

大空間構造物のRC造テンションリング構築時の挙動 - 建物概要と施工手順に基づく応力解析 -

淵上 勝志*** 都祭 弘幸*
三浦 康成*** 藤本 良和**

要 旨

シンガポールのマリーナベイに建設中のエスプラネードシアターは、収容客席数1,800のコンサートホールと、3面舞台とオーケストラピットを擁する2,000人収容の劇場をメインとした、総合的文化施設である。コンサートホールと劇場の2棟は、それぞれ大空間屋根によって2重に覆われ、その屋根は外周のRC造の梁（リンクガーダー）によって支持されている。このリンクガーダーは、樋としての機能を有するため特殊な断面形状となっている。テンションリングとして機能するために、引張力・ねじれ・2軸曲げが発生し、複雑な構造的挙動を示す。リンクガーダーは特殊な断面形状をしているため、施工精度を確保するためにハーフPCa化が採用された。本報では、このリンクガーダーに発生する応力状態を解析的に把握するとともに、ハーフPCa採用とその施工の問題点把握のために実施したモックアップについて、計画および実施状況について述べる。

1. 目的

本報告では、シンガポールで受注したエスプラネードシアターのリンクガーダー施工に関して構造的な検討を行った結果を述べる。その1では、建物概要とテンションリングとして機能するリンクガーダーに発生する複合応力の把握、施工手順によりリンクガーダーに発生する

応力の変動について検討を行う。また、リンクガーダーのモックアップの目的と概要を示す。その2では、リンクガーダーにPCシェルを適用した際の構造的性能を実験から確認した結果を報告する。

2. 建物概要

イギリスの建築家Michael Wilfordによってデザイ

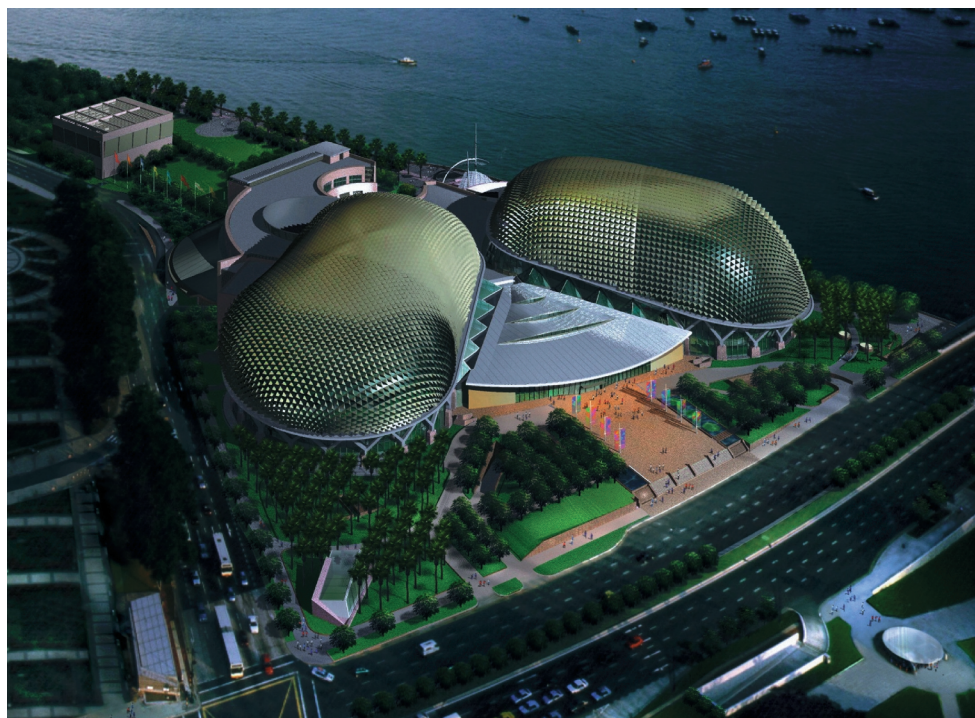


図 - 1 エスプラネードシアター完成予想図

ンされたシンガポールの国家プロジェクト、エスプラネード・シアターは、2,000席の劇場と1,800席のコンサート・ホール、2棟を中心とした複合的分化施設である。図1に示すパースのように平面的には2棟とも楕円形状を有し、ドーム状の屋根で覆われている。この屋根は楕円形状をしたRC造リングで支えられ、その大きさは劇場が約100m×60m、コンサート・ホールが約90m×60mとなっている。

RCリングは屋根構造を支えると共に、雨樋の役割を兼ねることからリンクガーターと呼び、樋として機能させるため全体が7.7°傾き、図2に示す特殊な断面形状を有する。リンクガーターは地上12~24mでRC造Vカラムによって支持されている。また、低い側ではリングが外側に持出した架構形状となっている。なお、リンクガーター断面は全周にわたって同一断面である。

このような建物の架構・断面形状を考慮し、リンクガーターの底面にPCシェルを適用した断面を提案・採用し品質確保・施工精度および高所作業の低減を図った。また、仮設の転用を考慮した施工時解析を行い、仮設の合理化を図った。本報では、リンクガーターの応力、PCシェルを用いた施工手順、および施工時解析について述べる。

3. PCシェルを用いたリンクガーターの応力・変形

リンクガーターとそれを支持するVカラムとドーム状屋根とは図2に示す点Aを通る構造心で計画されている。しかし、リンクガーターの図心は点Bであることから偏心によるねじりモーメントの発生が予想される。また、水平・鉛直の2軸曲げおよびリング形状に起因する引張軸力も作用する。

リンクガーターはBritish Standardに準じて設計されており、2つの限界状態が設定されている。

SLS(Serviceability limit state) : 使用限界状態

ULS(Ultimate limit states) : 終局限界状態

それぞれの限界状態に対して(固定荷重・積載荷重・

風荷重・水平力)の組み合わせ荷重が定義されており、組み合わせ数は30通りにも及ぶ。

応力解析のモデル化は以下のように行う。Vカラム・Roundカラム等下部構造を含めた、全ての部材をビーム要素を用いてモデル化する。リンクガーターはその形状を直接入力し、内部計算により断面性能等を評価している。Vカラムのハンチ形状も解析に反映させる。リンクガーターの断面性能を表-1に示す。例として、図3~6にコンサート・ホールの終局限界状態における水平・鉛直・ねじり曲げモーメント分布および軸力分布を示す。また図中に各解析結果の最大値を併記する。

PCシェルの大きさは揚重機を考慮し、最大46kN(長さ

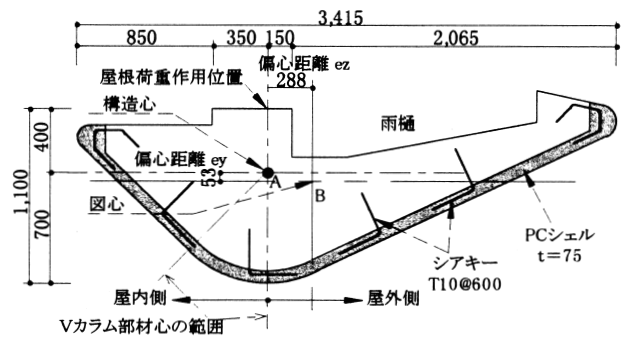


図-2 リンクガーター断面図

表-1 リンクガーターの断面性能

断面積	19515.64 cm ²	コンクリート性能	
断面二次モーメント		ヤング率	20.6 kN/mm ²
Iy(Y軸回り)	1.32E+08 cm ⁴	比重	23.5 kN/m ³
Iz(Z軸回り)	12969000 cm ⁴	ポアソン比	0.1667
ねじれ定数	25135980 cm ⁴		

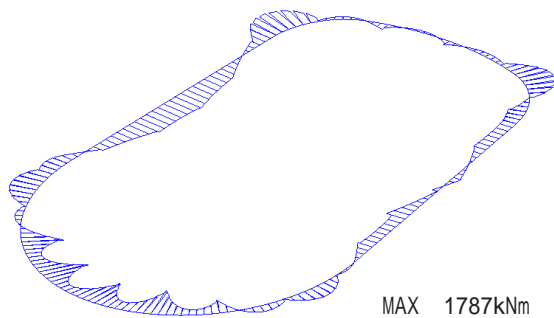


図-3 水平方向曲げモーメント分布図

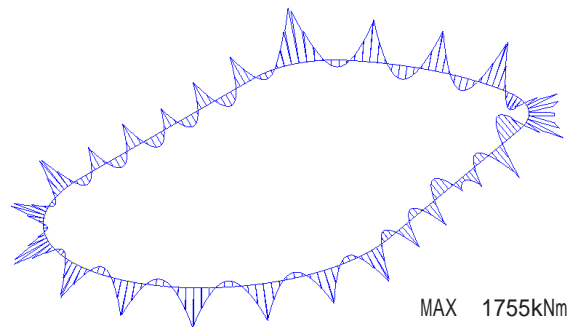


図-4 鉛直方向曲げモーメント分布図

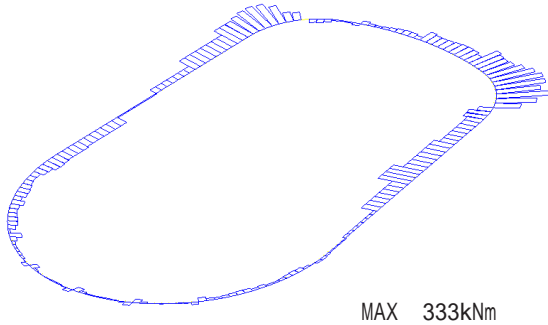


図 - 5 ねじれモーメント分布図

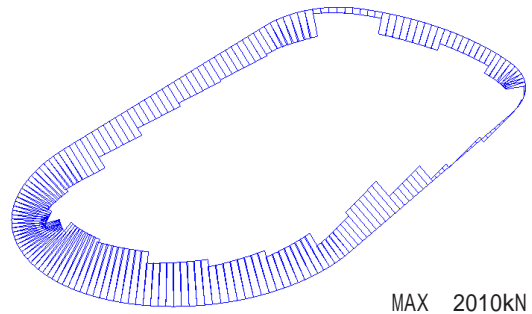


図 - 6 軸力分布図

約6.1m)とし、PCシェル間には20mmのギャップを設け接合されていない。PCシェルと後打ち部との界面は一体性を高めるためコッター処理すると共にシアキーを設けた。

PCシェルを用いた架構におけるギャップの変形に及ぼす影響を解析的に検討した。その結果、原設計に対して変位の差は最大0.037mm、回転角では最大 $1/10^5$ radであり、PCシェルを用いても架構の剛性低下は認められなかった。

4. 施工方法

リンクガーターはリング形成まで不安定な構造であるため、施工中は支保工による支持が必要となる。さらに、リンクガーターは自重だけで約50kN/mあるため支保工が大掛りとなる。支保工の転用を図りコスト削減するために図-7に示すようにリンクガーターを11工区に分割し、表-2に示す16段階から構成される施工手順を計画した。またVカラムが取り付けPCシェルには、座標

に忠実に開口部を設け、取り付け精度を高めるとともにVカラム施工上の基準点とする。

リンクガーター施工時の各工区の架構施工手順は下記9段階で構成される。

- PCシェル支保工の設置
- PCシェルのセット
- Vカラムの型枠・配筋
- Vカラムのコンクリート打設
- リンクガーターの配筋
- 上部ドーム支持プレート設置
- リンクガーター上部型枠設置
- リンクガーターのコンクリート打設
- 支保工撤去・転用(コンクリート強度確認後)

Gutter1はリンクガーターが下部柱よりも持出した架構となっているので、同部分の支保工はリング形成後に撤去することとし、Gutter2～11は支保工を転用する。同転用計画により、支保工数量は約半分に低減できる。

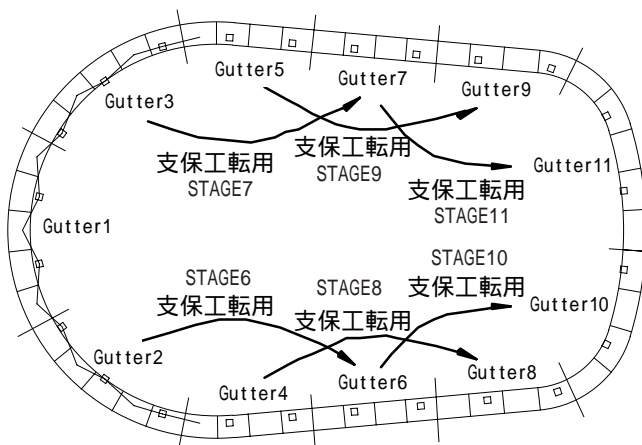


図 - 7 リンクガーター施工時の工区分割

表 - 2 各施工段階における支保工設置および撤去

Stage	Gutter										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	■										
2		■									
3			■								
4				■							
5					■						
6						■					
7							■				
8								■			
9									■		
10										■	
11											■
12											
13											
14											
15											
16											

5. 施工時応力解析

前述の施工手順に基づき、工事進捗の段階に応じた架構の施工時解析を行い、施工手順の妥当性・リンクガーターに発生する応力の検討を行った。応力は、Gutter1～11について、全ての段階(STAGE5～STAGE16)で求めた。図-8は施工段階STAGE8における解析モデルである。各部材共、断面形状を考慮したビーム要素で置換し、支保工部分はピン支持とした。荷重はリンクガーター自重と施工時荷重(1.47kN/m²)を想定する。図-9にSTAGE8の解析結果として、リンクガーターに発生する水平および鉛直方向の曲げモーメント分布を示す。

施工中に発生する各応力の最大値を图中的()内に併記する。施工中に使用限界状態時の応力の約2/3程度の応力が発生することが確認され、施工中に有害な応力は発生しないことが確認された。

また解析結果の例として、図-10にGutter2の施工段階における応力(水平・鉛直曲げモーメントおよび軸力)の推移を示す。横軸は施工段階(STAGE5～16)を示し、縦軸は応力の大きさを示す。応力算定位置は図-7

に示す それぞれ対応している。応力の変化は隣の工区の支保工が撤去された場合と、自身の支保工が撤去されたときに大きいことが確認された。

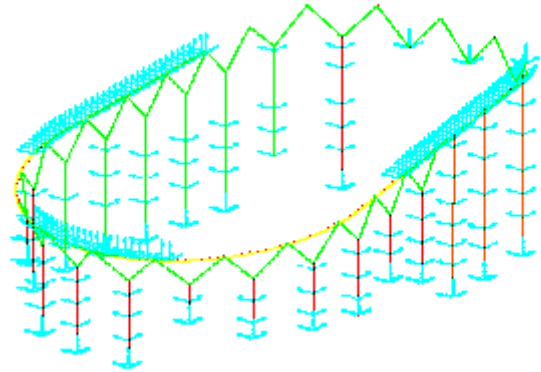
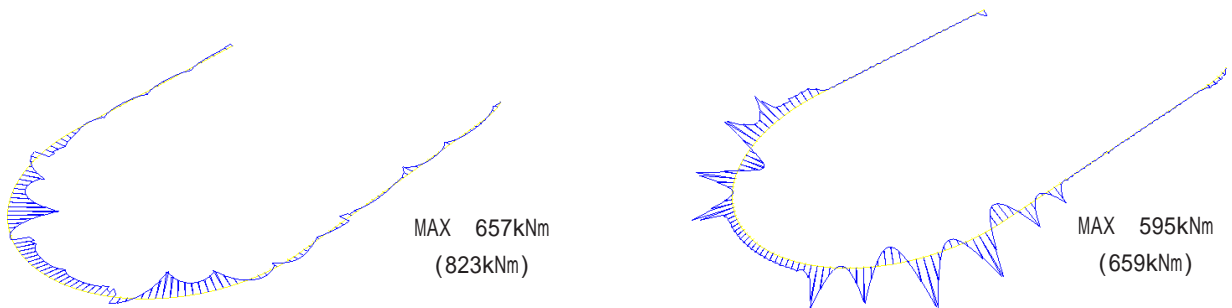


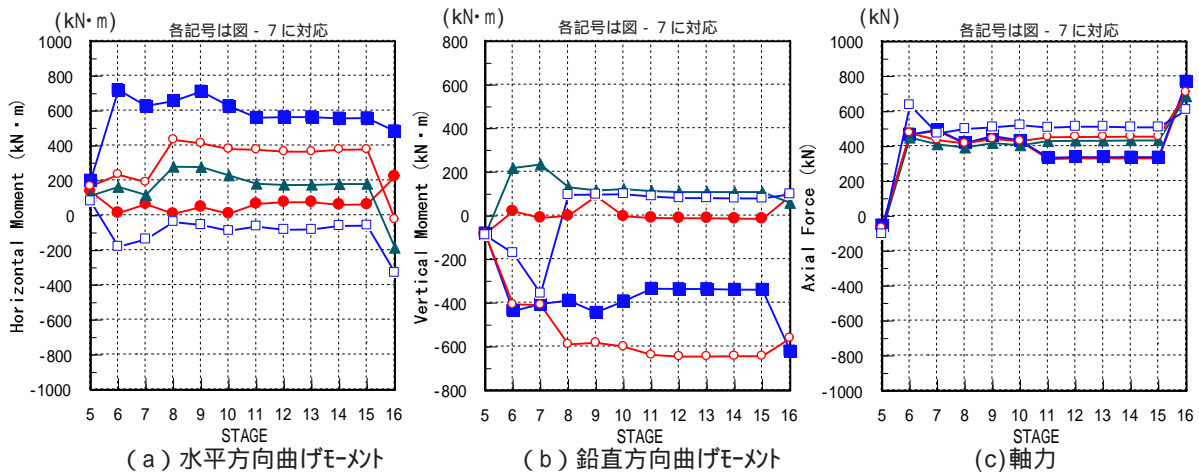
図-8 リンクガーター施工時応力解析モデル (STAGE8)



(a) 水平方向曲げモーメント分布

(b) 鉛直方向曲げモーメント分布

図-9 施工時応力解析結果 (STAGE8)



(a) 水平方向曲げモーメント

(b) 鉛直方向曲げモーメント

(c) 軸力

図-10 発生応力の変化 (Gutter2)

6. モックアップ

リンクガーターの施工上の問題点を検討するために、実物大のモックアップを制作した。モックアップの対象位置を図 - 1 1 に、完成状況を写 - 1 に示す。モックアップでは、施工性の問題点を検討する他にリンクガーターの自重による変形に伴い発生する応力の測定を行っている。前述までに、施工中支保工の撤去に伴うリンクガーターの挙動を確認し施工方法の妥当性を検証している。さらに安全性を高めるために、施工中に発生する応力を確認することとした。部材に発生する応力を直接計測することは困難なため、ここでは主筋のひずみから間接的に発生する応力を算定する方法を採用する。この方法の詳細は、文献3),4)で述べることとする。

モックアップでの主筋ひずみ計測位置を図 - 1 2 に示す。計測は一断面で4点、スパン中央部と端部の2カ所計8点の計測を行っている。計測成分は主筋ひずみと主筋温度および外気温である。

モックアップの主筋ひずみ計測結果を図 - 1 3 に示

す。計測期間は支保工撤去 24 時間前から撤去後約 60 時間後まで 1 時間毎である。支保工撤去時を图中に示す。支保工撤去に伴う応力の変化は S4 (スパン中央部下端) のひずみに顕著に現れている。しかしながら、1 日の温度変化によるひずみの変動も大きく、得られたひずみに温度補正を行い温度応力の影響を取り除く必要が生じている。

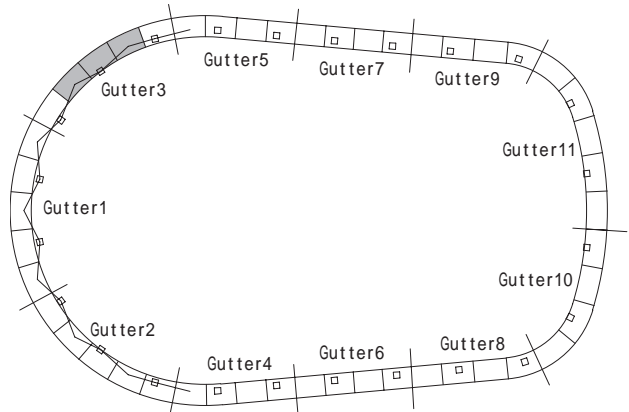


図 - 1 1 MockUp 対象位置



写 - 1 MockUp 完成状況

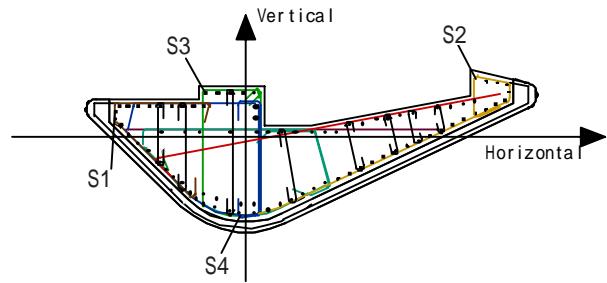
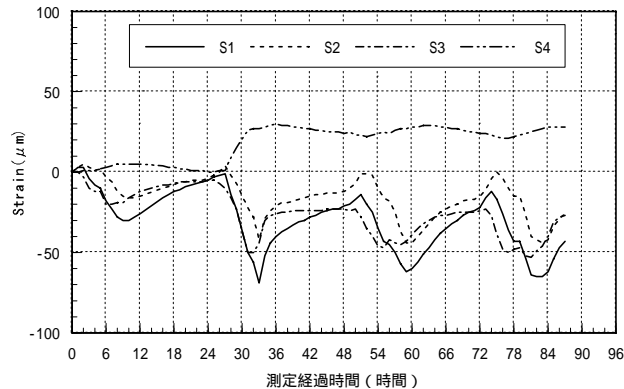
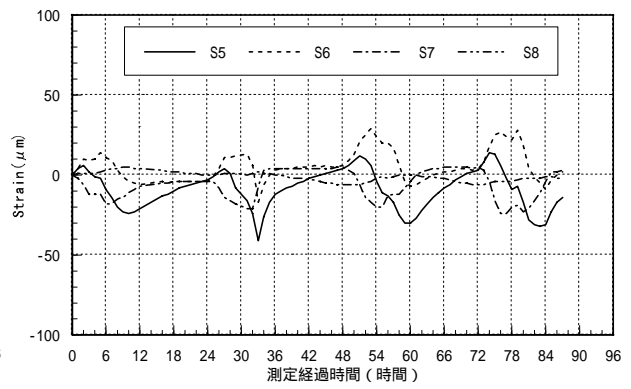


図 - 1 2 MockUp 主筋ひずみ計測位置



(a) スパン中央部



(b) スパン端部

図 - 1 3 MockUp 主筋ひずみ計測結果

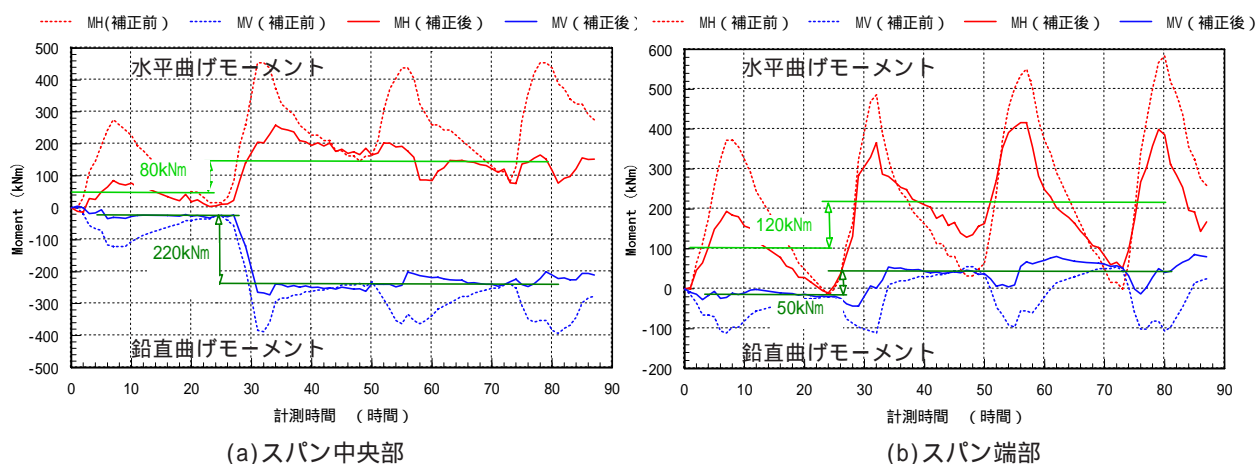


図 - 1 4 MockUp 発生応力算定結果

そこで各主筋ひずみ値に温度補正を行い、次報で述べるひずみから発生応力を算定する式を用いて、水平・鉛直方向のモーメントを算出した結果を図 - 1 4 に示す。

また、モックアップ部分を施工時解析と同様の手法でモデル化し、ひずみ計測位置でのモーメントを求めた。その結果を図 - 1 4 に示す。

図 - 1 4 から温度応力の影響を完全に取り除くことはできなかったが、支保工撤去後の変動応力を推測することができた。

また、解析から得られた曲げモーメントと計測から得られた曲げモーメントはよく一致することが確認できた。

7. まとめ 品質確保・施工精度および高所作業の低減を目的とし、特殊断面形状を有する R C 造テンションリングをハーフ P C 化した。架構の構造特性の検討および施工時解析を行い、施工計画の妥当性を検証・把握するとともに支保工の削減を図ることができた。

また、モックアップの主筋ひずみを測定することで、リンクガーターに発生する応力を推測することができ、解析結果とよく一致することが確認できた。これより、施工計画および施工時安定解析の妥当性が検証できた。

参考文献

- 1) 都祭弘幸他：特殊断面形状を持つ R C 造テンションリングの構造性能 (その 1) 建物概要と施工手順に基づく応力解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000 年
- 2) 三浦康成他：特殊断面形状を持つ R C 造テンションリングの構造性能 (その 2) 構造実験概要および破壊経過、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000 年
- 3) 淵上勝志他：特殊断面形状を持つ R C 造テンションリングの構造性能 (その 3) 実験結果および考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000 年
- 4) 三浦康成他：複合応力下におけるハーフプレキャスト

部材の構造特性、五洋建設技術年報、Vol.30, 2000