた C2 横桁において，上縁および下縁で許容応力度を超える結果となった．図-10 には，同じ不均等状態での，架設補強横桁による補強対策を実施した場合の検討結果を示す．補強桁を追加することにより横桁全体の剛性が高まり，横桁上下縁の発生応力度には減少傾向がみられ，すべての横桁において発生応力度は桁鋼材の許容力度に収まることを確認した．その他の不均等状態でも，架設補強横桁の追加により，横桁および主桁の発生応力度が許容値内に収まることを確認した．

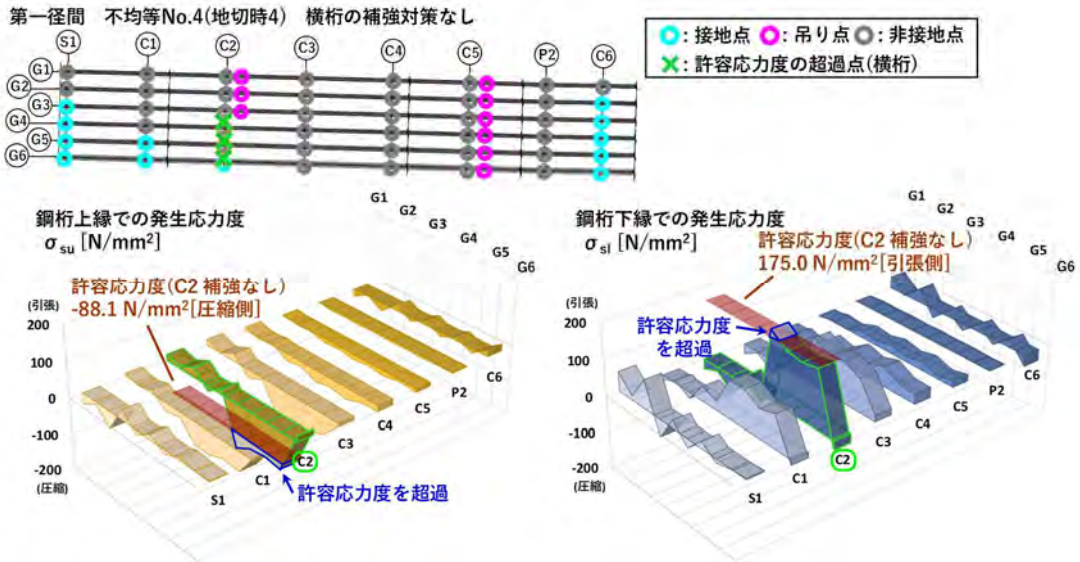


図-9　不均等による横桁の応力の発生状況（第一径間，No.4［地切時 4］，横桁の補強対策なし）

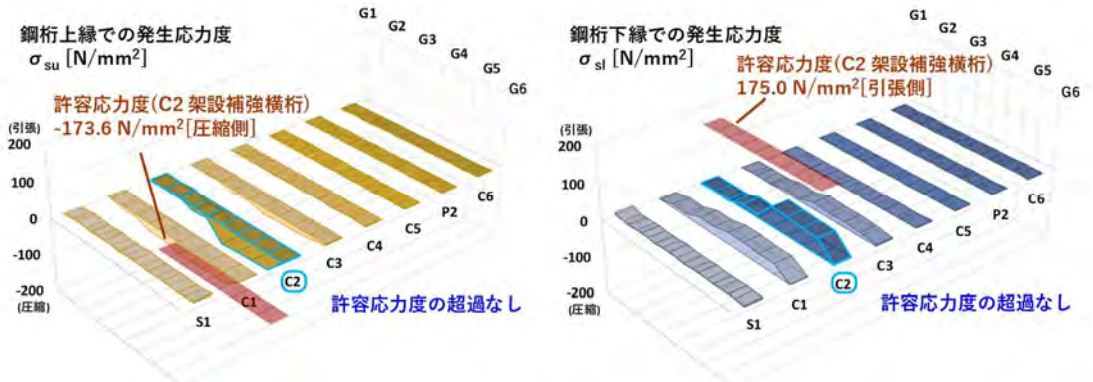


図-10　不均等による横桁の応力の発生状況（第一径間，No.4［地切時 4］，横桁の補強対策あり）

５．計測施工

(1)計測施工の概要

計測施工での計測器の仕様を**表-2** に，配置を**図-11** に示す．無線式ロードセルは，第一および第二径間において，吊りワイヤー12 本のうち 4 箇所（P1~P4）に設置した．光ファイバーセンサは，第一径間の主桁（G6）および架設補強横桁（S1, C2, C5）の上フランジおよびウェブ面に設置し，1m ピッチのひずみ量を計測した．ひずみゲージは，第一径間においては主桁（G6）および架設補強横桁（S1）に，第二径間においては主桁（G6）および架設補強横桁（C8, C10）にて，それぞれ 5 地点（上下 2 箇所）のひずみ量を計測し，曲げ応力を算出した．主桁でのセンサ設置状況を**図-12** に示す．上下箇所のひずみ量から算出した曲げ応力は，**図-13** に示す方法により鋼桁の縁応力度に変換した．その他，各計測結果の検証・補正を目的に，第一径間および第二径間の主桁 G6 において，温度計を 1 台ずつ設置し，外気温を計測した．

表-2　計測器の仕様

	無線式ロードセル	光ファイバーセンサ	ひずみゲージ	熱電対（温度計）
計測器				
仕様	型式：RLP55T 容量：55t 最小表示：0.01t 精度：±0.3% 重量：13kg 作動温度範囲:-10～50℃	型式：PSS 外径：金属管 2.0mm±0.05mm 光ファイバー0.9 mm±0.1mm 許容張力：ステンレス 300N インコロイ 400N 使用温度：-10～60℃	型式：KFWS 抵抗素子：Cu-Ni 系合金箔 ベース：ポリイミド 使用温度範囲：-10～80℃ 温度補償範囲：10～80℃ 室温におけるひずみ限界：約 5%	型式：T 型 容量：常用限度 200℃

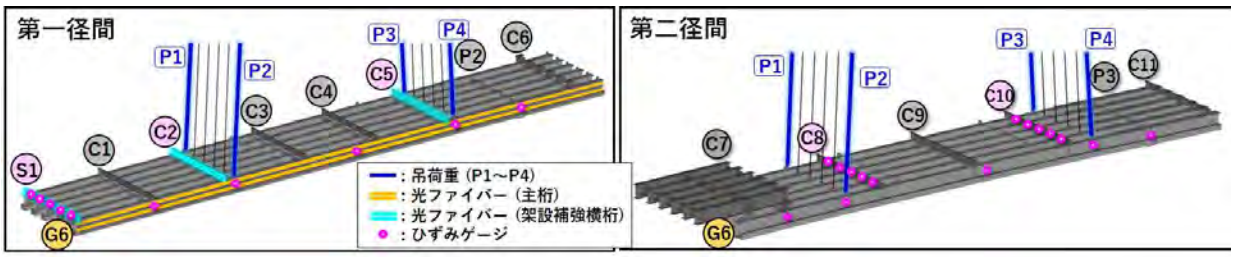


図-11　計測器の配置

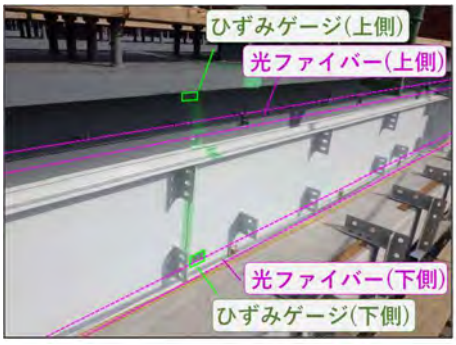


図-12　主桁でのセンサ設置状況

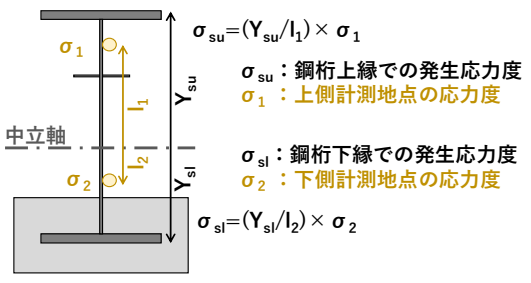


図-13　縁応力度の算出方法

計測システムの概要を**図-14** に示す．光ファイバーやひずみゲージ等によるの計測データは，桁上に設置した計測 BOX に一次集約させ，施工時は陸上に設置した監視パソコンと計測 BOX を常時通信させた．受信した計測データ最新値および経時変化図は計測室内のモニターに常時表示し，架設時の桁部材の状況を把握した．



図-14　計測システムの概要

(2) 計測結果

a) 吊り荷重による不均等状態の分析

無線式ロードセルで計測した吊り荷重の時刻歴を**図-15** に示す．第一径間は，【仮組み】～【地切り】～【吊り上げ】状態の移行区間を示す．第二径間は，【仮置き】～【吊り上げ】～【据付け】状態の荷重推移を示す．図では，各施工段階において比較的荷重の変動が小さい時間帯を，各段階の代表区間として，ハッチングで表示している．**図-16** には，吊り荷重の分析結果を示す．吊り荷重と表した値は，各施工段階の P1～P4 の計測値を代表区間の時間帯において各々平均化したものである．併せて，各荷重同士の最大の荷重差，および吊り上げ時の最大荷重に対する荷重差の割合を示している．第一，第二径間ともに，【吊り上げ】段階では，最大の荷重差は 30kN 程度で，全体荷重に対する割合は 1%程度以下であり，吊り荷がほぼ均等に吊り上げられている状態であった．一方，【地切り】や【仮置き】といった，吊り上げ前後の作業の移行段階に着目すると，P1～P4 の最大の荷重差は約 40kN から 95kN と，【吊り上げ】と比べてやや大きい程度で，全体荷重に対する割合は 1.2%から 3.0%程度であった．【地切り】や【仮置き】段階においては，完全に吊り上った状態と比較して吊り荷重の不均等が若干大きい傾向を示す場合があるものの，その程度は吊り荷の全体荷重の数パーセント程度と小さく，吊り荷重の不均等状態は非常に小さいものであったといえる．

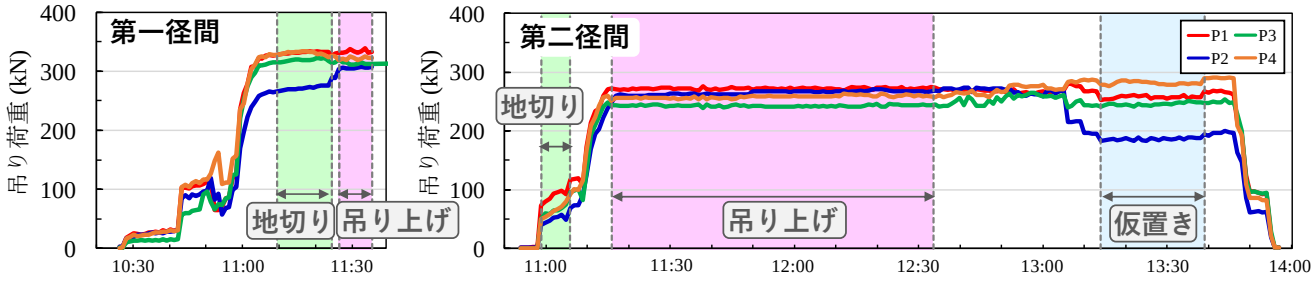
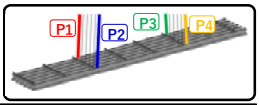


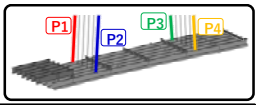
図-15　吊り荷重の計測結果



第一径間

工程	吊り荷重 [kN] P1	吊り荷重 [kN] P3	吊り荷重 [kN] P2	吊り荷重 [kN] P4	吊り荷重 平均値 [kN]	最大の 荷重差 [kN] (P1~P4)	吊り上げ全体 荷重と荷重 差の割合
地切り	331.8	318.9	271.5	330.8	313.2	60.3	1.5%
吊り上げ	333.7	313.7	305.8	321.6	318.7	27.9	0.7%

※吊上げ全体荷重：3,980 kN (第一径間)
3,170 kN (第二径間)



第二径間

工程	吊り荷重 [kN] P1	吊り荷重 [kN] P3	吊り荷重 [kN] P2	吊り荷重 [kN] P4	吊り荷重 平均値 [kN]	最大の 荷重差 [kN] (P1~P4)	吊り上げ全体 荷重と荷重 差の割合
地切り	88.1	63.2	48.9	63.4	65.9	39.2	1.2%
吊り上げ	272.2	242.8	264.9	258.1	259.5	29.4	0.9%
仮置き	257.3	245.5	186.2	281.2	242.5	95.0	3.0%

図-16　吊り荷重の分析結果

b) 横桁および主桁の発生応力度の検証

図-17 には，第一径間の横桁（S1，C2，C5）での，地切り段階における架設補強横桁の応力度分布を示す．この発生応力度は，光ファイバーおよびひずみゲージの計測位置における発生応力度を，鋼桁上下縁の応力度（σ_{su}, σ_{sl}）に換算したものである．光ファイバーおよびひずみゲージにより計測した S1 桁では，両センサの計測値はおよそ±20N/mm^2 程度以下で，その他の横桁でも，架設補強横桁の許容応力度（-173.6［圧縮側］～175.0［引張側］）に対して十分小さいものであった．なお，C5 桁の下縁応力度は，縁応力度に変換する際の誤差や，センサ配線のコネクタ接続による伝送損失の影響，当日の外気温の変動等による局所的な影響がみられたため，結果を除外している．この様に，横桁に発生した応力度は，どの地点も部材の許容値に対して十分小さい程度のものであった．

図-18 には，事前検討の二次元フレーム解析において発生した各横桁の応力度分布（σ_{su}, σ_{sl}）を示す．実際の吊り荷重の傾向は，**図-15** および**図-16** に示す通り，第一径間の地切り時では，吊り荷重の 4 ブロックのうち 1 ブロック（P2）のみが小さくなる不均等状態にあり，この状態は，**図-5** の事前検討で想定した不均等条件のうち，No.4（地切時 4）に相当する．**図-18** は，この不均等状態の発生応力度の計算値を示しており（**図-11** の結果を再編），吊り荷重の不均等の影響が大きい範囲（特に横桁 C1，C2）に局所的な応力が発生している．**図-17** の応力度分布には，参考として，対応する横桁それぞれのフレーム解析の計算値を併せて表示しているが，フレーム解析で局所的に応力が発生した C2 桁に着目すると，実際の計測では，解析による計算値ほどの応力度は発生していない．一方，S1 や C5 桁では計算値と同程度の発生応力度に収まっている．

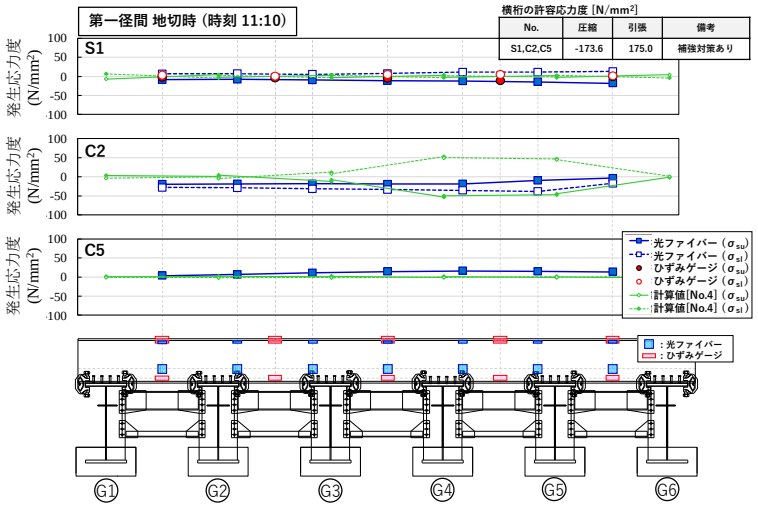


図-17　横桁における発生応力度の分布（第一径間）

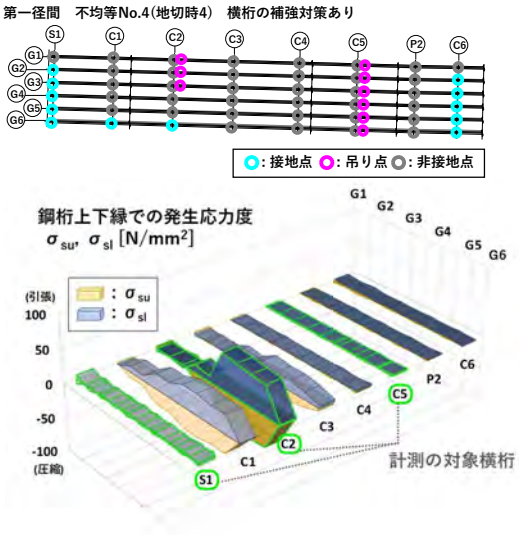


図-18　不均等状態における横桁の発生応力度の計算値

図-19 には，第一径間の地切り段階における主桁の応力度分布を示す．なお，主桁での光ファイバーやひずみゲージの計測結果から換算した下縁応力度は，縁応力度への変換誤差や伝送損失の影響が特に大きく確認されたため，一部データを棄却した．また，**図-19** には，G6 主桁の発生応力度の計算値を併記している．この計算値は，**図-20** に示した二次元フレーム解析での G6 主桁における発生応力度を表すもので，横桁の場合と同様に，第一径間の地切時に想定される不均等状態（不均等 No.4［地切時 4］）の計算値である．**図-19** の光ファイバーの上縁応力度（σ_{su}）に着目すると，右側吊り点付近（C5 横桁近傍）で比較的応力が大きく，吊り荷重の不均等性が顕著に現れたフレーム解析の計算値と近い傾向を示す．ただし，光ファイバー計測値は，左側吊り点付近（C2 横桁近傍）においても若干の応力の増加傾向を示し，また，ひずみゲージではより大きな応力値を示している．**図-19** には，別途検討を実施した単体主桁を所定の 2 箇所の吊り点にて鉛直に吊り上げた場合（不均等が全くない均等状態）の発生応力度の計算値も併せて表示しており，主桁の計測値の応力度分布としては，不均等状態（計算値［No.4］）と均等状態（計算値［吊り上げ］）の中間的な状態を示している．

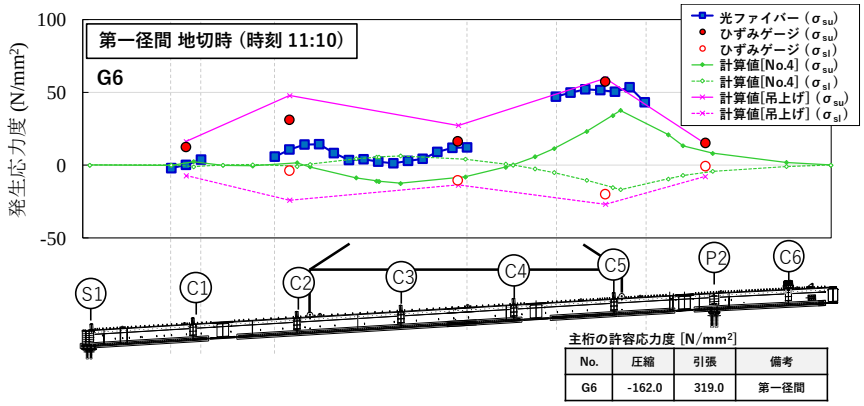


図-19　主桁における発生応力度の分布（第一径間）

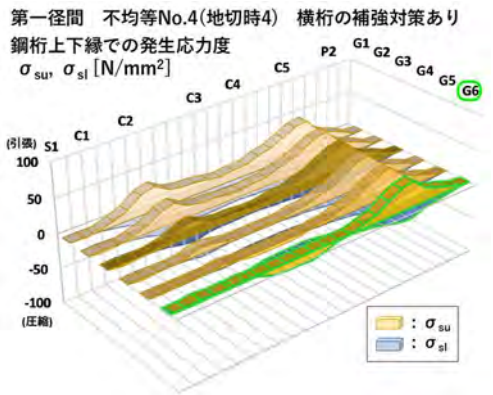


図-20　不均等状態における主桁の発生応力度の計算値

６．一括架設時の不均等状態についてのまとめ

一括架設時の不均等状態は，吊り荷重の分析により，地切りや仮置きといった施工段階においても，各吊り荷重の誤差は全体重量の数パーセント程度に収まる程度であった．海上大型起重機船に関する施工上の工夫や諸対応策の結果として，吊り荷重の不均等を最小限に制御したといえる．また，不均等状態に起因する桁部材への影響については，光ファイバーセンサ等の計測により，地切りや仮置き時の不均等状態においても，許容値を大きく下回る程度の発生応力度に収まっていることを確認した．さらに，横桁には事前検討で想定したほどの局所的な応力度は発生せず，主桁においても，事前に想定した不均等状態と均等に吊り上がった状態との中間的な状態にあったことが推測される．結果として，第一，第二径間のいずれにおいても，横桁や主桁には，想定外の断面力が作用して発生する部材の損傷等は確認されなかった．このように，一括架設時の不均等状態における桁部材の挙動が事前検討での想定内に収まったことは，実施工にて吊り荷重の不均等を最小限に制御できたことが大きな要因であるとともに，事前検討の二次元フレーム解析においては，吊り荷重や接地点といった支点条件の設定が，ある程度極端な不均等状態を再現し，十分安全側の検討を実施していたことも，要因の一つとして考えられる．

７．おわりに

これまでに前例のないプレビーム合成桁橋の大型起重機船を用いた海上一括架設を実施するにあたり，本施工では，懸念される施工上の課題に対して，施工方法の工夫や部材の健全性確保のための対策工の実施，計測施工による施工管理などの合理化施工の取り組みを行った．その結果，施工時の吊り荷重の不均等状態を最小限に制御し，効率的にプレビーム合成桁を海上一括架設することができた．本稿での報告内容が，今後の架設工事や，計測施工をはじめとする施工合理化の参考になれば幸いである．

参考文献

1）プレビーム振興会技術委員会：プレビーム合成げた橋 設計・製作・施工要領書　第 4 版（改訂），プレビーム振興会，2005．2）プレビーム振興会： PREBEAM Q&A，2017.