

(6) 首都高速湾岸線外ケーブルPC橋に関する実験及び実橋における計測結果

首都高速道路公団	正会員	○ 伊東 昇
株式会社 ビー・エス	正会員	市川 徹
株式会社 ビー・エス	正会員	後藤 精三
オリエンタル建設(株)	正会員	石川 善信

1. まえがき

首都高速湾岸線のうち、羽田新空港の空港中央から横浜ベイブリッジにいたる区間については、平成6年内の供用開始をめざして、現在急ピッチで工事が進められている。このうち、図1に示す横浜市鶴見区扇島内にある中央径間71m、橋長165mの3径間連続PC箱桁は、外ケーブル併用方式で設計・施工された。外ケーブル方式は、自重や現場作業の軽減、将来の維持管理面などの利点のあることは知られているが、新設橋梁から使用された例は我が国ではまだ数橋であり、従来は主として既設橋梁の補修、補強に採用されていた手法である。しかしながら、近年の労務事情等から、部材のプレキャスト化への動向とあいまって外ケーブルへの関心が次第に高まっている。

本橋の外ケーブル配置を図2に示す。外ケーブル併用PC橋といっても従来の内ケーブルPC橋の設計と全く異なるというものではないが、定着部や偏向部の設計、外ケーブルの最小曲げ半径、終局耐力算定時の外ケーブルの評価などの外ケーブル特有の問題点については、適切な技術基準もなかったため、フランスのSETRAの基準など諸外国の基準を参考にしたり、FEM解析や、必要に応じ実験などを行って設計を進めた¹⁻³⁾。

ここでは、偏向部ケーブルの摩擦特性および定着部の破壊性状確認を目的として、施工に先立って行った実験結果と、完成後の実橋における計測結果の概要について報告する。

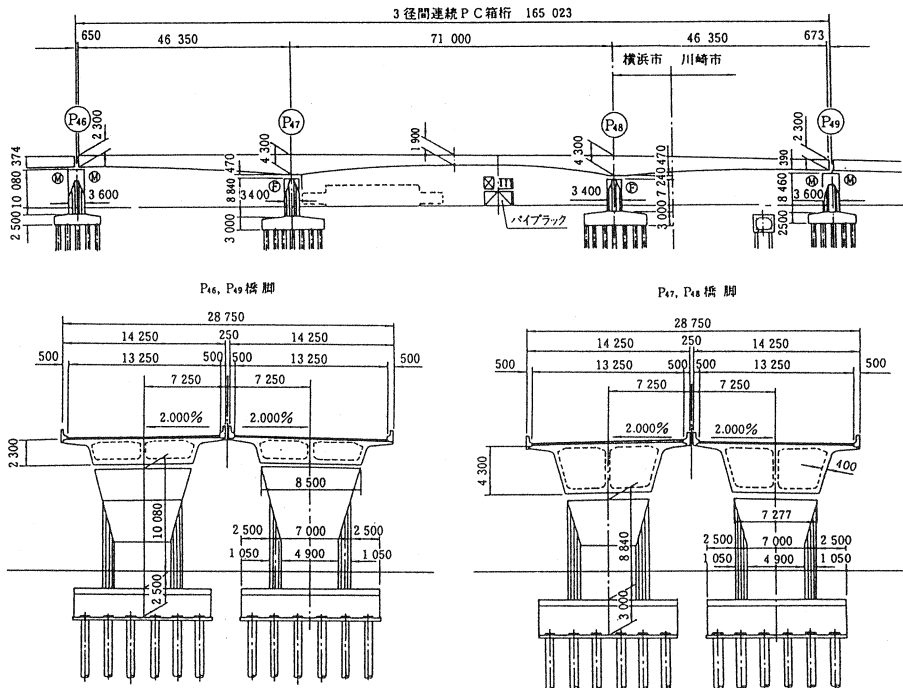


図1 全体一般図

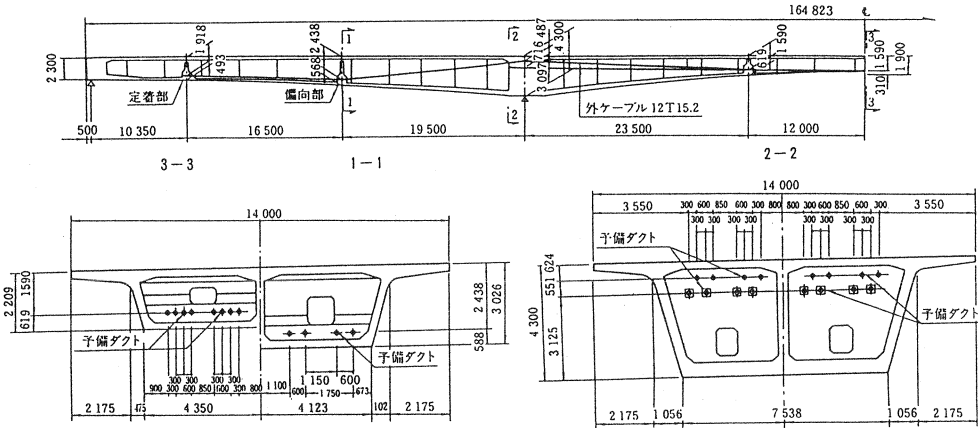


図2 外ケーブル配置図

2. 偏向部ケーブルの摩擦特性

外ケーブル構造では、ケーブル張力を有効に利用するため、また、主桁重量軽減のために偏向部の大きさをできるだけ小さくすることが望まれる。このため、本橋では偏向部におけるケーブルの曲げ半径を通常の内ケーブルで用いられているシース径の100倍にあたる8.0mに比べ、3.5mとかなり小さな値を採用した。このような状態でのケーブルの摩擦特性に関するデータは得られていないため、本橋で採用した裸PC鋼材とエポキシ鋼材の2種類のケーブルについて、ケーブル曲げ半径8.0mと3.5mの場合について摩擦特性試験を行い、安全性と設計の妥当性の確認を行った。試験は、後に述べる定着部破壊試験の供試体を一部拡幅して行い、張力をマンメータ、荷重計およびケーブルに貼ったひずみゲージによって測定し、回帰分析によって伸び量との関係を求め、摩擦係数を算出した。試験の様子を写真1に示す。

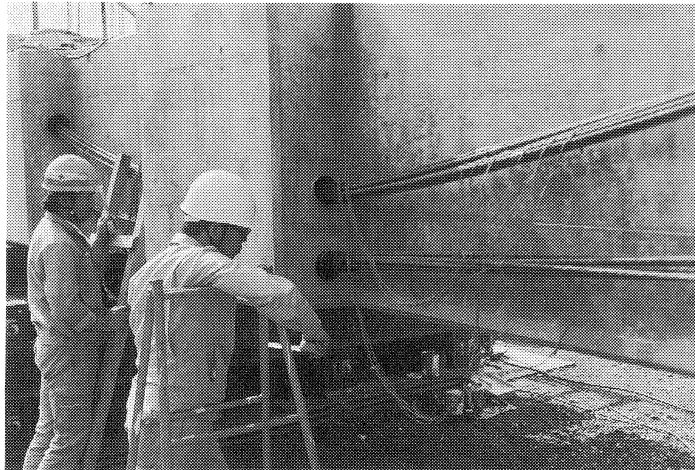


写真1 摩擦試験状況

試験の結果を μ に換算したものが図3である。マンメータ、荷重計、ひずみゲージのいずれの測定結果もエポキシ樹脂鋼材が裸PC鋼材を、また、半径8.0mの値が半径3.5mの値

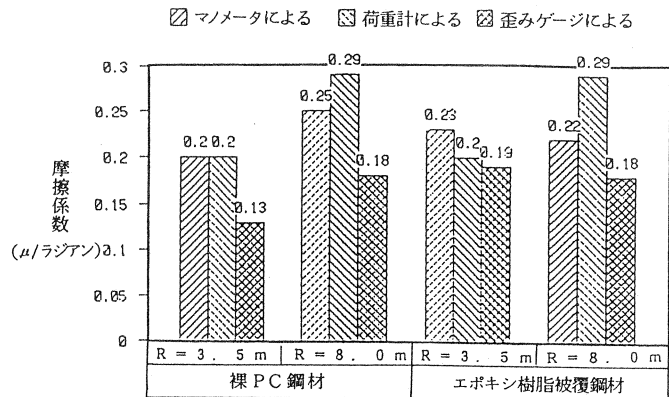


図3 摩擦試験結果 (μ/ラジアン)

をやや上回っていた。しかし、いずれの値も設計時点の仮定値0.3と概ね一致し、やや下回る安全側の結果となっていた。

3 定着部の破壊性状確認試験

本橋では、施工上の制約条件および将来の維持管理用のスペースを確保する目的で、外ケーブルの定着部を側径間横桁を拡幅した構造としている。外ケーブル定着部は橋梁全体の安全性に対して重要な役割を担っていることから、この部分の設計に際しては立体FEMを実施して、引張応力について補強鉄筋を配している。しかし、FEM解析が弾性体を仮定している事から、ひびわれ発生後の実構造物の挙動および実応力の確認が必要である。また、破壊のモードや耐力も明確でないことも考え、これらの確認とともに、定着部近傍、横桁、下床版の応力照査を目的として、載荷実験による最終確認を行うこととした。

供試体は実橋の1/2スケールとし、解析時の境界条件ができるだけ再現されるように、主桁半断面モデルとした。なお、ケーブルについては供試体の破壊耐力を考慮して、大容量のものを使用した。試験体は、単純支持され、自身にケーブル反力装置を備えたものとした。供試体の形状および寸法を図4に示す。

載荷は、設計荷重まで緊張した後、除荷を何度か繰り返し、最後に供試体が破壊にいたるまで、各ケーブルを最大荷重150tfを限度に緊張した。

載荷の各段階においてケーブル張力、定着部の変位、鉄筋およびコンクリートのひずみ、部材の変形およびひびわれの進展について計測、観察を行った。

結果の概要は表1に示すとおりである。設計荷重時には、小さなひび割れは1~2本発生するものの、除荷したときには十分回復すること、また鉄筋のひずみが小さいことから、ほとんど弾性的な挙動を示していると考えられた。

また、破壊は下床版から斜めに発達したひびわれが大きく広がり、付近の鉄筋のひずみが降伏ひずみを越え、横桁全体が定着背面側にY軸回りに回転変形し、同時に下床版を押し抜くように急激な破壊

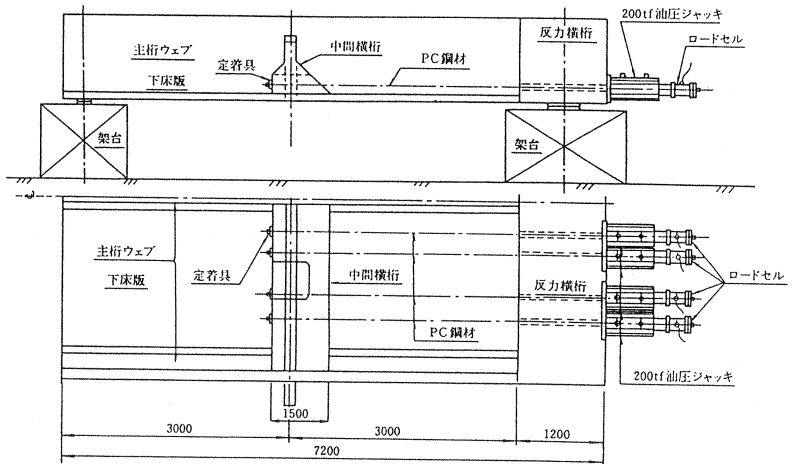


図4 載荷試験供試体

表1 載荷試験結果

	荷重	載荷荷重/ ケーブル4本 破断荷重	試験体の状態または 破壊モード
設計荷重相当時	60 tf/ケーブル 1本当り 3本合計 180 tf	0.57	横桁前面と定着側下床版上面に幅0.05~0.08mmのひびわれが数本発生。
ケーブル4本引張破断強度相当荷重時	79.1tf/ケーブル 1本当り 4本合計 316 tf	1.00	横桁前面と定着側下床版上面のひびわれが増えた。鉄筋の最大ひずみ1200μ。鉄筋はまだ降伏していない。
終局時	150 tf/ケーブル 1本当り 4本合計 600 tf	1.90	横桁の水平曲げ、下床版の曲げと軸力による引張圧縮応力定着部の押抜きせん断応力が複合した破壊。

を生じた。この様子を写真2に示す。横桁から発生したハの字形のひびわれと下床版の破壊の様子がわかる。これは、横桁とウエブの取り合いが先行して破壊したのち、荷重が下床版に集中して作用した結果、床版が曲げと押し抜きせん断が複合的に作用し、床版が急激に破壊にいたったものと考えられる。この破壊荷重は、実橋では将来追加のケーブルまで考慮したケーブル破断荷重を十分に上回っていることが確認されている。

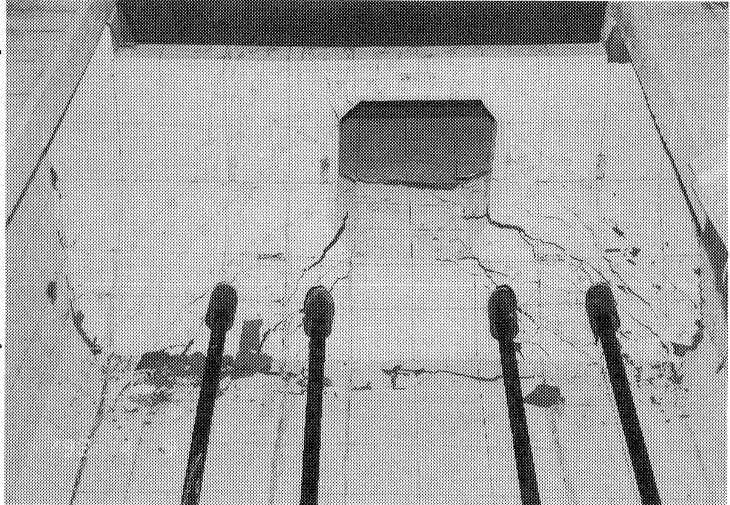


写真2 定着部破壊状況

この結果から、本定着部は十分な耐力を有していることが確認されているが、破壊のパターンを改善するために、最終的には図5に示すように、原案では分離していた上床版を一体化することとした。

4 実橋での測定

実橋の外ケーブル緊張作業時に、摩擦の測定と定着部および偏向部のひずみ測定を行った。また、工事のしゅん功直前に外ケーブルの張力を測定した。ここでは、これらの結果の概要について報告する。

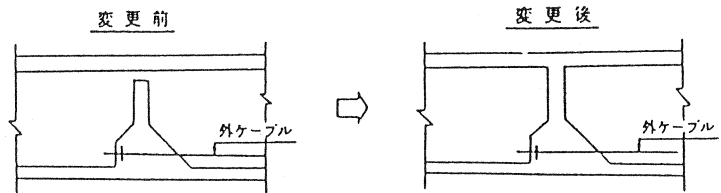


図5 定着部の形状変更

4. 1 摩擦係数の測定

摩擦係数の測定は、外ケーブル緊張管理の一環として行ったものであり、特別な計器を用いたものではない。鋼線の弾性係数 $E_p = 1.9 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ジャッキの損失2%と仮定し、張力管理図の傾きをよみとって求めた摩擦係数は、 μ 換算で裸PC鋼材では0.33、エポキシ樹脂被覆鋼材では0.29となり、図3の事前の実験結果と比較するとやや大きめの値ではあるが、設計値0.3とは概ね一致しており、その妥当性が確認された。

4. 2 ひずみ測定結果

ひずみ測定は、エポキシ樹脂被覆鋼線を用いた下り線側について、外ケーブル緊張時の定着部および偏向部の鉄筋とコンクリート表面のひずみを測定した。

測定点数が少ないことと応力レベルが低いため、誤差やばらつきの影響もあると考えられるが、それでも定着部についてはFEM解析や1/2模型による実験時の測定値とほぼ同様の傾向を示しており、図6に示すように、マンホール付近のスターラップで最大値が計測された。ただし、上床版に近い鉄筋では、図5に示した構造変更による効果も表れている。

偏向部についても全体的な傾向はFEM解析と一致していた。ケーブルの曲げによる鉛直方向引張力を全て鉄筋で受け持つ設計となっているが、測定されたひずみから予想される鉄筋の応力はその10~20%程度の範囲であり、実際は鉄筋とコンクリートの両者で鉛直分力を分担しているものと考えられる。なお、FEM解析でも偏向部の端部に鉛直応力が集中する傾向が現れていたが、鉄筋ひずみ測定も同様の結果を示しているのは興味深い。

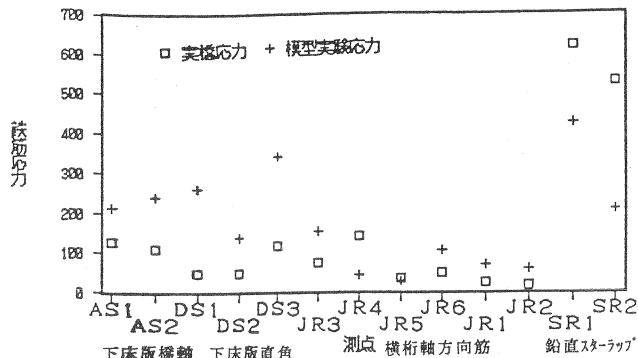


図6 1/2供試体と実橋の鉄筋ひずみ

4. 3 外ケーブルの張力測定

外ケーブルの緊張作業完了後、外ケーブルの張力測定を行った。測定は、外ケーブルを人力で加振し、その自由減衰振動を加速度計により計測し、固有振動数を求め、弦理論の式(1)から張力を算出する、振動法によって行った。

$$T = 4 L^2 f^2 w / g \quad (1)$$

ここで、T:張力(N)、L:外ケーブル固定間距離(m)、f:1次固有振動数(hz)、w:外ケーブル単位長当り質量(kg/m)、g:重力加速度(9.8m/sec²)である。なお、wには外ケーブル保護管やグラウトなどの質量も考慮し、PE管グラウト方式では12T15.2に対し20.85kg/m、エポキシ鋼線では13.36kg/mとした。結果は表2~3に示す通りであり、概ね設計値と一致していた。

このように、外ケーブルの張力は、簡易な計器、労力により測定できることから、供用開始後も同様の測定を行うことにより、外ケーブルの張力を将来にわたって定期的に点検することが可能であり、橋梁の健全度の指標の1つとして利用することができると考えている。今回の測定結果は、橋梁完成時における初期値として位置付けられ、将来の管理のためのデータの一部となるものである。

表2 外ケーブル張力測定結果 (PE管グラウトタイプ)

測点NO.		L1-1	L1-2	L1-3	L1-4	L1-5
1回目	Hz	10.156	8.789	7.227	6.641	7.227
2回目	"	"	"	"	"	"
測定張力	t f	205.0	198.8	202.1	198.5	201.7
鋼材応力度	kgf/cm ²	123.2	119.4	121.4	119.3	121.2
設計値	"	115.4	121.1	119.3	117.5	117.7
率	%	107	99	102	101	103

測点NO.		L2-1	L2-2	L2-3	L2-4	L2-5
1回目	Hz	10.059	8.789	7.227	6.641	7.227
2回目	"	"	"	"	"	"
測定張力	t f	201.0	198.8	202.1	198.5	201.7
鋼材応力度	kgf/cm ²	120.8	119.4	121.4	119.3	121.2
設計値	"	115.4	121.1	119.3	117.5	117.7
率	%	105	99	102	101	103

表3 外ケーブル張力測定結果(エポキシ樹脂被覆鋼線)

測点NO.		R1-1	R1-2	R1-3	R1-4	R1-5
1回目	H z	12.305	10.547	8.594	7.91	8.594
2回目	"	"	"	"	"	"
測定張力	t f	200.0	190.3	190.0	187.3	189.6
鋼材応力度	kgf/cm ²	120.2	114.3	114.2	112.5	113.9
設計値	"	115.4	121.1	119.3	117.5	117.7
率	%	104	94	96	96	97

測点NO.		R2-1	R2-2	R2-3	R2-4	R2-5
1回目	H z	12.305	10.742	8.789	8.203	8.789
2回目	"	"	"	"	"	8.984
測定張力	t f	200.1	197.4	198.7	201.4	198.3
鋼材応力度	kgf/cm ²	120.2	118.6	119.4	121.0	119.1
設計値	"	115.4	121.1	119.3	117.5	117.7
率	%	104	98	100	103	101

5 まとめ

現場での施工は、別に報告しているとおり⁴⁾、平成6年6月に無事完了しており、現在、舗装などの橋面上の工事を施工しているところである。橋体完成後の様子を写真4に示す。

本橋の設計、施工に際してはさまざまな角度から検討し、実験などによる検証も行いながら進めてきたものであり、その成果については本件を含め順次報告してきた。この結果が今後、外ケーブル橋の設計、施工計画をする上で参考となれば幸いである。

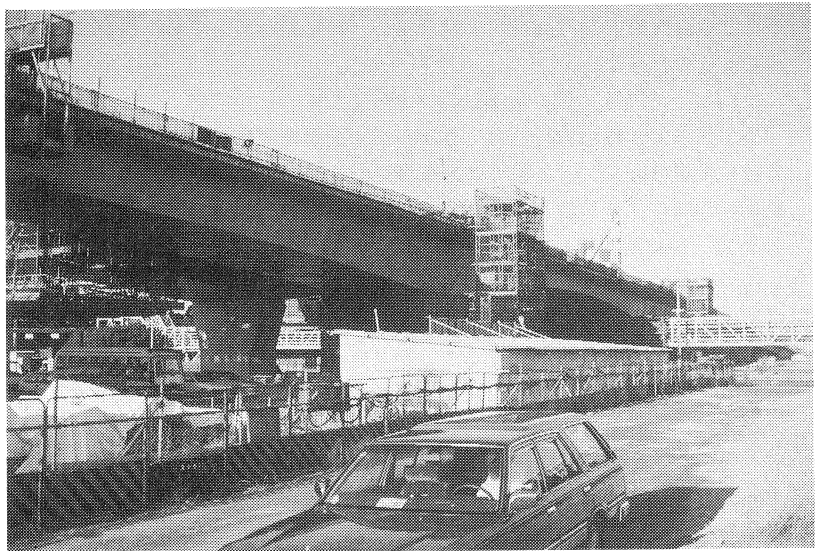


写真3 現場の施工状況

* 参考文献

- 1) 伊東 昇：「外ケーブルを併用した3径間連続PC橋に関する検討」、PC技術協会第3回シンポジウム論文集(1992), pp.43~46
- 2) 一樹久允、伊東 昇、佐藤幸一、後藤精三：「外ケーブル方式PC構造物の現況(実施例)、1首都高速道路湾岸線における外ケーブル方式PC橋の設計・試験」、プレストレストコンクリート技術協会 第22回PC技術講習会テキスト(1994)、pp.77~90、
- 3) 伊東 昇：「首都高速湾岸線における外ケーブルPC橋に関する実験概要」、第20回日本道路会議一般部門論文集(1993)、pp.994~995
- 4) 佐藤幸一、伊東 昇、市川 徹、星野進一：「首都高速湾岸線における外ケーブル併用方式PC橋の設計および施工」、PC技術協会第4回シンポジウム論文集(1994)