

伊良部大橋における鋼桁大ブロックの海上輸送の報告

Long-distance ocean shipping of steel box girder for Irabu Bridge



矢ヶ部 彰*¹
Akira YAKABE



下里 哲弘*²
Tetsuhiro SHIMOZATO



田井 政行*³
Masayuki TAI

要旨

伊良部大橋では、外洋を航海する前例の無い長距離の鋼桁大ブロックの海上輸送を無事に完了している。本橋では、大ブロックの海上輸送による鋼桁の損傷を防止するため、品質管理方針を策定し、それに基づく「大ブロックの海上輸送の輸送限界条件」と品質管理項目を設定し管理を実施した。本稿では、動揺解析を用いた輸送限界条件の設定、たわみ量の変化と塗装割れおよび疲労に配慮した波浪応力頻度による品質管理について報告する。

キーワード：大ブロック，海上輸送，品質管理，動揺解析，疲労損傷

1. はじめに

伊良部大橋主航路部橋梁は、沖縄県宮古島と伊良部島を結ぶ伊良部大橋の主航路に架橋する、全長：420mの3径間連続鋼床版箱桁橋である（図-1）。

架橋位置は亜熱帯地域の高温多湿に加え、台風常襲地域の海上であるため、日本一厳しい塩害環境と風環境が想定された。これらの環境下で供用期間100年を目指すために、本橋は次の特徴を有している。

- ①扁平箱桁構造を採用して耐風性を向上させた。
- ②防食下地をアルミ・マグネシウム合金溶射とし、そ

の上からフッ素樹脂塗装を施工した。

- ③全断面溶接構造を採用して表面に凹凸のない構造を実現し、防錆性能の向上を図った。
- ④架設中の塩分影響を最小限とするために、工場で架設ブロックの地組み立てを行った。
- ⑤架設ブロックの大きさは、長さ140m、幅16m、重量1600tであり、宮古島まで最長2000kmの海上輸送を実施し、起重機船で一括架設を行った。

ここでは、弊社が施工を担当したNo.2ブロックの事例を用いて、伊良部大橋大ブロックの海上輸送を報告する。

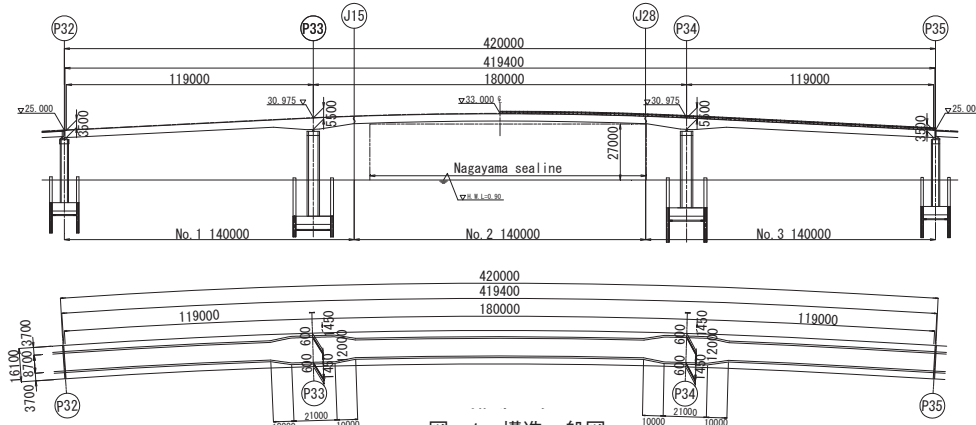


図-1 構造一般図

*¹ 橋梁事業本部 技術本部技術部 部長代理
*² 琉球大学 工学部環境建設工学科 准教授

*³ 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 助教

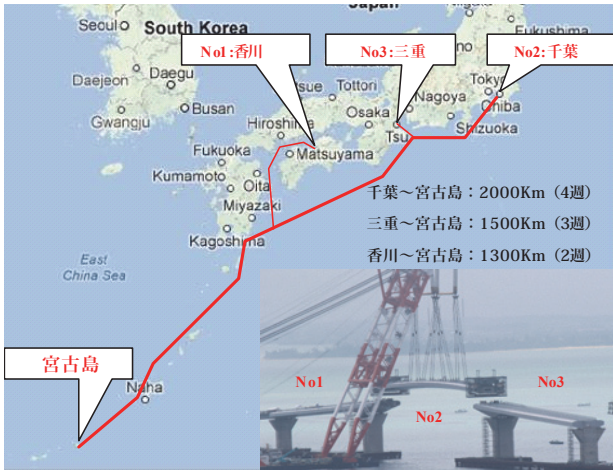


図-2 輸送経路図



写真-1 No2ブロック台船輸送状況

2. No.2大ブロックの海上輸送の概況

大ブロックの搭載一般図を図-3に、海上輸送に使用した台船の艤装状況を写真-2に、千葉県で実施した起重機船による大ブロックの積み込み状況を写真-3に示す。

台船上に前後方向と左右方向の移動を拘束するストッパーを設置して、輸送ブロックに作用する台船の動揺による加速度に対応した。なお、設計加速度は、海事検定値（通過海域の気象状況を踏まえて算出）とした。

No.2大ブロックの海上輸送概況を図-4に示す。曳航は主曳船が行い、入港等の補助が必要な際には補助曳船を加えた2隻で曳航を行った。航海状況は曳船より定時報告を受けると共に、動画撮影を1日1時間程度行って曳航状況を記録した。

更に、千葉県から宮古島への途中、鹿児島県の志布志港と沖縄県的那覇港に入港し、大ブロックに損傷等の問題がないことを確認したうえで、約1ヶ月間に及んだ曳航距離2000kmの海上輸送を完了した。



写真-2 輸送台船艤装状況



写真-3 大ブロックの積み込み状況

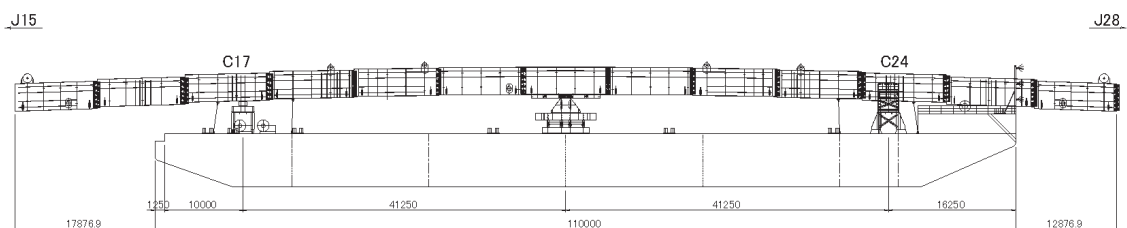


図-3 大ブロック搭載一般図

■回航上の主な避泊地

①伊勢湾、②新宮/串本、③土佐清水、④志布志湾、⑤古仁屋湾/奄美、⑥沖縄本島、

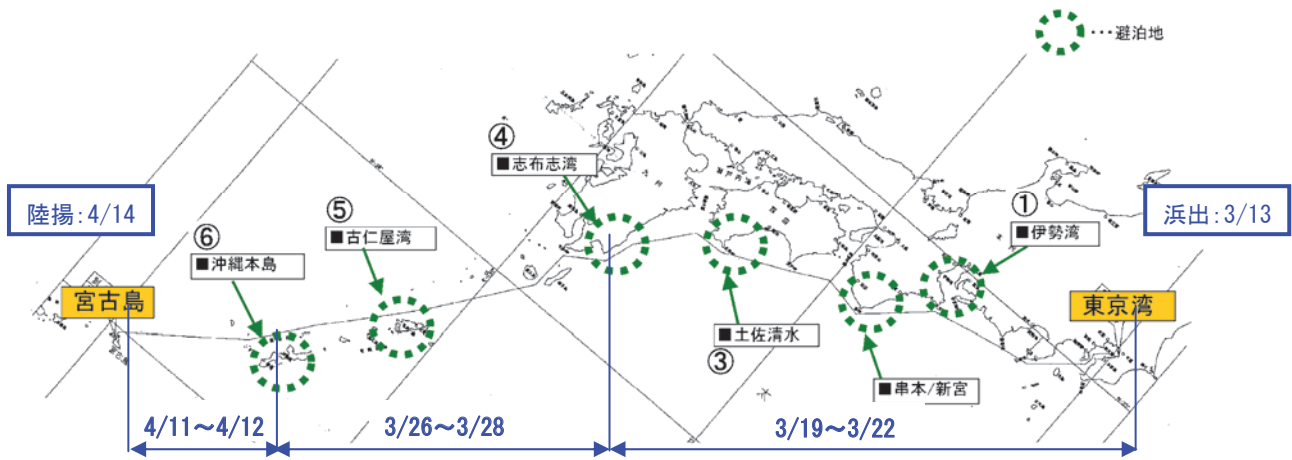


図-4 No2大ブロック輸送経路図

3. 大ブロック海上輸送品質管理

(1) 基本方針

東京ゲートブリッジにおいて、海上運搬中の波浪が原因と想定される部分的な損傷が発見され同部を再製作する事態に至った。

同損傷に関する技術検討委員会の発表では、「損傷原因としては、海上輸送中の波浪に伴う台船の動揺による振動、または海上輸送中の波浪による衝撃、もしくはその両者の合成が想定されるが、さらなる検証が必要である」とされている。

伊良部大橋主航路部では、同様の事態の発生を防止するために、東京ゲートブリッジでの損傷事例および同橋の技術検討委員会の発表を参考にして、大ブロック海上輸送の基本方針を次のように設定した。

- ①波浪による衝撃が原因で輸送ブロックに損傷が生じることを回避する。
- ②台船の動揺（ピッチング・ローリング）により輸送ブロックに生じる応力の疲労蓄積を最小限とする。
- ③海上輸送の前後で、損傷の有無を確認する。
- ④損傷の有無の確認は品質管理と疲労損傷に関する知識を有する技術者が実施する。
- ⑤品質管理計画は、海上輸送と疲労損傷に関する知識を有する技術者が策定する。

(2) 品質管理計画

基本方針に基づいて、海上輸送の品質管理計画を次のように策定した。

- 1) 海上輸送の限界条件を、輸送ブロックと波浪が接触しない条件（以降：輸送限界条件）とし、海上輸送の品質管理項目とする。
輸送限界条件は、輸送台船の動揺解析（図-5）結果を踏まえて、「有義波高：2.5m以下で海上輸送を実施する」とする。

$$Z_0 + Z(t) < h(t) \rightarrow Z_0 < h(t) - Z(t)$$

となれば、接触が発生すると考える。

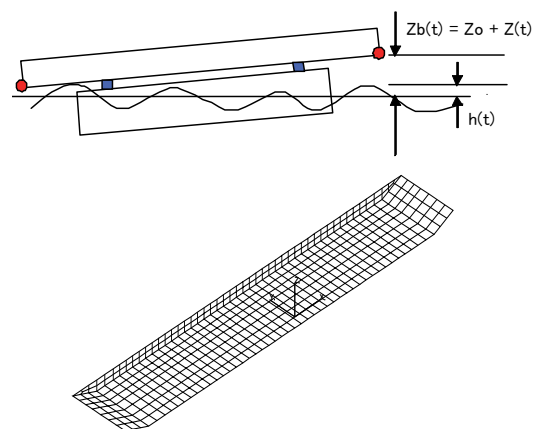


図-5 動揺解析のイメージ

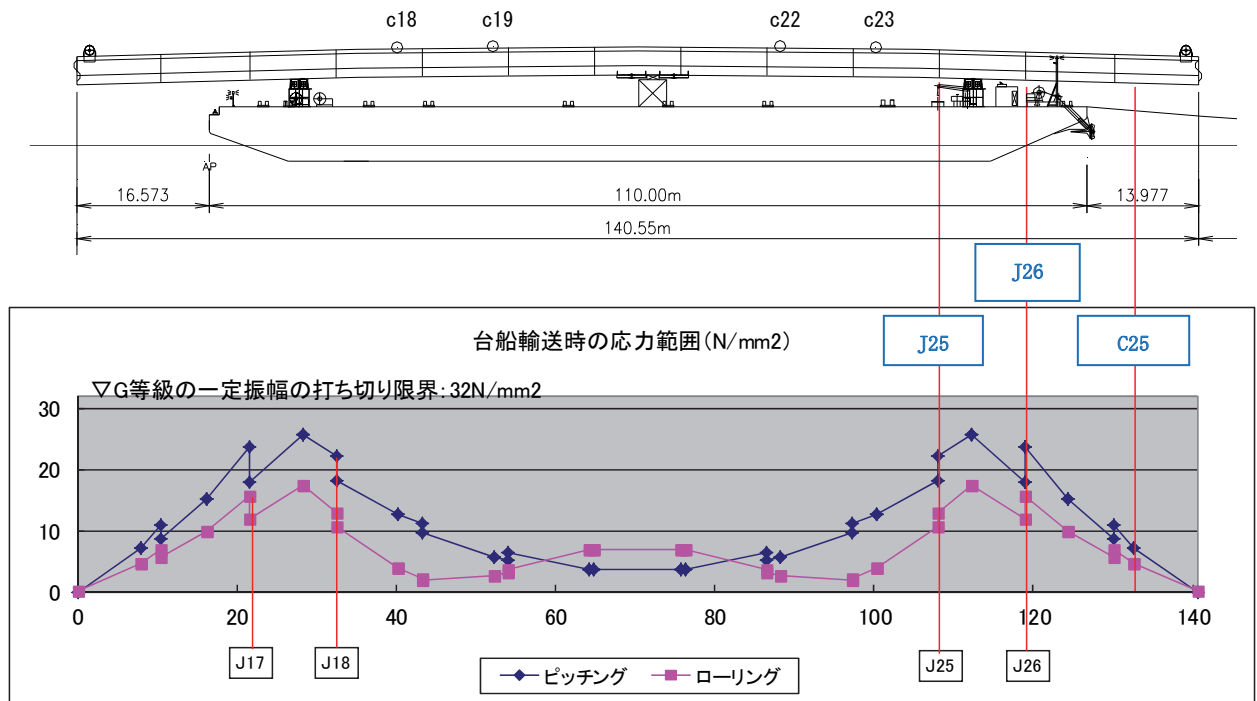


図-6 輸送中の繰り返し応力範囲

2) 海上輸送の可否判断は、通過海域の波高や風速の気象予報に基づいて行う。

また、輸送限界条件の履行確認は、曳船からの通過海域の気象状況に関する定時報告と、次の公開情報を基に行う。

- ①気象庁発表をはじめとした、風速や波浪に関する各種の公開気象データ
- ②リアルタイム・ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours）の計測結果

3) 波浪による動揺で、輸送ブロックには加速度が作用し、これにより繰り返し応力が生じる。

一方、鋼材の疲労強度は、応力範囲とその繰り返し回数に左右されるが、波浪は気象状況に左右されるため、繰り返し回数の想定は不可能である。このため、波浪によって生じる応力が一定振幅の打ち切り限界を超過しない輸送条件（支点条件）を求め、輸送荷姿に反映する（図-6）。

4) 輸送の前後で、①輸送ブロックのたわみ量、②疲労亀裂の発生に伴う塗膜割れの有無（図-7）、③

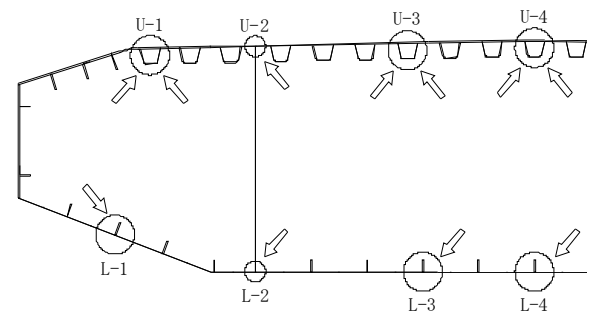


図-7 塗装割れの確認部位

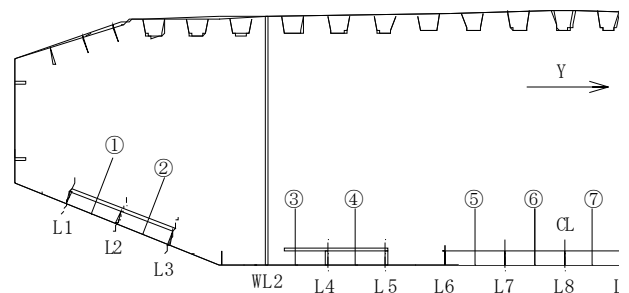


図-8 局部座屈による残留変異の確認部位

局部座屈が懸念される部位の残留変形の有無（図-8）を確認する。

5) 波浪応力の頻度計測（写真-4、図-9）を実施して、1) で設定した「有義波高：2.5m以下で海上

輸送を実施する」の妥当性を検証する。

計測海域は、弊社千葉工場から平良港の航海中、島影がなく比較的海象条件が厳しいと考えられる「沖縄本島的那覇港から宮古島の平良港までの間（計測時間：約24時間）」を選定した。

橋軸方向応力の計測位置は、応力範囲が最も大きく、波浪の接触も懸念されるJ25・J26（図-6）の「腹板継ぎ手のスカーラップ（図-9）」近傍とした。橋軸直角方向応力の計測は、波浪の接触が懸念されるC25付近の下フランジとした（図-6）。なお、計測は一軸の動ひずみ計で実施し、レインフロー法とピークバレー法によりひずみの頻度を記録した。また、安全性の余裕代を確保するために、頻度計測は温度変化の影響を加味して実施した。

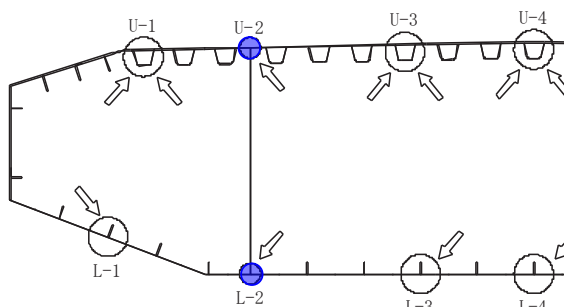


図-9 ひずみゲージ設置位置

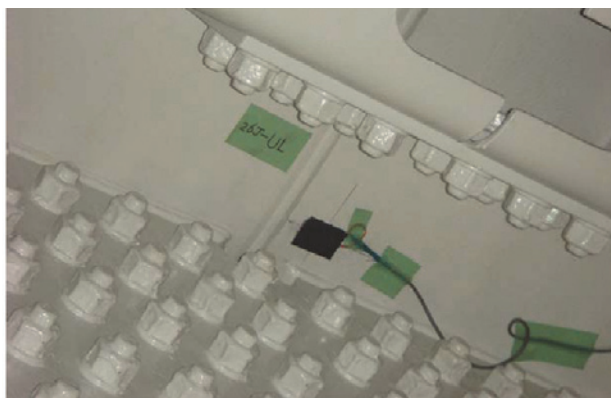


写真-4 ひずみゲージ設置状況

4. 大ブロック海上輸送の品質管理結果

(1) 大ブロック海上輸送計画の履行状況

海上輸送中における輸送限界条件「有義波高：2.5m以下で海上輸送を実施」の履行状況を図-10、11、12に示す。

通過海域の気象予報に基づいて可否判断を行うことで、あらかじめ設定した輸送限界条件を満足することができた。また、曳船の定時報告と、各種気象データおよびナウファスの計測結果は、良く整合していることを確認した。

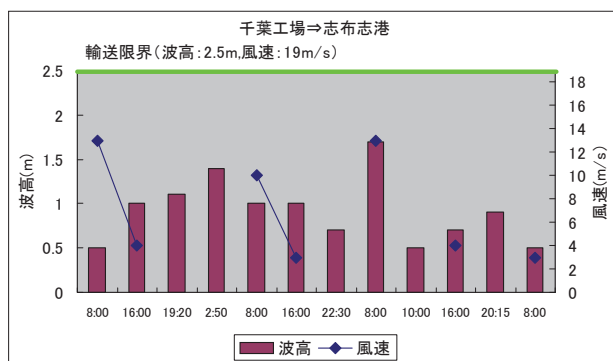


図-10 千葉工場⇒志布志港

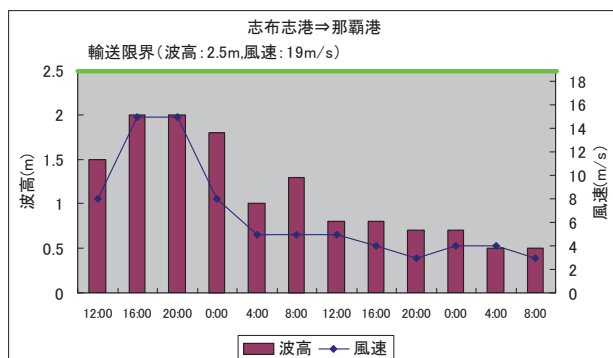


図-11 志布志港⇒那覇港

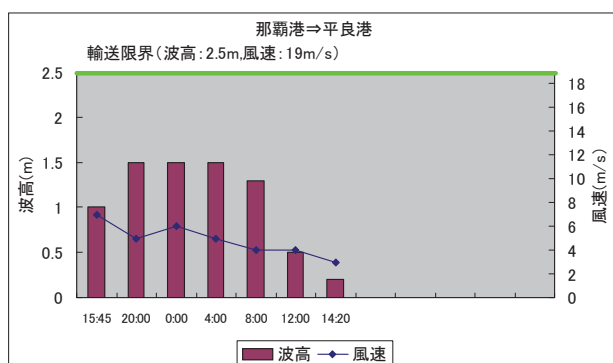


図-12 那覇港⇒宮古島（平良港）

(2) 海上輸送中の応力測定結果

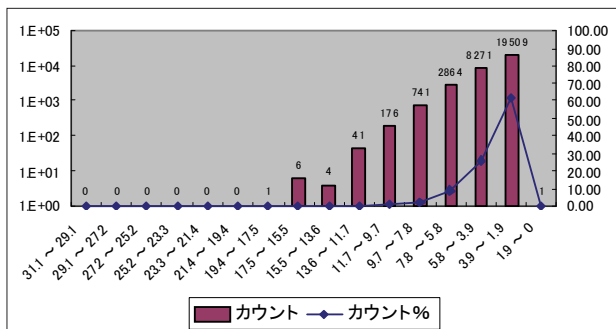
那覇港～宮古島の応力計測結果を表-1に、波浪応力の頻度の代表例としてJ25下フランジR側の計測結果を図-13に示す。なお、計測中の波高は概ね1.5mと推定される。

輸送ブロックには交番応力が生じ、橋軸方向応力の99.97%が変動振幅応力の打ち切り限界（G等級：15Mpa）以下で、残りの十数回は18Mpa以下の応力範囲であることを確認した。また、発生頻度は少ないが、橋軸直角方向応力の発生を確認した。（橋軸方向の約20%程度の大きさ）

なお、異なる計測点のうち、概ね半数が同時刻に最大最小応力値を記録していることから、この時間帯に最大の加速度が生じる何らかの事象が発生したと推定される。

表一 計測ポイントの最大最小値

	測定位置	最大値	最大値	最小値	最小値	最大値	最小値
		($\times 10^{-6}$)	(MPa)	($\times 10^{-6}$)	(MPa)	発生時刻	発生時刻
橋軸直角方向	C25-UL	5	1.0	-15	-3.1	2012/4/12 15:06:00	2012/4/12 9:20:00
	C25-LL	8	1.6	-8	-1.6	2012/4/11 16:24:00	2012/4/12 12:51:00
	C25-UC	2	0.5	-15	-3.0	2012/4/12 9:57:00	2012/4/12 12:25:00
	C25-LC	4	0.7	-14	-2.7	2012/4/11 16:24:00	2012/4/12 12:48:00
デッキプレート	J26-UR	68	13.5	-31	-6.3	2012/4/12 12:33:00	2012/4/11 16:24:00
	J26-UL	79	15.8	-50	-10.1	2012/4/12 11:49:00	2012/4/11 16:24:00
	J25-UR	67	13.4	-41	-8.1	2012/4/12 12:35:00	2012/4/11 16:24:00
	J25-UL	90	18.1	-53	-10.5	2012/4/12 11:48:00	2012/4/11 16:24:00
下フランジ	J26-LR	45	9.0	-35	-7.0	2012/4/11 16:24:00	2012/4/12 11:07:00
	J26-LL	41	8.3	-44	-8.8	2012/4/11 16:48:00	2012/4/12 13:24:00
	J25-LR	44	8.8	-45	-9.0	2012/4/11 16:24:00	2012/4/11 16:24:00
	J25-LL	46	9.1	-40	-7.9	2012/4/11 16:24:00	2012/4/11 22:47:00



図一13 J25下フランジR側の応力範囲の頻度計測結果

(3) 損傷確認

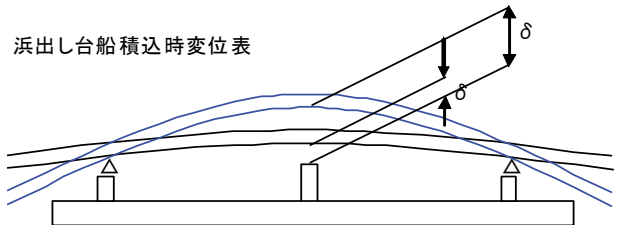
①輸送ブロックのたわみ量

輸送ブロックのたわみ計測結果を図一14に示す。千葉県での輸送ブロック搭載時と宮古島での陸揚げ時の計測結果は良く一致し、構造解析値とも良く一致している。

これより、海上輸送の前後で輸送ブロックの全体剛性に変化が生じていないことを確認した。また、台船の動揺に伴う加速度の大きさは、輸送ブロック

が弾性範囲内の変形に収まる（残留変位は生じない）程度であったと考察された。

千葉 計測値：130mm 宮古島 計測値：129mm
解析値：129mm 解析値：129mm



図一14 輸送ブロックのたわみ量の計測結果

②疲労損傷に起因する塗膜割れの有無と局部座屈の計測結果

海上輸送を実施する前の千葉において、また海上輸送を完了した宮古島において、輸送ブロックで疲労損傷が懸念される部位の塗膜割れの有無（写真一5）と、局部座屈が懸念される部位の鋼板の歪計測（写真一6）を実施し、変状がないことを確認した。



写真一5 塗膜割れの確認状況



写真一6 残留変位の確認状況

(4) 大ブロック海上輸送の品質管理結果のまとめ

品質管理計画として、①輸送限界条件の履行、②一定振幅の打ち切り限界を超える波浪応力を発生させない輸送荷姿を採用、③海上輸送前後の損傷確認（輸送ブロックのたわみ量、塗膜割れの有無、残留変形の有無）を策定し、千葉から宮古島までの2000kmの大ブロック海上輸送を無事に完了した。

また、輸送限界条件として設定した「有義波高：2.5m以下で海上輸送を実施」は、輸送ブロックに有害な影響を及ぼさない妥当な輸送条件であったと評価する。

5. おわりに

東京ゲートブリッジの損傷事例を踏まえて設定した、伊良部大橋の大ブロック海上輸送の品質管理方針に基づき「大ブロック海上輸送の輸送限界条件」を設定し、品質管理項目を策定してこれを実施した。

これにより、これまでに例のない外洋を航海する長距離の鋼桁海上輸送を、無事に完了することができたと評価する。今後の同様の事例の参考となれば幸いである。

最後に、大ブロック海上輸送を実施するにあたって、ご指導、ご協力、ならびにご助言を頂いた、伊良部大橋設計施工委員会、沖縄県宮古土木事務所殿をはじめとした関係各位に厚く御礼を申し上げて、本稿を閉じることとする。

<参考文献>

- 1) 国土交通省 関東地方整備局東京港湾事務所：記者発表資料 東京港臨海大橋（仮称）の損傷について（技術検討結果）中央径間トラス桁先端部：若洲側，2010.8.
- 2) 合田良實：わかり易い土木講座17 二訂版 海岸・港湾，彰国社，1998.9.

2014.4.23 受付

グラビア写真説明

竜の口橋りょう

仙台地下鉄東西線 竜の口橋りょうは、仙台市の八木山にある動物公園駅を起点とし、仙台駅を経由し荒井駅までの約13.9kmの東西を結ぶ路線のうち、竜の口渓谷に架設された、日本で3例目の鉄道・道路の併用ダブルデッキトラス橋である。現地施工では、環境保護区となっている急峻な渓谷を有する竜の口渓谷に、国内最大級の断面となる超重量級のトラス橋をトラベラクレーン張出し架設工法で施工した前例のない工事であった。施工中においては、東北地方太平洋沖地震が発生し、その後も余震が続く中、架設における安全対策に細心の注意を払い、様々な耐震対策を行ったうえで施工した難工事であった。

（古谷 賢生）

裏高尾橋

裏高尾橋は圏央道のうち、高尾山トンネル坑口部から中央道跨道部に架る橋梁です。形式は4径間連続PC・鋼混合ラーメン橋で、P2～P3間の接合部でPC橋と鋼桁とが接合されています。架設は地上の中央道と上空2本の既設のランプ桁との間に桁を架設するとともに難易度の高い工事となりました。上下線・ランプ合計4回の架設時に中央道の通行止めを行い、上空のランプはいずれも迂回路として供用した状態で架設が行われました。

（熱海 晋）

当別川橋

本橋は、千歳市を起点とし小樽市に至る地域高規格道路である道央圏連絡道路当別バイパスの当別川に架かる、最大スパン134m、桁高が3.4m～6.8mに変化する変断面の形状を有する長大橋です。平成15年に暫定2車線にて供用し今回4車線化のセパレート橋として完成しました。

（斉木 敦）