

(158) 全外ケーブル方式PRC橋の設計と施工 — 太田跨線橋 —

日本道路公団 四国支社 和田 信良
 同 上 増島 隆夫
 住友建設(株) 四国支店 石原 俊一
 同 上 PC設計部 正会員 ○山本 浩嗣

1. はじめに

太田跨線橋は、四国横断自動車道の高松市内に位置し、橋長151.0mの全外ケーブル方式PRC3径間連続ラーメン箱桁橋である。全外ケーブル方式PC橋は国内ではすでに数橋の実績があるが、全外ケーブル方式PRC橋は国内初の構造形式である。

PRC構造はPC構造に比べて、PC鋼材減少による経済性・施工性の向上が期待され、今後JHでは標準となる構造であると考えられている。一方、外ケーブル構造も大容量ケーブルの使用や上部構造の軽量化により経済面において期待される構造である。本稿では外ケーブルPRC構造を採用した太田跨線橋の概要を述べると共に、本橋において検討した有効プレストレスの算出方法やひび割れ発生に伴うモーメント再分配等の従来のPC橋にはないPRC橋特有の挙動を中心に報告するものとする。

2. 工事概要

工事概要および橋梁諸元を以下に示す。

路線名: 四国横断自動車道

架橋位置: 香川県高松市

道路規格: 第1種3級A規格

構造形式: 全外ケーブル方式PRC

3径間連続ラーメン箱桁橋

橋長: 151.0m

支間長: 43.0+63.0+43.0m

幅員: 10.960+10.420m(上下線)

施工法: 固定支保工

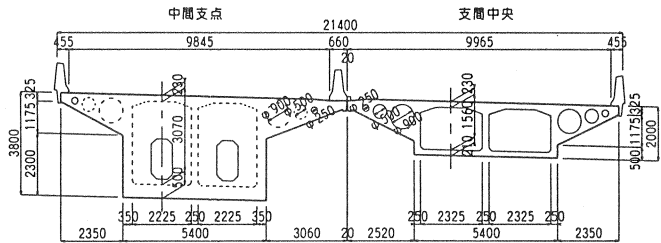


図-1 主桁断面図

2-1 主桁形状

主桁断面図を図-1に、構造一般図を図-2に示す。本橋は隣接する中空床版桁橋との連続性等の景観設計上の配慮から、外観は決定されており、2BOXの箱桁の外側に中空床版が張出す形式となっている。また、上下線は、端支点部および柱頭部で一体構造となっている。

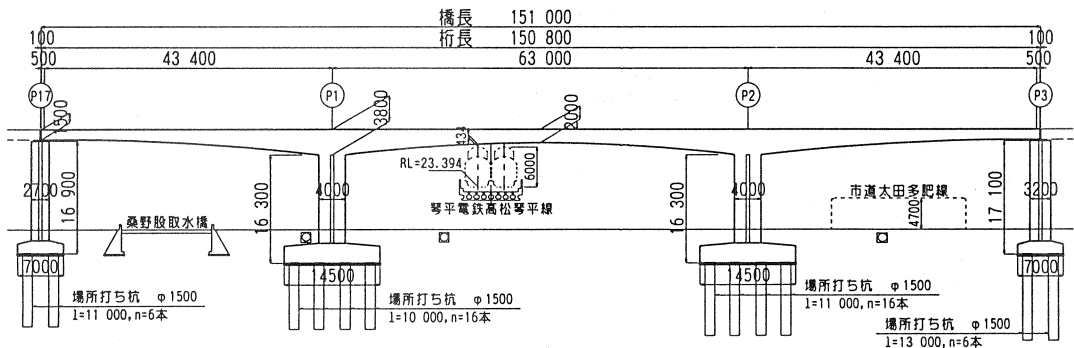


図-2 構造一般図

2-2 施工について

本橋は、琴平電鉄高松琴平線、市道太田多肥線と交差しているため、鋼製のパイプ支柱、トラス、H鋼により支保工を組み立てるパイプ支柱システムを採用している。(図-3、4)

外ケーブル配置図を図-5に、ディアボロ管設置状況を写真-1に示す。本橋は外ケーブルを全長に渡り8本配置し、中央径間に2本追加している。写真は側径間部の偏向部におけるディアボロ管で、1本は予備用である。外ケーブルは、エポキシ被覆PC鋼より線を1本ずつPE被覆したものを19本束ねて一括挿入した(図-6)。途中偏向部ではグラウトを行っていないが、定着部内では、PE被覆を除去しグラウトを行っている。

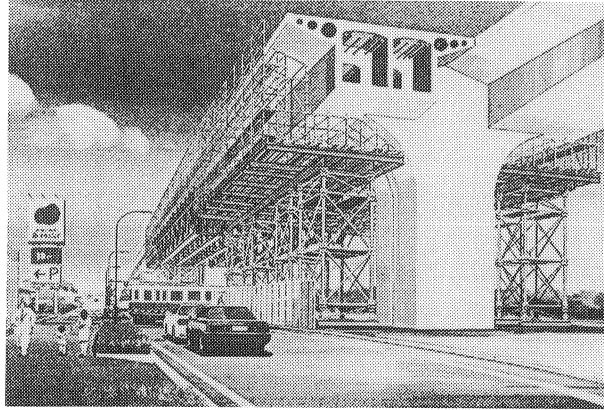


図-3 全体イメージ図

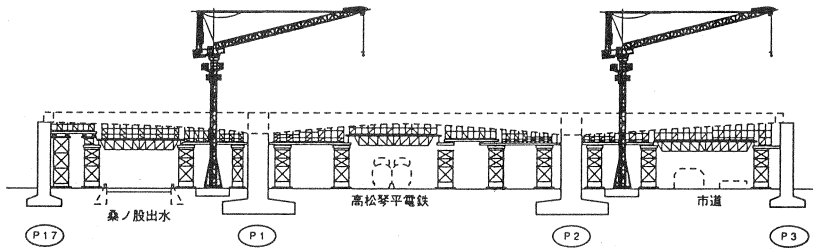


図-4 固定支保工

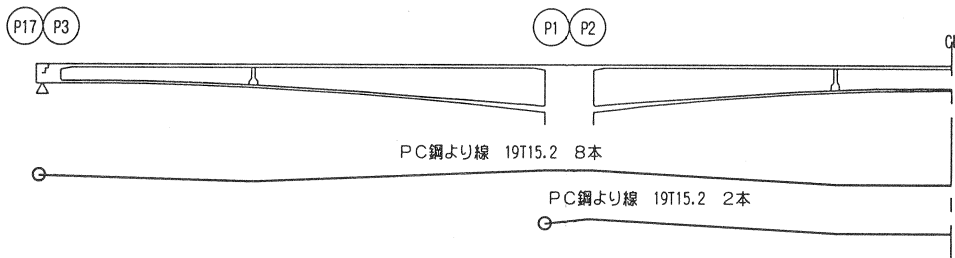


図-5 外ケーブル配置図

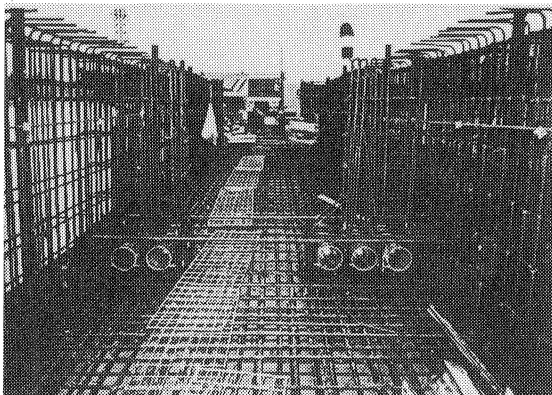


写真-1 ディアボロ管配置状況

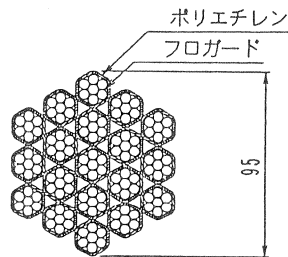


図-6 PC鋼より線

3. 有効プレストレスの算定

3-1 既往の算定手法

一般に、有効プレストレス力は、プレストレス直後のプレストレス力にコンクリートのクリープ・乾燥収縮およびPC鋼材のリラクセーションの影響を考慮して求めている。

外ケーブルの有効プレストレス力を論理的に求めるためには、コンクリート部材の変形に伴う緊張材図心位置でのひずみ変化を緊張材全長に渡って求め、この平均ひずみから緊張材の応力減少分を算定しなければならないが、この計算は非常に煩雑となる。そこで、「外ケーブルを用いたPC橋梁の設計マニュアル」¹⁾によれば、設計荷重作用時レベルでは部材は微小変形の範囲にあり、PC鋼材位置におけるひずみ変化の影響は小さいものとして、内ケーブル方式と同様な計算方法を認めている。

PRC構造の場合、鉄筋拘束の影響は無視できず、「コンクリート標準示方書設計編」²⁾では鉄筋およびPC鋼材のひずみ変化がそれぞれの位置のコンクリートのひずみ変化と等しいというひずみの適合条件を用いた連立方程式が示されている。また、「PRC道路橋設計マニュアル(案)」³⁾では、鉄筋とPC鋼材の平均図心位置がほぼ等しいという仮定のもとに、換算断面積を用いた次式に示す簡略式が示されている。

$$\Delta\sigma_{pe} = \frac{n \cdot \varphi \cdot \sigma_{cp} + E_p \cdot \varepsilon_{cs}}{1 + \alpha(1 + \varphi/2)} \quad \text{ここで、} \quad \alpha = n \cdot A_{p+s} \cdot \left(\frac{1}{A} + \frac{e_{p+s}^2}{I} \right) \dots \text{式(1)}$$

このように、外ケーブル構造、PRC構造それぞれの場合の有効プレストレス力の算出手法は提案されているが、外ケーブルPRC構造の有効プレストレス力の算定式は提案されていないのが現状である。

3-2 解析モデル

本稿では外ケーブルPRC構造における有効プレストレス力を算出するために、図-7に示すように、外ケーブルおよび鉄筋を棒部材として取り入れた部材評価法を用いた。外ケーブルは定着部および偏向部をモデル化した剛部材によって、緊張力の伝

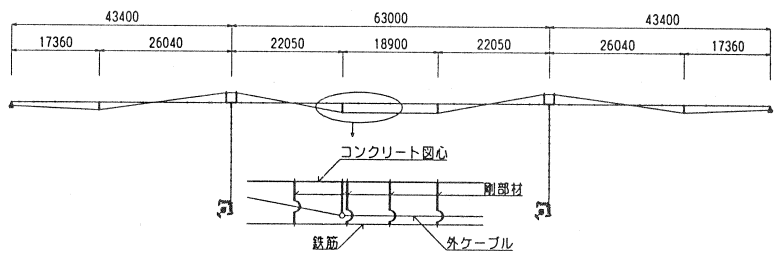


図-7 解析モデル図

達が行われる。外ケーブルは偏向部で滑りが生じないものと仮定して、剛部材と外ケーブル部材をピン結合としている。鉄筋は、コンクリートとの平面保持が成立するよう、コンクリート図心位置からの偏心量とした剛部材を密に配置したオフセット部材とした。鉄筋部材は、簡略式との整合性を取るため、PC鋼材と同じ位置の鉄筋、すなわち引張鉄筋のみをモデル化している。このモデルは、クリープおよび乾燥収縮によって生じる鉄筋拘束の影響を直接評価することを目的としている。外ケーブルに与えるプレストレス力は、あらかじめ外ケーブルの摩擦、定着具におけるセットの影響を考慮した計算値を用いた。本解析に用いた諸数値を表-1に示す。

表-1 諸数値

クリープ係数	$\phi = 2.6$
乾燥収縮度	$\varepsilon_{cs} = 150 \times 10^{-6}$
リラクセーション率	1.5%
摩擦係数	$\lambda = 0.00, \mu = 0.3$

3-3 解析結果

有効プレストレス力を算出するための算定法として、以下の4つの方法を比較した。

- case1. 部材評価法(鉄筋考慮)・外ケーブルおよび鉄筋を棒部材として評価
- case2. 部材評価法(鉄筋無視)・外ケーブルのみを棒部材として評価
- case3. 換算内力載荷法(鉄筋考慮)・PRC道路橋設計マニュアル(案)簡易式(1)、実設計では本手法を採用
- case4. 換算内力載荷法(鉄筋無視)・通常のPCと同じ手法、道示Ⅲ 2.1.5 式(解2.1.7)⁴⁾

図-8にPC鋼材引張応力度の分布図を示す。部材評価法では、定着部および偏向部以外は自由長であるので、その間の軸力変動はない。換算内力載荷法は、外ケーブルとコンクリートの平面保持を仮定しているため、断面ごとにPC鋼材応力が変化している。部材評価法による算定値は、換算内力載荷法による算定値を偏向部間でおおむね平均したのとなっていることが分かる。鉄筋拘束を考慮することで、有効緊張力は無視した場合に対して0.3~2.0kgf/mm²程度大きくなる。

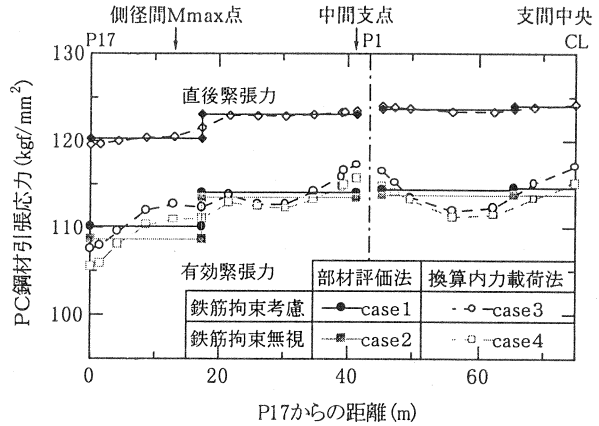


図-8 PC鋼材引張応力分布

表-2に主要断面における有効係数および有効プレストレス力(1次+2次)および鉄筋拘束による断面力の一覧を示す。主要断面においては、換算内力載荷法による有効係数は、全て部材評価法によるものより大きくなる結果となった。これは、換算内力載荷法では曲げ変形クリープによって、クリープロスが

表-2 有効係数および断面力

着目点	解析モデル	鉄筋拘束	有効係数	有効プレストレス力による		鉄筋拘束による	
				モーメント Mp(tf m)	軸力 Np(tf)	モーメント Ms(tf m)	軸力 Ns(tf)
側径間 Mmax点	部材評価法	考慮	0.916	-1181	2323	136	-146
		無視	0.904	-1107	2260	----	----
	換算内力載荷法	考慮	0.935	-1237	2375	172	-185
		無視	0.921	-1174	2339	----	----
中間支点	部材評価法	考慮	0.927	3467	2456	-171	-112
		無視	0.922	3563	2433	----	----
	換算内力載荷法	考慮	0.949	3756	2471	-400	-262
		無視	0.937	3844	2438	----	----
支間中央	部材評価法	考慮	0.924	-1000	2930	129	-106
		無視	0.918	-952	2858	----	----
	換算内力載荷法	考慮	0.942	-1022	3025	187	-162
		無視	0.927	-987	2962	----	----

キャンセルされるものが、部材評価法では付着のない外ケーブルによって偏向部間で平均化されるためのものと考えられる。また、鉄筋拘束の影響によりPC鋼材応力の減少量が小さくなり、鉄筋拘束の影響を無視した場合に比べると有効係数は大きくなるが、設計計算では、この時、鉄筋に生じる反力を断面力として考慮するものとしている。

4つの方法で得られた温度変化時合計の断面力、合成曲げ応力度、およびRC計算による鉄筋応力度およびひび割れ幅の一覧を表-3に示す。鉄筋拘束を考慮した場合、有効プレストレス力による断面力は大きくなるが、反面、鉄筋拘束による断面力でキャンセルしてしまい、結果的に合成曲げ応力度およびRC計算結果による鉄筋応力度およびひび割れ幅は大きくなる。RC計算によるひび割れ幅は、側径間Mmax点では、部材評価法による評価が換算断面載荷法による評価よりもわずかに安全側となるものの、その差は小さく、実設計で用いた換算内力載荷法(鉄筋拘束考慮)の妥当性が検証された。

表-3 作用断面力、合成曲げ応力度およびRC計算による鉄筋応力度およびひび割れ幅

着目点	解析モデル	鉄筋拘束	作用断面力 (温度変化時合計)		合成曲げ応力度 (kgf/cm ²)		RC計算による			
			モーメント M(tf m)	軸力 N(tf)	上縁	下縁	コンクリート σ _c	鉄筋 σ _s	ひび割れ幅 w(cm)	許容値 wa(cm)
側径間 Mmax点	部材評価法	考慮	1502	1695	71.8	47.0	95.4	1490	0.0174	0.0235
		無視	1441	1778	71.1	-42.8	92.0	1271	0.0148	
	換算内力載荷法	考慮	1483	1708	71.4	-45.9	94.3	1436	0.0167	
		無視	1374	1857	70.2	-38.4	88.2	1054	0.0123	
中間支点	部材評価法	考慮	-5637	1857	-27.2	79.2	98.4	1126	0.0145	0.0189
		無視	-5370	1946	-24.2	77.2	93.7	922	0.0119	
	換算内力載荷法	考慮	-5577	1723	-28.1	77.2	97.3	1214	0.0156	
		無視	-5089	1951	-21.9	74.2	88.7	786	0.0101	
支間中央	部材評価法	考慮	2208	2376	87.8	-55.6	113.3	1635	0.0190	0.0235
		無視	2127	2410	86.3	-51.8	109.7	1462	0.0170	
	換算内力載荷法	考慮	2245	2415	89.3	-56.5	115.2	1663	0.0194	
		無視	2093	2514	87.0	-48.9	108.5	1310	0.0153	

4. モーメント再分配

4-1 概要

PC桁では、ひび割れの発生等の剛性低下によって、プレストレス2次力を含む不静定反力の再分配が生じる。この現象は、この再分配によってモーメント分布がシフトすることから、一般にモーメントの再分配と呼ばれている。通常の設計計算においては、このモーメント再分配が常に安全側に作用することから、弾性理論に基づき断面力算出が行われることがほとんどであり、本橋も同様の考え方により設計計算を行っている。

ここでは、PRC橋の今後の設計資料とすべく、材料非線形性を考慮した断面力算出を実施し、設計荷重時および終局荷重における、モーメント再分配の挙動把握を試みた。

4-2 解析モデル

解析は、上部工をファイバーモデルとした非線形フレーム解析⁵⁾を用いた。コンクリートは引張応力を受け持たず、引張応力が発生すると同時に剛性低下が起きるものとしている。荷重の載荷は死荷重作用時を初期断面力とし

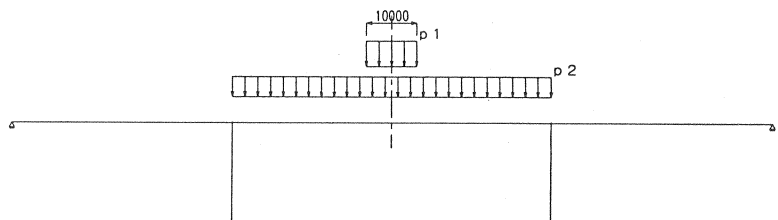


図-9 荷重載荷図

て、図-9に示すように温度変化時合計でひび割れ幅が最も大きくなる支間中央断面に着目した活荷重を載荷した。活荷重を漸次増加させ、1.0倍で設計荷重時、2.5倍で終局荷重時の荷重作用状態となる。解析はコンクリート部材が終局ひずみ(ε_{cu}=0.0035)に達するまで、実施している。

4-3 結果

図-10に曲げモーメント分布図を、図-11に活荷重倍率と支間中央および中間支点の曲げモーメントの関係を示す。図-11の縦軸原点は死荷重作用時である。モーメント再分配率は設計荷重時(D+L)では中央径間で-4%、中間支点側径間側で+1%、中間支点支間中央側で-2%、終局荷重時(D+2.5×L)では中央径間

で-9%、中間支点側径間側で+2%、中間支点支間中央側で+1%となることが分かった。これは、プレストレス2次力の消失が、ひび割れ発生と同時に起こるためのもと考えられる。この現象により支間中央の鉄筋応力度は設計計算に比べて約82%程度となる。線形解析による結果が安全側であることが確認できたが、今後、これらの再分配挙動を明確にすることにより、より合理的なPRC橋の設計の可能性が示唆される。

なお、コンクリートが終局ひずみに達したときの外ケーブルの応力増加は40kgf/mm²であった。実設計では、終局時のPC鋼材応力増加を10kgf/mm²と見込んで設計しており、その妥当性も検証された。

5. まとめ

国内初の全外ケーブル方式PRC橋の設計を行うにあたり、本構造特有の課題である、有効プレストレス力の算出およびモーメントの再分配について検討を行い、設計手法の妥当性を確認した。本稿の検討範囲内で得られた結論は以下の通りである。

1. 鉄筋拘束を考慮した場合、無視した場合と比較すると、有効プレストレス力は大きくなるが、鉄筋拘束の影響により合成曲げ応力度およびRC計算によるひび割れ幅は大きく(安全側)なる結果になった。
2. ひび割れ幅に着目すると、部材評価法および換算内力載荷法のモデルの違いによる差は小さく、実設計で用いた換算内力載荷法の妥当性が検証された。
3. 支間中央断面に着目したモーメント再分配を検討した結果、中央径間では安全側となり、中間支点では無視できる程度の変動であると考えられる。支間中央では、モーメント再分配を考慮することにより鉄筋応力度が設計計算で求めたものの82%程度となった。

参考文献

- 1) (財)高速道路技術センター：外ケーブルを用いたPC橋梁の設計マニュアル，平成8年8月
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年制定] 設計編，平成8年4月
- 3) (財)高速道路技術センター：PRC道路橋設計マニュアル(案)，平成6年3月
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編，平成8年12月
- 5) 玉置，新井，板井，山崎：非線形解析プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について，プレストレストコンクリート技術協会 第5回シンポジウム論文集，pp. 309～pp. 314，1995年10月

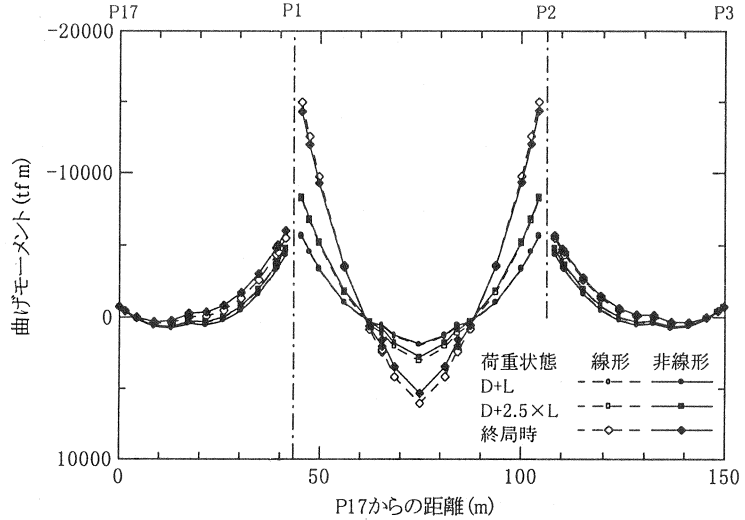


図-10 曲げモーメント分布図

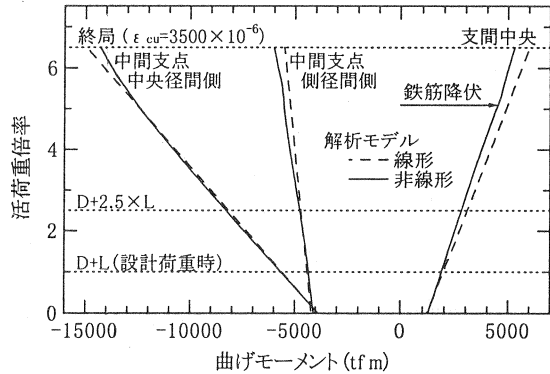


図-11 活荷重倍率-曲げモーメント図