

後ラーメン工法による 橋梁上部工の施工について

松岡 峻也¹

¹四日市港湾事務所 工務課（〒510-0064 四日市市新正三丁目7番27号）

臨港道路「霞4号幹線」（P49～P53）は、国内の道路橋では3例目となる後ラーメン工法を採用している。本工法は、橋脚高さが低いほど懸念されるコンクリートのクリープ、乾燥収縮、温度変化および弾性変形による水平変位の影響を低減した工法である。橋桁をずらして施工を行い、所定の変位量を確保するまで待機期間を設けた後、剛結（後ラーメン化）するが、待機期間を過ぎても桁が動かないことが課題となった。このため、躯体の温度変化を考慮した水平変位量と待機期間の延長について検討し、強制変位を与え、後ラーメン化を完了し、無事完成することができた。

キーワード：海上橋、後ラーメン工法、計測管理、躯体の温度変化

1. はじめに

四日市港は、我が国有数の石油化学コンビナートを擁するエネルギー供給基地であるとともに、国際拠点港湾に指定され、国際貿易港として発展してきた。四日市港背後地域における生産活動および生活・消費活動の増大に伴い、近年コンテナ貨物量の取り扱いが増加傾向にある。それに伴い、港湾関連交通の増大が予想される。しかし、コンテナ物流の中核を担う霞ヶ浦地区は出島方式であり、本土とつなぐ交通路が霞大橋のみであるため、慢性的な交通混雑が発生しているとともに、周辺道路への環境負荷の増加が懸念されている。港湾関連交通を円滑に高速交通網に連絡することにより、定時性・即時性

の確保、港湾貨物の輸送コスト削減や、港湾サービス水準の向上を図ることを目的の一つとし、臨港道路「霞4号幹線」（以下、霞4号幹線）の整備を行い、平成30年4月に供用を開始している（写真-1）。

霞4号幹線は、霞ヶ浦地区から伊勢湾岸自動車道みえ川越ICを結ぶ延長約4.1kmの臨港道路である。路線の大半が高架となっており、このうちPC4径間連続ラーメン箱桁橋区間（写真-2）では国内でも珍しい後ラーメン工法を採用している。

本論文は、後ラーメン工法を採用した背景と施工状況についてとりまとめた。また、後ラーメン工法の留意点について検討した。



写真-1 霞4号幹線位置図



写真-2 PC4径間連続ラーメン箱桁橋区間

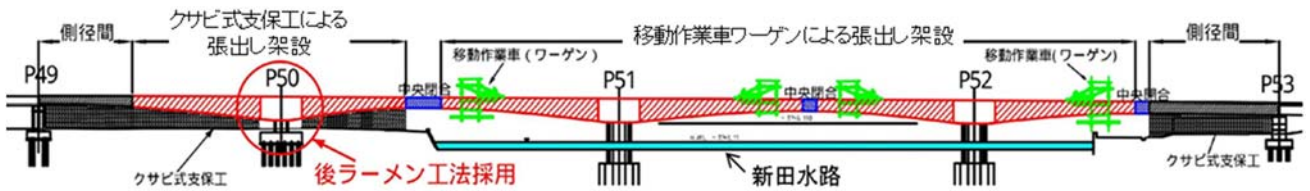


図-1 P49~P53区間の概要図

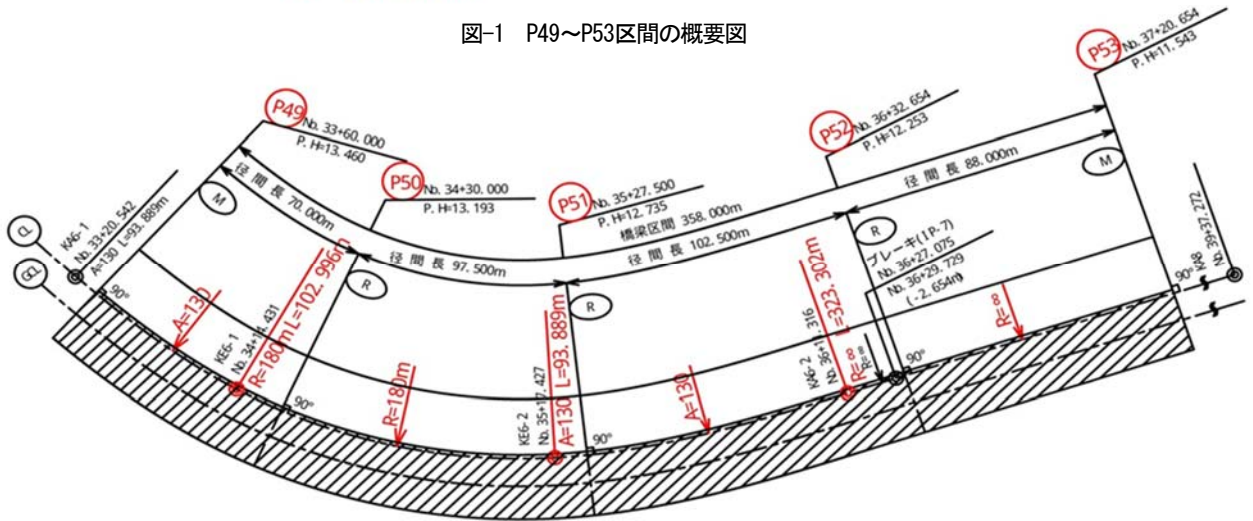


図-2 P49~P53区間の平面線形図

2. 後ラーメン工法を採用した背景

霞4号幹線は、鋼床版箱桁橋、少数鉄桁橋、PC中空床版橋、PCラーメン箱桁橋、PC箱桁橋の5種類の橋梁形式で構成されている。本区間（図-1）は、橋長358mのPC4径間連続ラーメン箱桁橋が採用されており、霞4号幹線では唯一のラーメン構造である。P50においては国内で3例目となる後ラーメン工法が採用されているが、曲率半径の小さい線形（図-2）での後ラーメン工法は国内で初めての施工であった。以下に、本区間においてラーメン構造を採用した経緯を示す。

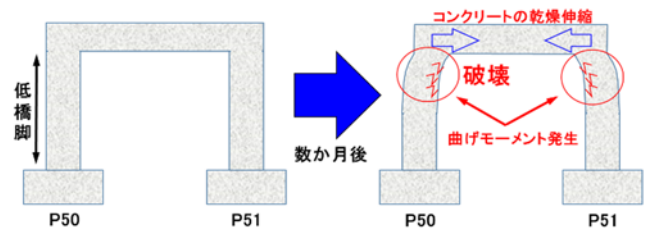
(1) 予備設計における橋梁形式の比較検討

予備設計では、本区間において制約となる新田水路、上空の高圧電線や軟弱地盤などの現場条件を整理し、適用支間長から抽出される形式案「道路設計要領（国交省中部地整）」¹⁾から、最適な径間長と橋梁形式について選定を行った。選定の結果、4径間連続鋼床版箱桁橋とPC4径間連続箱桁橋の橋梁形式について比較検討を行い、経済性（IC：イニシャルコスト、LCC：ライフサイクルコスト）、施工性、水路の影響等においてPC4径間連続箱桁橋が有利となった。

(2) 詳細設計における橋梁の検討

予備設計において課題となった支承構造について検討した。本工程の基礎地盤は軟弱地盤であり、大規模地震時の動的解析を行ったところ、ゴム支承が1m以上変形する結果となり、支承構造が成立しないと判断された。

【後ラーメン化を採用しない場合】



【後ラーメン化を採用した場合】

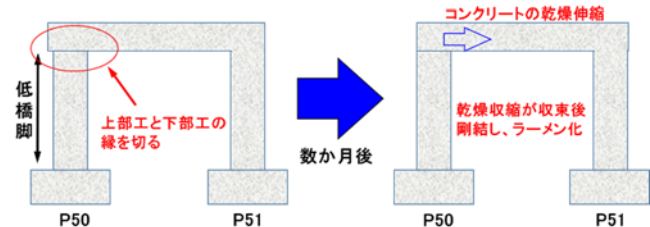


図-3 後ラーメン工法概念図

このため、支承構造を無くしたラーメン構造の成立可能性について検討した。ラーメン構造は支承構造が無いため、海上部における基礎などの縮小化により、コスト面で優れていることが確認された。しかし、現場の上空には高圧電線が横断しているため、橋脚高さを低くする必要があった。橋脚高さが低い連続ラーメンの場合、上部工の水平変位により大きな応力が発生するため、ラーメン構造として成立しにくい条件となっている。通常、ラーメン構造とする場合、固定支間長に対して1/8程度の橋脚高さが必要とされるが、本区間では1/18から1/63程度の橋脚高さであった。その解決策として後ラーメン工法（図-3）を実施することで、PC4径間連続ラーメン箱桁橋が成立すると判断された。

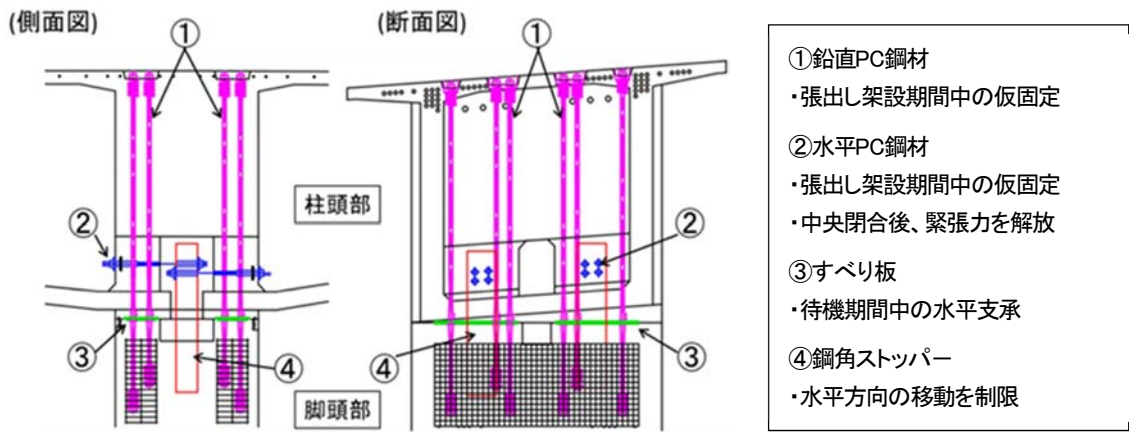


図-4 P50の構造図



写真-3 上部工と下部工をずらした施工

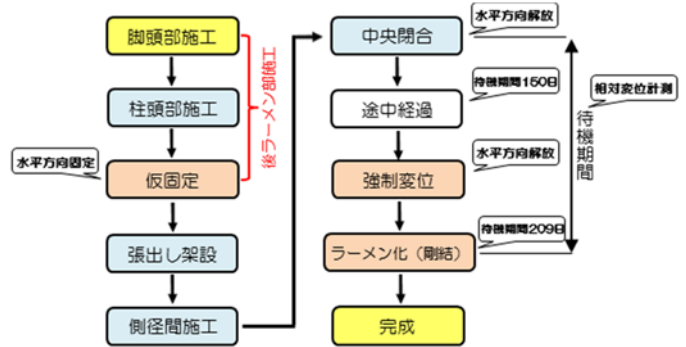


図-5 施工フロー

3. 後ラーメン工法の概要

PCラーメン橋の場合、乾燥収縮、クリープとプレストレスによる桁の弾性変形により桁が縮む現象が起こる。橋脚が低く拘束力が大きい場合、通常の施工では橋脚に大きな曲げモーメントが生じるため、ラーメン構造として成り立たなくなる。後ラーメン工法を採用したP50の橋脚高さは最も低く、大きな曲げモーメントが発生することが想定された。プレストレスを導入し橋梁が一体化したあと、桁の収縮によりひびわれが発生することが懸念される。そのため、下部工と上部工の間にすべり板を設置し、縁を切った状態にしておき、桁の収縮を考慮し、あらかじめP49側にずらして施工を行う(写真-3)。後ラーメン化待機期間中にP51側に収縮が進み、ある程度進行した後に、P50の下部工と上部工を剛結させることでラーメン構造が成立する。

4. 後ラーメン工法の施工

(1) 後ラーメン部の構造

後ラーメン工法を採用したP50の構造図を図-4に示す。P50の脚頭部および柱頭部に後ラーメン工法に必要な部材の設置と組立を行うが、張出し仮設中から中央閉合ま

での期間は、水平変位が発生しないように鉛直PC鋼材と水平PC鋼材の一次緊張で仮固定する。この期間中に水平変位が発生した場合、施工上の安全が損なわれるからである。

(2) 本区間の施工方法

本区間の施工する基本的な流れを図-5に示す。各橋脚より張出し架設による施工を行う。P50はくさび式支保工、P51とP52はワーゲンによる張出し架設を行い、各径間で中央閉合させる。その後、P50において水平拘束を解放し、計測管理により水平変位を測定する。

(3) 水平変位量の算出

水平変位量の算出は、上部工下端と下部工上端の2重節点を設けたモデルを作成し、各施工ブロックの弾性係数、クリープ係数および乾燥収縮度、各PC鋼材の緊張時期の違いによるリラクセーション進行度を考慮した。

その結果、水平変位量は34.4mmとなり、待機期間は150日必要となることがわかった。中央閉合による上部工一体化後、平成29年3月7日から同年8月8日の150日間で、34.4mm変位が進行していれば、上部工と下部工を剛結するとし、この計算結果を踏まえ、P50の上部工をP49側に34.4mmずらして施工を行った(写真-3)。



写真-4 自動追尾TS



写真-5(1) プリズム



写真-5(2) 上部工上端のプリズム

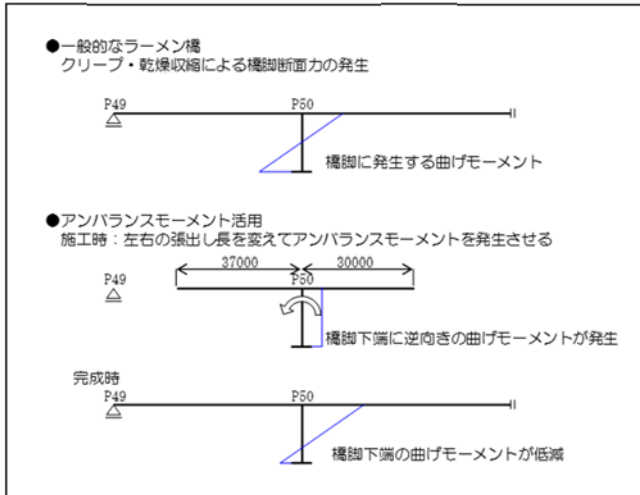


図-6 P50Iに作用するアンバランスモーメント

5. 待機期間中における計測管理

(1) 測定方法

待機期間中は、適切な剛結時期の把握に努めるため、計測管理を行う。

水平変位の測定は、自動追尾トータルステーション（写真-4）によって行った。計測間隔は1時間に1回、1日24回の計測を行った。計測用のターゲットとなるプリズム（写真-5）をP50橋脚の上部工に2つ、下部工に1つ設置した。上部工（下端）と下部工（上端）の水平変位量から相対変位量を算出し管理した。

(2) 計測結果

計測開始から約120日目まで相対変位量に動きが見られず、その変位量は0.2～0.3mmという結果だった。設計段階において、変位量が設計値の34.4mmを満たない場合は、待機期間を延長して、所定の変位量が確保できるまで存置させる必要があったため、待機期間を150日間から200日間（+50日間）にすることとしていた。なお、計測期間中に別工事において実施している壁高欄の施工があることから、209日目の10月2日まで延長することとした。

(3) 躯体の温度変化を考慮した水平変位量の見直し

当初の水平変位量34.4mmは躯体温度20℃を一定として計算を行っているため、躯体の温度変化による橋の伸縮について検討を行った。実際に水平拘束を解放したときの躯体温度は7.3℃だった。P50において、水平拘束がない場合、コンクリートの線膨張係数で温度変化あたりの変位量を算出したところ、1℃あたり約1.5mmの変位が発生する。温度変化を考慮した水平変位量を解析により算出したところ17.3mmとなった。よって、待機期間209日間で17.3mm変位すれば上部工と下部工の剛結ができるとした。

(4) 桁が変位しなかった原因と対策

計測から約120日が経過しても変位がみられなかったため、大きな原因として考えられる以下2点について、それぞれ検討・対策を講じた。

a) 強制変位

鉛直PC鋼材の仮固定における緊張力が大きく、すべり板部に働く静摩擦が大きくなり、桁の動きが妨げられている可能性があった。相対変位量の増加を促進するため、8月30日と9月12日に4台のジャッキによる強制変位を与えた。

8月30日は鉛直PC鋼材の緊張を緩めずに強制変位を行った。総荷重1,200KNから7,200KNまで15段階の载荷を3サイクル行ったが、変位は確認されなかった。

9月12日は鉛直PC鋼材の仮緊張力518N/mm²を緩めて強制変位を行った。仮緊張力は、張出し施工中に地震が発生しても桁が落下等の不具合を起こさない緊張力を構造計算により算出している。張出し施工による桁長がP49側はP51側に比べて7m長く、アンバランスモーメントが働いている（図-6）。P49側は曲げモーメントが作用しているため210N/mm²まで除荷することが可能と判断した。P51側も同様に210N/mm²とすると、P51側の桁が浮いてしまうことが考えられたため、400N/mm²まで除荷して強制変位を行った（図-7）。除荷は鉛直ケーブル全24本に行い、構造上緩めることのできる想定値および構造物の安全性を考慮した値としている。

その結果、5.5mmの相対変位量を確認し、強制変位を

表-1 計測管理の結果

日付	待機日数	内容	相対変位		躯体温度	備考
			計算値	実測値		
H28.8.31	-	P50柱頭部	0.0	0.0	-	
H29.2.17	-	P50-P51中央閉合	0.0	-0.2	10.7	
H29.2.23	-	P52-P53中央閉合	0.0	-0.2	8.9	
H29.3.2	-	P49側径間	0.0	0.0	6.7	
H29.3.3	-	P51-P52中央閉合	0.0	-0.1	7.3	
H29.3.7	0日	水平拘束解放	17.0	-0.2	7.3	
H29.3.13	6日	外ケーブル	21.9	-0.2	10.1	
H29.3.14	7日	構造系完成	29.7	-0.2	9.3	
H29.8.8	150日	-	34.4	-0.3	30.2	
H29.8.30	176日	強制変位(1回目)直前	-	0.3	32.2	対策a)を実施
		強制変位(1回目)直後	-	0.4		
H29.9.12	189日	強制変位(2回目)直前	-	1.1	26.6	
		強制変位(2回目)直後	-	6.6		
H29.9.20	197日	無収縮モルタル撤去	-	6.5	24.8	対策b)を実施
H29.9.28	205日	橋面工(P49-P51)	36.4	7.5	24.4	
H29.10.2	209日	後ラーメン工完了時	36.4	16.0	20.9	
-	-	クリープ終了時	36.4	-	-	

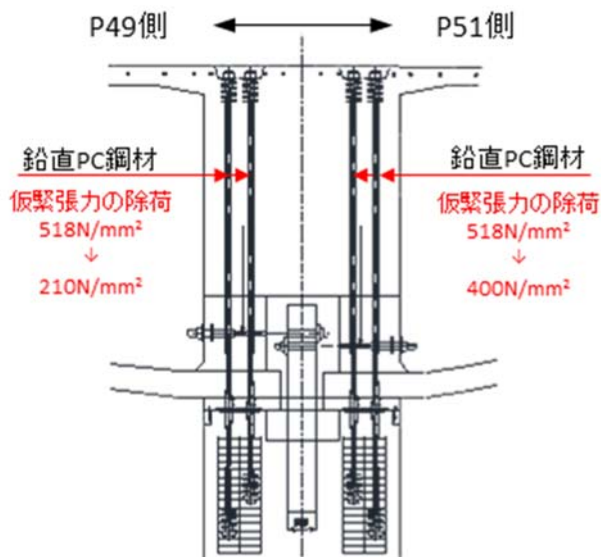


図-7 P50における鉛直PC鋼材の除荷

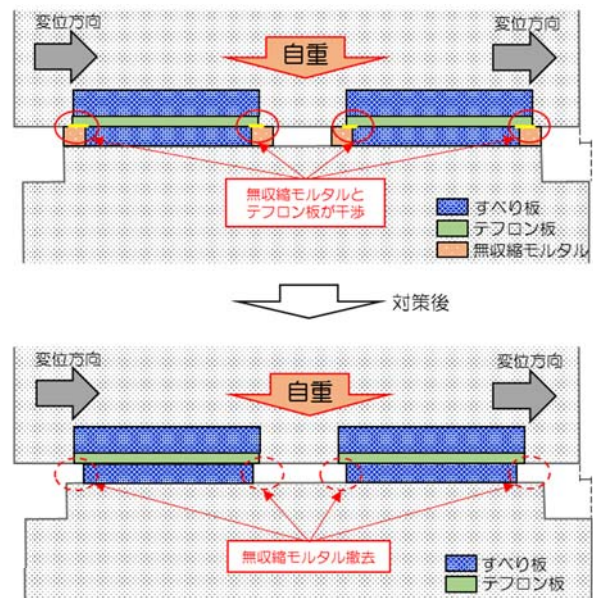


図-8 無収縮モルタルの撤去

終了した。強制変位後は全24本の緊張力を518N/mm²に戻した。

b) すべり板周囲のモルタル部の撤去

すべり板周囲に打設した無収縮モルタルは柱頭部の自重による影響ですべり板に干渉し、拘束力が働いたことで、すべり板を阻害していた可能性があった。このため、9月20日にすべり板周囲の無収縮モルタルの撤去を実施した(図-8)。

以上の対策の結果、緩やかではあるが相対変位が増加し、10月2日には、計算値17.3mmに対して実測値は

16mmとなり誤差は7.5%程度となった(表-1)。材料、施工時期、天候、気温等の現場条件を考慮し誤差10%以内であれば概ね計画通りの変位量が得られたと判断し、上部工と下部工を剛結した後ラーメン工を完了した。

5. 後ラーメン工法の留意点

今後、後ラーメン工法を施工する場合における留意点を以下に示す。

- ・水平変位量の算出は、温度の影響を考慮し、補正した

変位量で管理する。

- すべり板周囲のモルタルは、柱頭部の自重の影響もあり、水平変位を拘束する現象が見られた。下すべり板を厚くし、モルタルの量を少なくする等の対策を行った構造とし、確実に縁を切る。
- やむなく強制変位を与える場合は、部材・材料同士の拘束がないか確認し、必要に応じて障害を取り除いてから変位を与える。

6. おわりに

後ラーメン工法は事例の少ない工法であったため、課題に直面することが何度もあったが、発注者・受注者・設計会社で三者会議を複数回実施し、設計の照査、施工方法の見直し、待機期間などについて協議・検討を重ねることで無事施工を完了することができた。施工方法や水平変位量の算出について、改善すべき点もあるが、今後後ラーメン工法が採用された場合、本工事の施工例が

参考になれば幸いである。

霞4号幹線の整備効果として、四日市港における物流機能の効率化、周辺道路の負荷軽減やリダンダンシー（代替機能）の確保がある。平成30年4月の供用開始よりすでに四日市港の利用者から整備による効果を感じているとの声が挙がっている。また、霞4号幹線は地域の要望を受けて、津波襲来時の緊急避難場所として利用できるようになっている。今後も地域住民や四日市港の利用者の期待に応えるべく、四日市港のインフラ整備を通じて貢献していきたい。

謝辞：本論文の作成にあたり、施工業者の若築建設株式会社ならびに各種助言を頂きました関係者の皆様に心から感謝の意を表し本報告を終わります。

参考文献

- 1) 国土交通省中部地方整備局：道路設計要領（第5章 橋梁），pp6, 2014