

分割施工によるPC連続桁橋の設計と施工

Design and Construction of Continuous PC Bridge Erected Each Span One-by-One

森 谷 久 吉 *
Hisayoshi MORIYA
 森 本 洋 三 **
Youzo MORIMOTO

1. まえがき

橋梁の長大化、大型化への指向は、構造形式を単純梁形式から連続梁形式へと変化させてきた。コンクリート橋においても、不静定構造をなすプレストレストコンクリート橋(Prestressed concrete 橋、以下PC橋)が現れ、最近では、施工上の理由から連続梁を分割して施工することが考えられ、いろいろな方法が構じられている。

PC橋におけるコンクリート特有のクリープ、乾燥収縮、さらにはプレストレスによる不静定力の要素は、構造物の完成系の応力状態を大きく左右する。連続桁を一連ずつ分割施工して、構造系が順次変化する場合にも、施工段階毎の三つの要素は、逐一考慮されねばならず、この煩雑さから、計算の簡素化、自動化が望まれてきた。

本編では東関東自動車道の一環をなす、検見川高架橋の施工において試みられた連続桁の分割施工を例にとって、設計と施工の両面から、各々の留意点を報告する。

2. 設計について

2-1 構造形式の検討

不静定構造形式のPC橋は、その施工法によりかなり異なった応力状態を示すもので、PC連続桁もどのような施工法によって計画すれば最も有利であるかを、現場の状況、その他の条件によって検討するとともに、その施工法によって生ずる応力状態を充分に検討しておく必要がある。

PC連続桁橋の主な施工法を列記すると次のような施工法が考えられる。

- 1) 接地式支保工(一括施工)：最も一般的、力学的に最も明確。
- 2) 接地式支保工(分割施工)：PC構造の特性を利用したものであり、足場の転用ができる有利。設計に対しては、接合位置の選定と細部構造、プレストレスによる二次反力の変化およびスパン間の材令差によるクリープ、乾燥収縮の性状などを充分検討する必要がある。
- 3) 移動支保工：原則的には2)の場合と同じ。支保工

桁の変形が接地式支保工を用いた場合より大きくかつ複雑である。

- 4) 現場打カンチレバー工法：移動作業車を用いてコンクリートを2~5mのブロックに区分して、現場打ちしながら左右同時に張出していく。施工中に構造系が変化するのでクリープの不静定反力の変化を設計に考慮する必要がある。
 - 5) プレキャストブロックを用いたカンチレバー工法
接合面には接着材を用いることにより、工期の大幅な短縮・省力化が可能である。プレキャストブロックの製作誤差がそのまま、橋面の縦断方向・橋軸水平方向の誤差となって現れるため、基準ブロック設置には十分な配慮が必要である。
 - 6) 連続合成桁橋：単純梁として架設したプレキャスト桁に床版および支点上の横桁を合成させて連続桁橋とする方法。
 - 7) 押出し工法：橋台の後方の製作ヤードで現場打ちした長さ10~20mの橋体を橋台前面にセットされた引張装置により押出す工法。スパンが50mを越えると仮支柱を設けることが多い。製作ヤードにおける集中管理が可能で、施工速度も速く、外型枠も移動することなく転用できる。曲線桁の施工も可能である。架設中には、主桁全体に交番応力が作用するので架設鋼材は軸圧縮力として作用するよう配置する。
- 以上の中から本橋の基本設計には、「接地式支保工(一括施工)」が採用された。しかし、全体作業工程と支保工の転用等の検討によって「接地式支保工(分割施工)」の実施が有利であるとの判断が下され、連続桁を分割して施工することとした。分割位置(施工目地地点)については、曲げモーメントの比較的小さいスパンの1/付近とし設計する事とした。なお、断面は、図-1に示す2主箱桁橋である。

2-2 クリープ・乾燥収縮

分割施工におけるクリープ・乾燥収縮の基本的な考え方

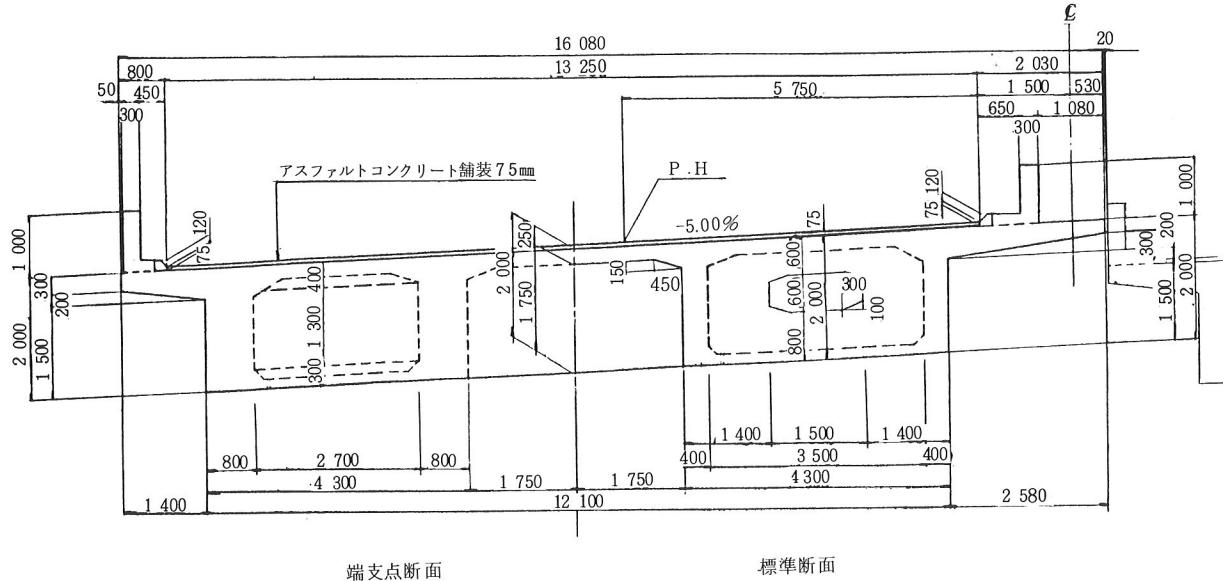


図-1 主桁断面形状

方は、次のとおりである。

クリープとは、一定の応力が作用した状態で時間の経過とともに歪が増加する現象をいう。クリープには、残

いため、遅れ弾性変形を分離して考える必要はない。

各施工段階ごとのクリープの発生状況を図-3に示す³⁾。

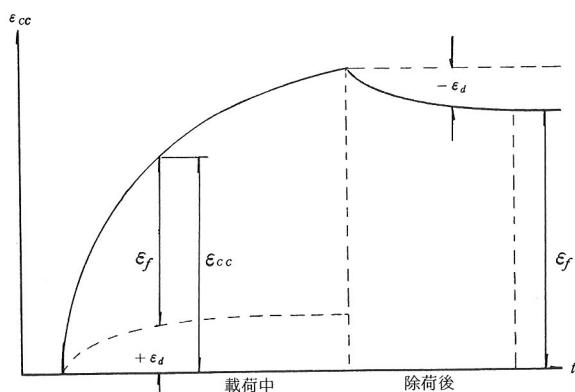


図-2 クリープ歪

留する変形（フロー歪）ばかりでなく、もとに戻る変形成分を含み、特に逆戻り変形は時間的な遅れをもって生ずるので「遅れ弾性変形」と呼ばれている。この遅れ弾性変形は、荷重を除去した後でだけ観測できるものであるが、載荷のときにも同じ大きさのものが生じている（図-2）。したがって、クリープは、

クリープ (ϵ_{cc}) = 遅れ弾性変形 (ϵ_d) + フロー歪 (ϵ_f) であらわされる。分割施工において、持続荷重がある限られた期間だけ作用し除荷されるような事態は起り得な

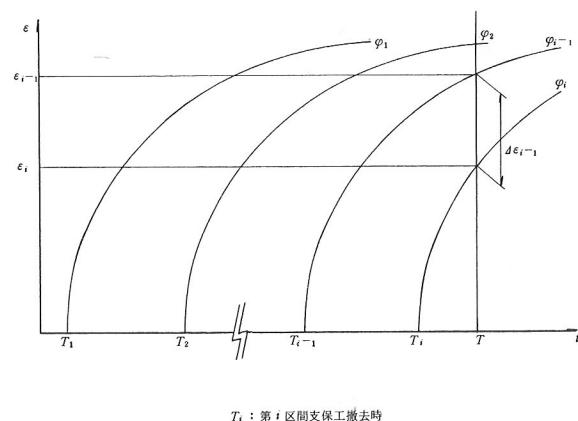


図-3 各施工区間コンクリートのクリープ曲線

各々のクリープ曲線 (φ_i) は、時間 T_i に施工の完了した区間 G_i のクリープの進行の度合を示すものである。この時、 T 時における各々の施工区間のクリープ歪 ϵ が、 ϵ 軸上の ϵ_i で示される。すなわち、 T 時における区間 (G_i) と区間 (G_{i-1}) の材令差によるクリープ進行の差は、図中の $\Delta\epsilon_{i-1}$ である。このクリープ進行の程度の差は、構造形に新しい変形、すなわち、区間 G_i を施工したことによって発生する断面力が存在することを示すものである。したがって、この時、区間 G_i に作用する荷重は、

- 1) 持続荷重・死荷重・プレストレッシング力・考慮するクリープ変化期間の初期までに生じた断面力
 - 2) クリープによって生ずる断面力
- の異なる二つのものに区別できる。特に荷重 2) は、同一施工目地に着目した場合でも、時間の経過とともに減少していく傾向を示すものである。

乾燥収縮歪とは、無応力状態のコンクリートが温度等の一定条件下で、時間の経過とともに起こす変形をいい、本質的な乾燥収縮は毛細管現象によって水が蒸発し、ゲル水が消費はじめてから発生する。したがって、設計計算に用いるコンクリートの乾燥収縮は、構造物周辺の湿度・部材断面の形状寸法の影響を考慮して定められる。分割施工の場合、合成構造物などと異なり、乾燥収縮による変形を考慮するのは橋軸方向のみに限られる。これは、桁の伸縮・プレストレスの導入時に大きく影響すると考えられるが、束縛を受けない変形からは新たな断面力は発生しないことがわかるので、施工区間ごとの材令差による乾燥収縮の影響は無視できる。

2-3 構造系による断面力の変化

施工段階ごとの断面力の算定を、構造系、クリープ・乾燥収縮に留意しておこない、接地式支保工(一括施工)の場合と比較検討してみる。

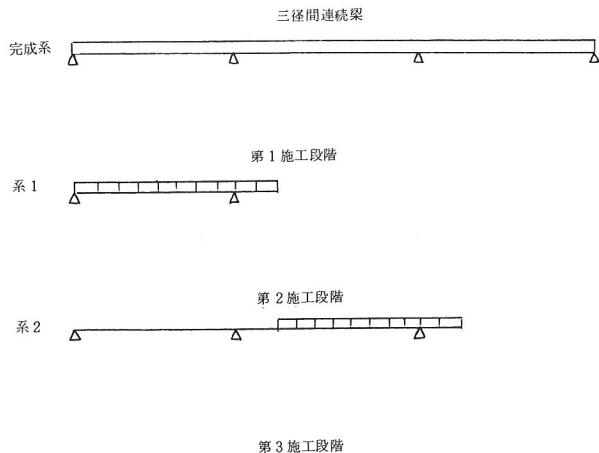


図-4 分割施工される桁の構造系

分割施工される連続梁を、荷重の載荷区間ごとに区分し、各々の構造系について求めた断面力を最後に重ね合せの原理にしたがって合成し、断面力の検討を行った。図-4 は、載荷方法の概要を示すが、構造形式は系1で

は張出しをもつ単純梁、系2では、張出し付近に荷重をもつ2径間連続一次不静定構造である。系3も同様に2次不静定構造をなすが、この時作用する断面力は、不静定次数にみあつた不静定力である。さらに、打ち継がれた両区間の材令差から生ずるクリープによる断面力は、各系の施工目地に近い支点上に発生する。図-5は、検

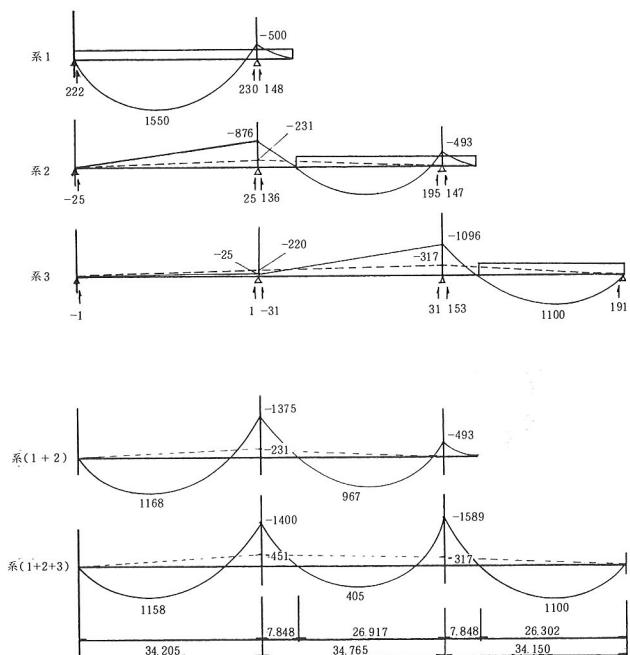
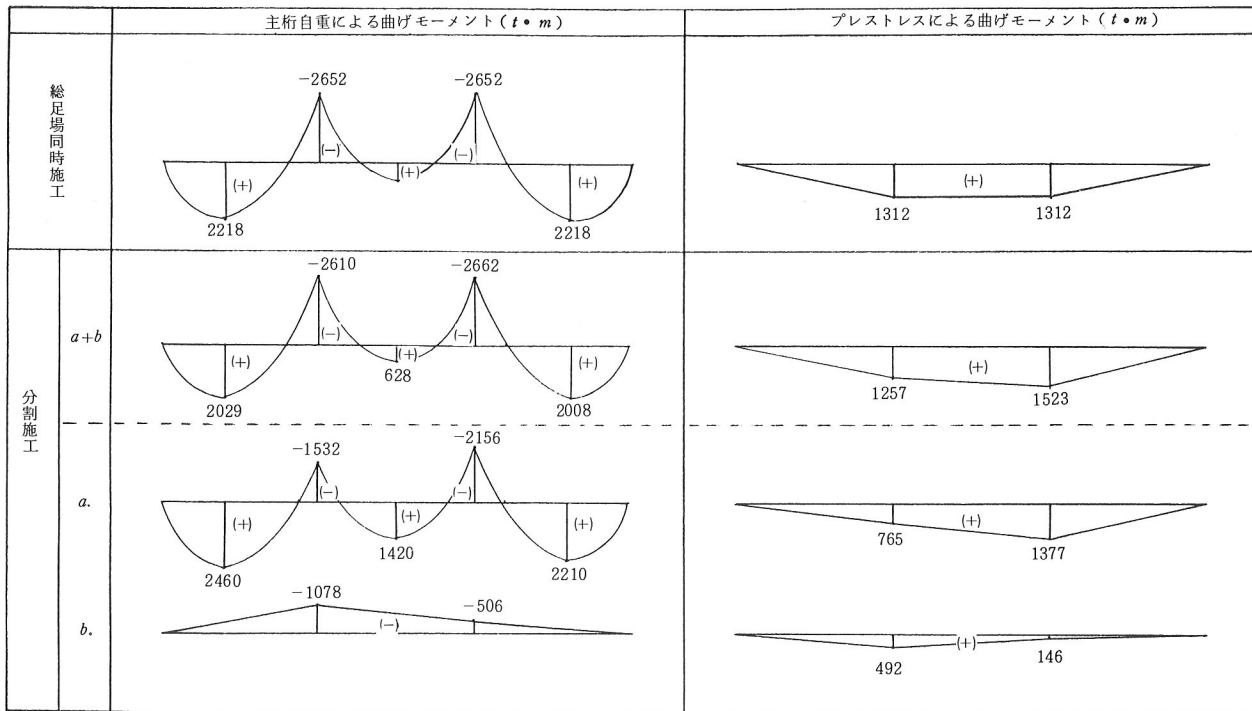


図-5 断面力の合成

見川橋(3@35 m)の実橋の計算結果であるが、系1、系2、系3には、個々の荷重のみが作用した場合の発生断面力を実線で示す。特に、破線はクリープによる発生断面力のみ分離して示したものである。系(1+2)、系(1+2+3)は、順次施工が進行していく時々の架設時の断面力を示すもので重ね合わせの原理にしたがって合成したものである。特に、系(1+2+3)では、クリープが終了したと考えられる時点でのクリープの影響を加味して断面力を求めたものである。図-5は、架設時の主桁自重のみをもとに算定したものであり、プレストレス導入については、さらに橋面死荷重・橋面活荷重等の完成時での荷重を考慮したものでなければならない。

次に、分割施工される連続梁において、施工が順次進行していく中での断面力の推移とその最終状態を、総足場同時施工による三径間連続梁の場合と比較してみる。図-6は、橋面荷重を加えた状態で双方を比較したものであるが、分割施工では同時施工にはみられないクリー



注) a. 構造系によって生ずる不静定力

b. クリープによる発生断面力

図-6 分割施工と同時施工の断面力の比較

の発生断面力が作用し、中間支点上の曲げモーメントに差異があらわされている。しかし、分割施工と同時施工の最終の曲げモーメントとしては、ほとんど差異はなく、二つの施工方法による基本構造、断面形状、使用材料の変更はないと考えられる。これは、クリープのもつ構造系全体を安定な方向へなじませるという物理的な現象に照らして考えてみれば、当然のことと考えられる。

図-6の比較では、ケーブル本数・配置を相方とも同じとして試算しており、ケーブル配置を変えることによって改善をはかることもできる。

2-4 プログラムの作成

分割施工の設計をおこなうにあたって、プログラムの開発が意図された理由は次のとおりである。

- 1) クリープによる発生断面力の算出にあたっては、不静定次数にみあった不静定力の算出が不可欠であり、多元連立一次方程式を解く回数が、構造系1つについて少なくとも2回必要であること。また、四径間以上の連続梁の解では、計算は飛躍的に増大すること。

2) 曲げモーメントの最大となる設計断面、また、モーメントが極小になる設計断面を正確に把握するために、適当な数の設計断面について断面力を求める必要があること。

3) 主桁自重による断面力とプレストレスによる断面力をそれぞれクリープを考慮して算定する必要がある。

4) 三径間連続梁と二径間連続梁が、それぞれ3橋ずつ設計の対象となっていること。

5) 同じタイプの計算が繰り返し必要なこと。設計断面を数多く求める必要が生じたこと。

分割施工プログラムのブロックチャートを図-7に示しておいた。また、プログラムの作成に当たっては、一般化を図るよう努めたが、実施設計の工期がせまっていたことや使用時の煩雑さを避けるため、次に示すような条件を設けることとした。

- 1) 十径間連続梁まで計算可能。
- 2) 一径間は20分割までとする。分割は等分割に限らないが、等分割でない場合は、分割長を各々入力する必要がある。

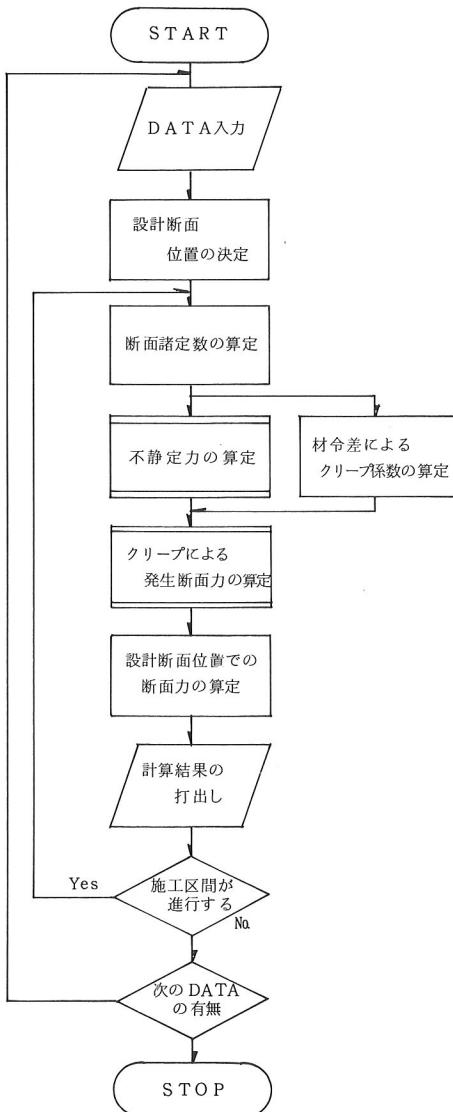


図-7 分割施工プログラムのフローチャート

- 3) 集中荷重、等分布荷重のみ入力可。台形荷重・三角荷重等は入力できない。
 - 4) クリープ関数は選択可能。ただし、現在は次の2つである。
 - a) $\varphi = A \log(t)$
 - b) 「PC道路橋示方書」(昭和53年版p. 85)

表-2-2-2の数値を直線補間
 - 5) 数ケースのデータをブロックとして一度に入力可。
 - 6) 出力は、曲げモーメント、剪断力、支点反力の三要素である。
- 設計断面の分割数は、演算時間とのかね合いで決まるが、厳密解との比較から1径間20分割程度で十分に実用

に供すると考えられる。ちなみに、五径間連続梁の例題を100等分割で実行した結果は、CPU = 11.9 secであった。

今後さらに改良・改善すべき点として、

- 1) 種々の条件下における計算精度の検討が必要。
- 2) 断面力の算定にとどまらない、設計断面における応力度算定への拡大。
- 3) 入力・出力の簡略化の整理。
- 4) クリープ関数は、新たな方法が発表されれば、これを組込む事が可能になっているので、実際に見合った形の式を作り、組み入れる事。

等があげられる。

本プログラムの実用例は、検見川高架橋が第一号となつたが、比較設計・概略設計等で分割施工を検討する際には、十分実用に供する手軽なプログラムであると考えている。

出力結果の一部を図-8に示す。

** DATA - 1-SEK - "A1-A1" **								
** KCUZ-U-EI 1 NC 4,C,2 **								
K	1	SPAN	μ	MA	M8	S5	S4	S8
1		-341.93	341.93	.00	.00	222.16	222.16	.00
2		341.93	341.93	.00	.00	174.25	174.25	.00
3		644.93	644.93	.00	.00	155.02	155.02	.00
4		911.74	910.74	.00	.00	132.52	132.52	.00
5		1114.74	1114.74	.00	.00	113.29	113.29	.00
6		1124.77	1124.77	.00	.00	90.26	90.26	.00
7		1471.96	1471.96	.00	.00	71.03	71.03	.00
8		1587.77	1587.77	.00	.00	47.92	47.92	.00
9		1651.87	1651.87	.00	.00	28.69	28.69	.00
10		1647.79	1647.79	.00	.00	9.46	9.46	.00
11		1644.09	1646.99	.00	.00	-9.77	-9.77	.00
12		1640.39	1646.95	.00	.00	-36.68	-36.68	.00
13		1555.12	1556.42	.00	.00	-55.91	-55.91	.00
14		1429.19	1429.19	.00	.00	-75.14	-75.14	.00
15		1271.86	1271.86	.00	.00	-94.17	-94.37	.00
16		1771.73	1771.73	.00	.00	-117.43	-117.43	.00
17		835.91	835.91	.00	.00	-136.66	-136.66	.00
18		557.24	557.24	.00	.00	-159.74	-159.74	.00
19		242.47	242.47	.00	.00	-178.97	-178.97	.00
20		-172.20	-129.20	.00	.00	-210.95	-210.95	.00
21		-536.76	-536.76	.00	.00	-229.29	-229.29	.00
	J	RR(J+1)	RA(J+1)	RB(J+1)	RR(J+2)	RA(J+2)	RB(J+2)	
1		222.16	222.16	.00	229.29	229.29	.00	
** KCUZ-U-EI 2 NC 4,C,2 **								
K	2	SPAN	μ	MA	M8	S5	S4	S8
1		-536.96	-536.96	.00	.00	146.53	146.53	.00
2		-337.91	-337.91	.00	.00	95.15	95.15	.00
3		-177.49	-177.49	.00	.00	76.32	76.32	.00
4		-72.70	-72.70	.00	.00	45.12	45.12	.00
5		-5.35	-5.35	.00	.00	25.59	25.59	.00
6		.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00

図-8 プログラム出力結果(例)

3. 施工について

3-1 施工順序と特色

本橋施工においては、打継目地が支点をはずれた位置にあるため、二径間分の支保工を使用する事とした。施工順序は、図-9に示すとおりであるが、同時施工と大きく異なる点は、一径間分の支保工を単位として、順次

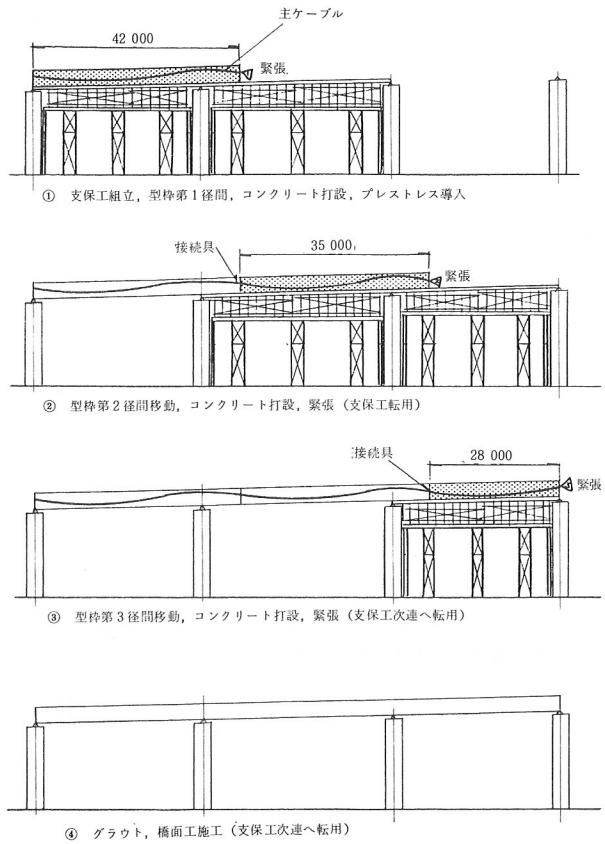


図-9 施工順序

前方へ移動する事によって、作業の流れを中断することなく工程を消化できることである。作業の流れを支保工組立、型枠、配筋、コンクリート打設、緊張、支保工解体、支保工移動と考えると、一括施工においては作業内容がある一時期に集中し、作業員の効率的な回転がはかれない。しかし、分割施工によると同一作業内容のくり返しであり、作業員の効率的な回転、早期に熟練を望めることになる。

本工事の特色は、H鋼支保工を用いたこと、外型枠を移動可能な鋼製型枠としたこと、下り線から上り線へ支保工の横取をおこなったこと、の3点である。写真-1・2・3は、その状況を示す。H鋼支保工の利点は、組み上げた支柱を一つのブロックとして運用しやすいこと、高さの調整は、H鋼材の継ぎ足しで容易に可能であること、横取りが可能などがあげられる。鋼製型枠は、レール上を台車で引出すことで脱型から次径間での型枠セットまでの期間を大幅に短縮できる。実際に、引出し開始の翌日には所定の位置にセットができた。支保工の横取りは、支保工の解体・組立の工程を短縮することが最大の利点で、スパン35mの横取りでは底板のダウンのみで、5つの支柱（H鋼支柱、四角支柱）を同時に引出した。写真-3は、チルホールを使用した引出し状況を示すものである。

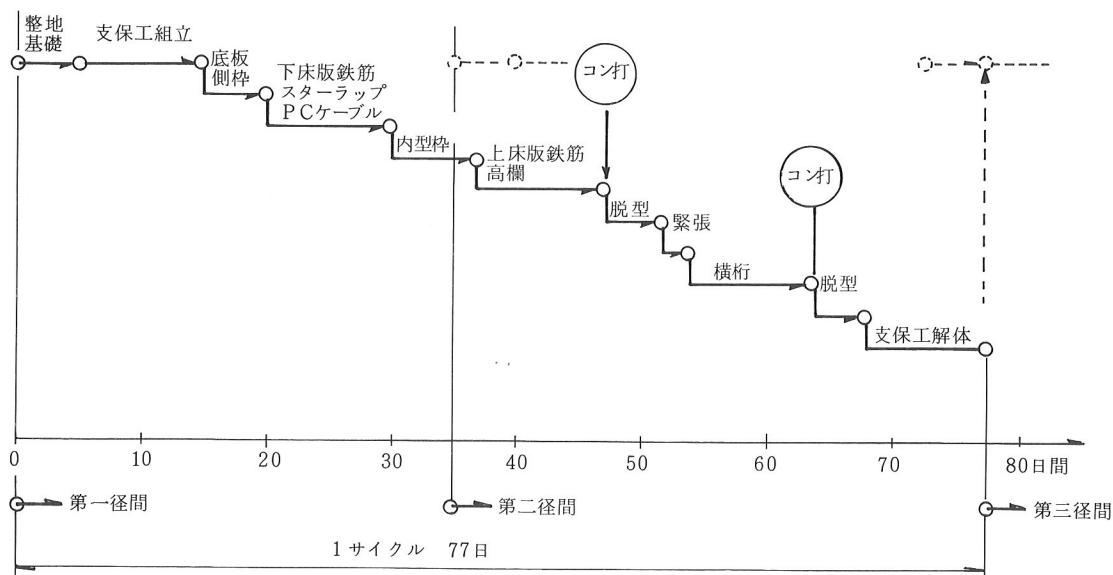


図-10 サイクル工程

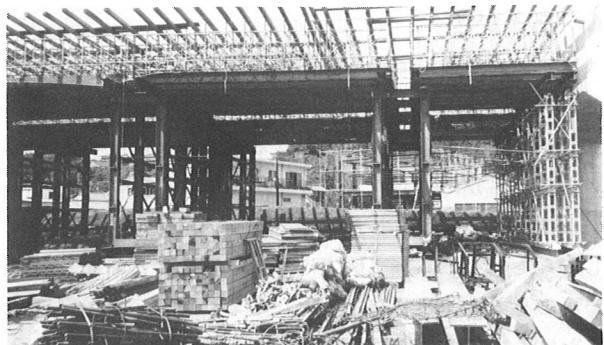


写真-1 H鋼支保工

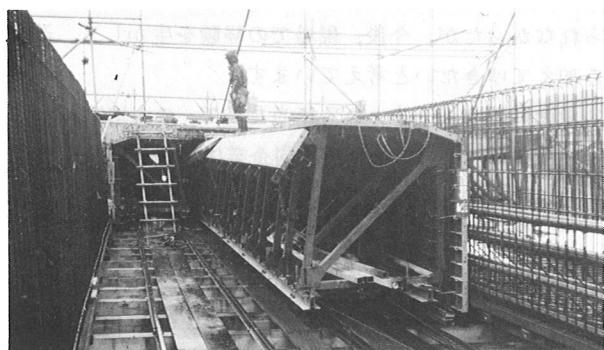


写真-2 型枠移動



写真-3 支保工横取状況

3-2 施工継目

分割施工における最大の問題点は、P C鋼線の接続法である。接続具は12T13フレシネーケーブルのカプラーモノグリップ型（F.K.K.）を採用した。⁵⁾ 最初の区分ケーブルの緊張作業は、雌コーン、雄コーン、定着板の三つのパーツを用いて通常の場合と同様に実施する。つづいて緊張の完了したケーブルを一本おきに支圧板より280mm, 470mmの長さで、デスクグラインダー型カットオフマシンで直角に切断する。継ぎ足し区分ケーブルをシースに配置した後、1T13モノグリップ型カプラーを接続具としてケーブルを一本毎に差し込み、ジョイントを完了する。接続作業の完了したストランドは、一本毎に緊張端より引張力を与え、カップリングの確認を行う。以上の手順の一部を写真-4に示す。新たに打継いだ径間のP C鋼線の本緊張は、接続部分がコンクリートに完全に埋込まれた後で実施されるために、接続不良なケーブルが一本でも発見されれば、必要緊張力が桁に導入できないことになりかねないので十分な施工管理を行った。

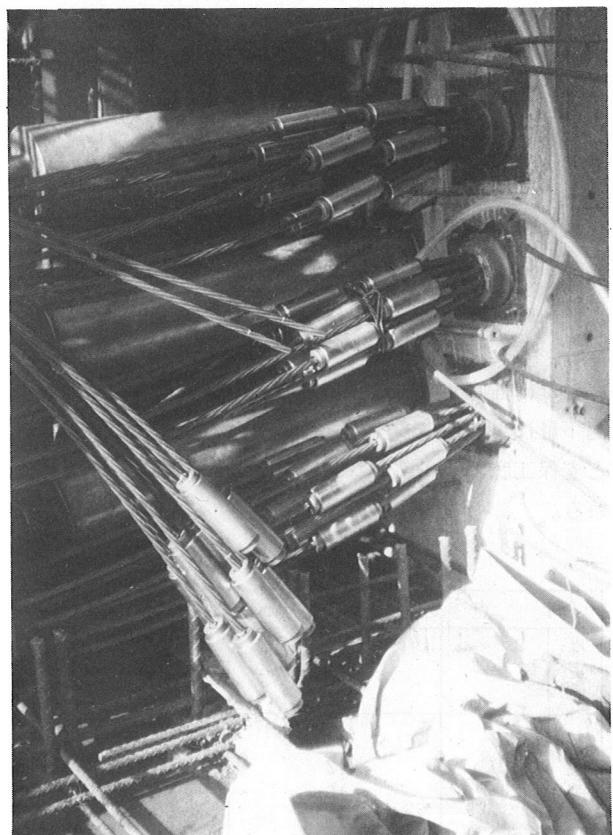


写真-4 カップリング状況

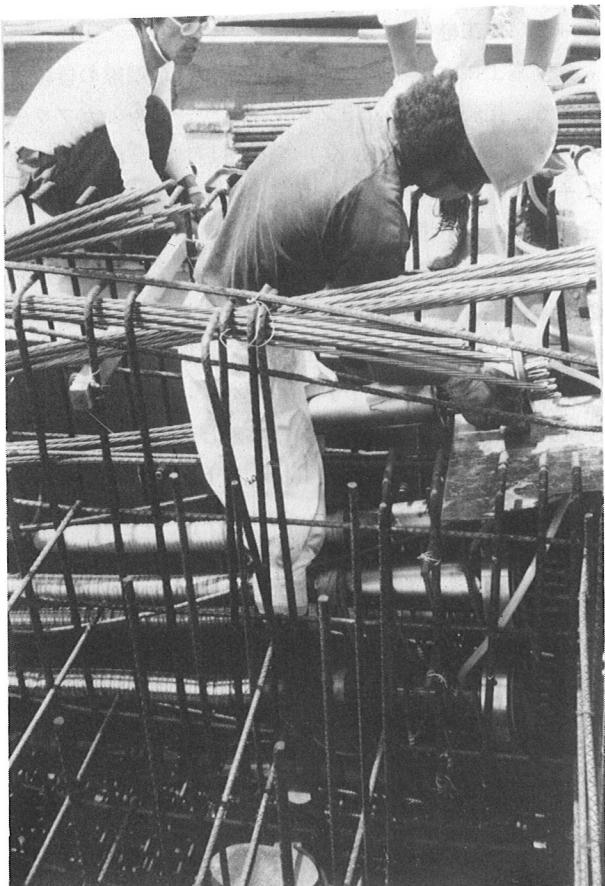


写真-5 デッドアンカー取付作業

3-3 上げ越し量

現場施工で特に留意される点は、地盤の沈下量と支保工のなじみ量、そして緊張によるキャンバー量の推定である。地盤の沈下量は、平板載荷試験より実荷重に対しでは1mm、支保工のなじみ量は施工予想値が12mmであった。⁶⁾ 表-1は、コンクリート打設直後の実測値を示すが、ほぼ推定した値と近いものが観測された。ただし、沈下量については多少大きな値を示したが、これは敷板と支保工底部の一部のなじみ量が加わったためと考えられる。

表-1 沈下量の測定値 (B 1-1)

測 点	底板の沈下量 (mm)	地盤の沈下量 (mm)
推 定 値	—	13
実 测 値	1	
2	13	5
9	12	5
12	16	6
19	18	5
22	14	9

4. あとがき

以上、分割施工によるPC橋の設計と施工について、現在施工中の橋梁を例にとって述べてきた。分割施工において、設計上新たに問題となるクリープの基本的な考え方を明らかにし、コンクリートの材令差によるクリープの進行度合を考慮した断面力を一括施工の場合と比較してみた結果、本施工例では工法変更による断面の形状変更の必要性は生じなかった。なお、本橋では分割施工における設計施工上の詳細、開発プログラムの詳細、その他プログラムを使っての考察等々について十分に述べられなかつたが、今後、現場での経験を生かして、改良を加えてゆきたいと考えています。

最後に、本稿をまとめるに当たって、日本道路公団の方々や川田・安部・検見川共同企業体の各位に深謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 土木学会編：土木工学ハンドブック，中巻，第21編 P 1287～P 1290，技報堂，S 50. 2
- 2) 百島祐信：コンクリートの乾燥収縮とクリープおよびPC鋼材のレラクセーション、プレストレストコンクリート標準示方書解説資料，P 49～P 56，S 54. 7
- 3) H.リュッショ，D.コンクヒルト著，百島祐信訳：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮，鹿島出版会，S 52. 4
- 4) 猪股俊司：分割施工された連続桁、コンクリートクリープによる曲げモーメント変化計算法
- 5) 極東鋼弦コンクリート振興株式会社：F KKフレネー工法施工基準，S 55. 5
- 6) 社団法人日本道路協会：プレストレストコンクリート道路橋施工便覧，P 233～P 236，S 48. 9