

講座

現場における設計・施工条件変更に伴う対応

〔その 2. PC 3 径間連続ラーメン橋〕

上平謙二*

1 まえがき

わが国の PC 長大橋梁建設においては、最近の傾向として、経済性、耐震性、走行性、維持管理面あるいは景観性等を考慮して、片持ち張出し工法による PC 長大連続ラーメン橋が採用される場合が多く、最大支間はすでに 140 m までに至っている。

今までの国内での PC 連続ラーメン橋の実績調査¹⁾によると、径間数の比率では 3 径間の橋梁が約半数を占めている。また、最大支間長の構成率では 60 m~100 m が約 60% となっており、最大橋脚高さは 30 m~40 m が多い。したがって、ここでは 図-1 に示す PC 3 径間連続ラーメン橋 (1 ボックス断面) に的を絞り、現場

において実際に起こり得る諸条件の変更を想定し、それらに対する対応策について述べることにする。

2 現場における条件変更とは

PC 連続ラーメン橋の施工は、施工のための実施設計および施工計画に従い行われるが、実際の施工では実施設計の設計条件および施工計画とは異なった条件のもとで施工される場合がある。その可能性を有する条件変更とは次のようなものが考えられる。

- (1) 荷重に関する事項
 - 1) 設計荷重 (活荷重) の変更
 - 2) 添架物等死荷重の変更
 - 3) 支間長が設計長と異なる場合のスパン長および

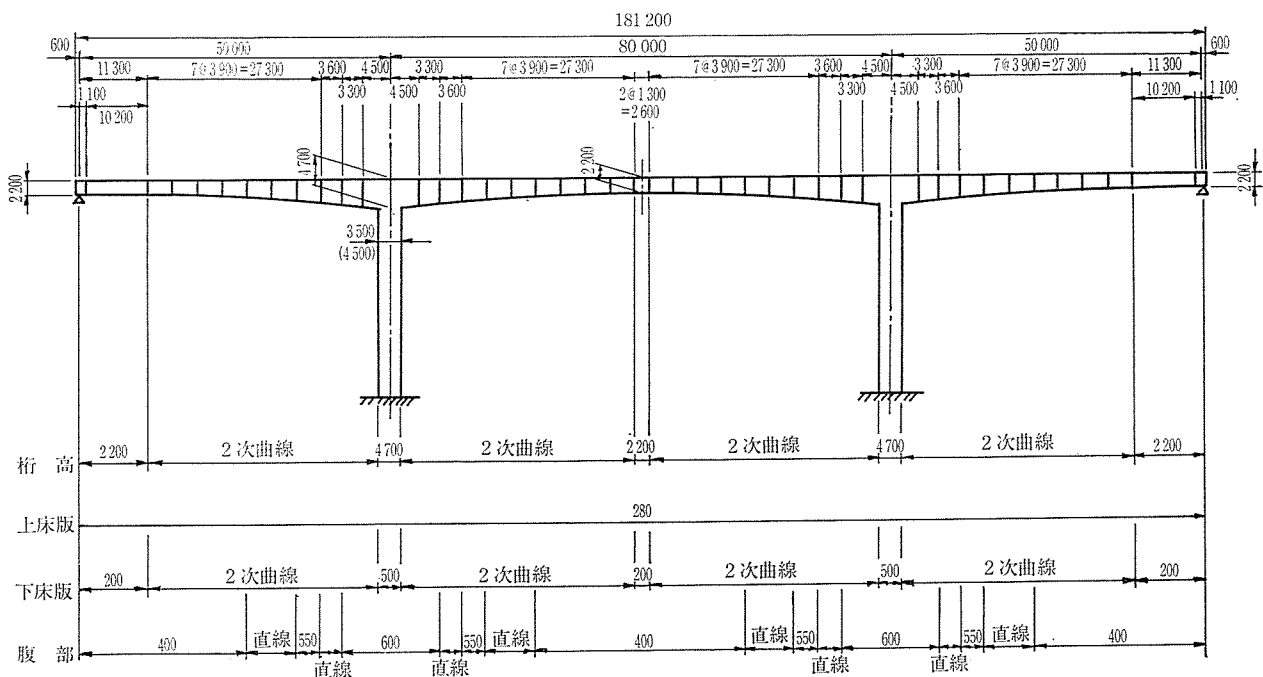


図-1 部材寸法変化図

* Kenji UEHIRA : ドーピー建設工業 (株)

荷重強度の変更

- (2) プレストレスに関する事項
 - 1) PC 鋼材の種類の変更
 - 2) 導入プレストレス力の変更
 - 3) PC 鋼材配置の変更
- (3) 架設に関する事項
 - 1) 架設荷重の変更
 - 2) 架設方法の変更
- (4) 施工工程に関する事項
 - 1) 施工工程（施工日数）の変更

以上のように、考えられる条件変更を列記したが、実施設計および施工計画作成後、実際の現場サイドではこれらの条件変更に対してすべて対応できるわけではなく、また、施工着手前には施工の際に特に必要となる PC 鋼材の緊張力の計算あるいはコンクリート部材の変形（上げ越し）に関する計算が必要となり、これらはまた、前述の種々の条件変更に関連するため、再計算の必要性も生ずることになる。また、PC 3 径間連続ラーメン橋の場合、高次（5 次）の不静定構造となるため、断面力あるいは変位（たわみ）の計算はすべてコンピューターに頼っており、そのため種々の条件変更に対して、現場サイドで簡単に対応（計算）できない場合が多いので、これらの場合には、再度設計サイドでチェックする必要性がでてくる。

3

現場における条件変更に伴う対応策

現場における条件変更に伴う対応策として、前述で列記した各事項の条件変更について、それらに対する対応策を述べることにするが、PC 連続ラーメン橋は高次の不静定構造となるため数値計算上の対応策は非常に面倒となるので、ここでは、対応策としての考え方を中心に述べることにする。

(1) 荷重に関する事項

1) 設計荷重（活荷重）の変更

実施設計完了後、現場における条件変更として、設計荷重（活荷重）が例えば TL-14 が TL-20 あるいは TL-20 が TT-43 と変更されることについては一般的に考えられないので、これに対する対応策については省略することとするが、橋面形状変更（歩道幅の増加）に伴い、群集荷重が増加する場合の可能性が考えられる。この場合の対応策については、群集荷重は各スパンごとの等分布荷重と考えられるため、死荷重と同様な取扱いが可能となり、次項で述べる“2) 添加物等死荷重の変更”に伴う対応策を参考にし、応力度チェックを行えばよからう。

2) 添加物等死荷重の変更

添加物等死荷重とは、一般に、舗装、歩道、地覆・高欄および橋梁に付加する諸設備としての水道、電気、電話等の添架物が考えられるが、ここでは、実施設計完了後、現場における条件変更として変更（荷重増加）の可能性の高い高欄荷重および添架物荷重について、主桁、横桁、床版、橋脚および反力の安全性に対する対応策を考える。なお、その他の死荷重に対する安全性の対応策については、高欄荷重および添架物荷重の場合と同様な方法をとればよい。

(a) 高欄荷重について

本検討において、対象としている構造物の規模から考えると、特に主桁、横桁、橋脚および反力に対する安全性の対応策に対し、高欄荷重は主桁自重に比べてその強度は非常に小さく、また、その高欄荷重の増加分（条件変更分）の強度はもっと小さくなるので、一般的に応力度に対する安全性のチェックは必要とはならないが、特に応力度のチェックを行う場合には次のようにすればよからう。

i) 主桁のチェック

㉔ 高欄荷重の増加分強度は、通常、等分布荷重 (w_k') で表現される。

㉕ 荷重強度として等分布荷重で表現される荷重強度、例えば、橋面荷重 (w_k) を参考にする。

㉖ ㉔と㉕より、応力度のチェックは、橋面荷重強度による断面力から計算される応力度に、単純に (w_k'/w_k) を乗ずればよい。

すなわち、

$$\sigma_u' = \left(\pm \frac{M_k}{W_o} + \frac{N_k}{A_c} \right) \times \left(\frac{w_k'}{w_k} \right)$$

となり、ここに、

σ_o' : 高欄荷重の増加荷重による桁上縁の応力度

σ_u' : 高欄荷重の増加荷重による桁下縁の応力度

M_k : 橋面荷重によって生ずる曲げモーメント

N_k : 橋面荷重によって生ずる軸力

W_o : 主桁断面の断面係数

A_c : 主桁のコンクリート断面積

ii) 横桁のチェック

検討する横桁としては、通常、端支点横桁と柱頭部の隔壁が考えられる。横桁の応力状態は、設計荷重作用時でフルプレストレスの状態となるように設計されるのが一般的であること、また、高欄荷重の増加荷重分による荷重強度は、主桁自重、その他橋面荷重および活荷重の荷重強度に比べて非常に小さいことを考えると、特に応力度のチェックの必要性はないと考えられるが、応力度のチェックの必要性

が生じた場合には次のようにすればよからう。

㊸ 端支点横桁の設計思想については特に定性的なものではなく、横桁の設計は通常梁理論を用いて行われ、例えば、主桁から横桁に伝達されるせん断力が横桁に横桁長さ当りに分散する方法によっているとすれば、i) で述べたように、設計荷重時の横桁の応力度に対し、その荷重の変更に伴う増加応力度は、例えば、橋面荷重による横桁応力度に荷重強度の比を乗ずれば得られることになる。

㊹ 柱頭部の隔壁の設計は通常、簡易手法として図-2 および 図-3 に示すように、平面 FEM 解析あるいはディープビームによる方法で行われている。

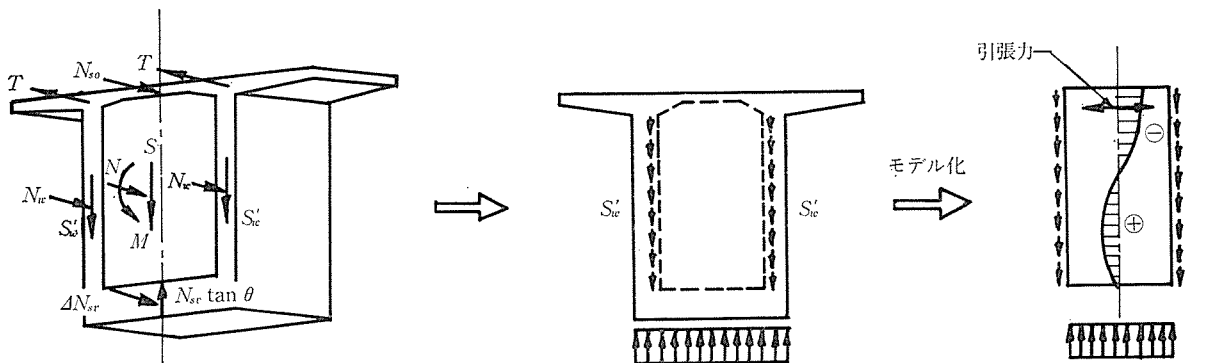
いずれの方法にしても、隔壁に作用させる力は、ボックスのウェブから隔壁に伝達されるせん断力で

あり、それに対して隔壁に作用する引張力の合力に対し安全な補強鋼材を算出するものであるから、高欄荷重の増加分荷重によって隔壁に作用する引張力の合力は、例えば、設計荷重時にウェブから隔壁に伝達されるせん断力 (S_w) と高欄荷重の増加分荷重によってウェブから隔壁に伝達されるせん断力 (S_w') (この計算は、i) で述べた計算手法と同様に行えばよい) の比を設計荷重時に隔壁に作用する引張力の合力に乗ずれば引張力の増分が得られ、それを設計荷重時に得られる引張力に加えて安全性のチェックをすればよい。

すなわち、

$$\Delta T = T_w \cdot \frac{S_w'}{S_w}$$

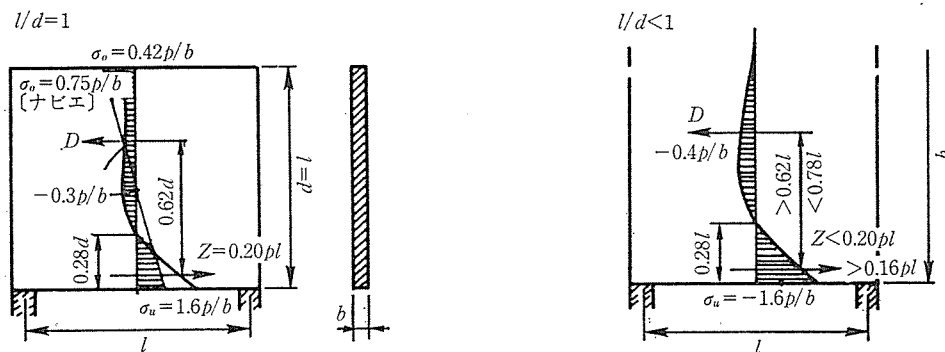
$$\therefore T = T_w + \Delta T$$



- N: 主桁断面に作用する全軸力
- M: 主桁断面に作用する全曲げモーメント
- S: 主桁断面に作用する全せん断力
- N_{so}: 上床版に作用する軸力
- N_{sr}: 底版に作用する軸力
- N_w: ウェブに作用する軸力
- S_w: ウェブに作用するせん断力
- T: PC鋼材に作用する引張力
- N_{sr} tan θ: 底版傾斜による逆せん断力
- θ: 底版の傾斜角
- S'_w: ウェブから隔壁に伝達されるせん断力
- ΔN_{sr}: 底版に作用する軸力差

柱頭部に作用する断面力

図-2 隔壁に生ずる引張力 (平面 FEM 解析)



等分布上載荷重を受ける種々の l/d および $c/l=0.1$ (c =支承幅) の単純ディープビーム、スパン中央における応力 σ_x およびそれによる合力の大きさと作用位置

図-3 ディープビームによる断面力の算定

ここに、

ΔT : 引張力の増分

T_w : 設計荷重時の引張合力

S_w : 設計荷重時にウェブから隔壁に伝達されるせん断力

S_w' : 高欄荷重の増加荷重によってウェブから隔壁に伝達されるせん断力

T : 引張力の増分を含めた引張力の合力

iii) 床版のチェック

床版のチェックに関しては、対象となる構造系が1ボックスラーメン形状であるため、張出し床版部とボックス内床版での応力チェックに分けられる。

④ 張出し床版部のチェック

張出し床版部の応力度チェックは、通常、張出し床版部とボックスのウェブとの付け根部で行われる。この場合、高欄荷重の増加分荷重で図-4に示すように片持ち張出し梁で曲げモーメント (M_k') を求め、応力度のチェックを行えばよいが、この場合、応力検討点の床版上縁部で所定の応力度の許容値を満足しない場合は、横方向 PC 鋼材を追加することになる。

⑤ ボックスラーメン部のチェック

ボックスラーメン部に作用する荷重は通常、主桁自重、橋面荷重および活荷重である。本検討の場合、これらの荷重に比べ高欄荷重の増加分荷重は非常に小さく、また、高欄荷重による断面力はボックスラーメン構造によりラーメン全体に再分配されることを考えれば、特に応力度のチェックは必要ないと思われるが、特にその必要がある場合には次のようにすればよからう。

図-5に示すように、④で求めた張出し付け根の曲げモーメント M_k' をボックスラーメンの床版とウェブの交点に作用させればよい。それで、その断面力を用いて床版部の応力度のチェックを行えばよい。もし、橋面荷重として実施設計時の高欄荷重によ

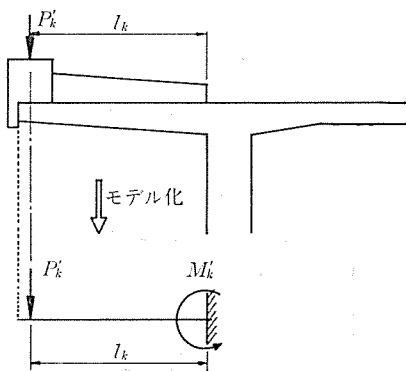


図-4 モデル化と断面力

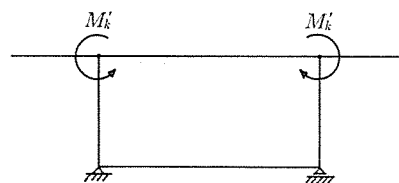


図-5 荷重の載荷方法

る断面力が既知であれば、“i) 主桁のチェック”で述べた方法と同様な応力度チェックを行えばよい。

iv) 橋脚および反力のチェック

全体構造系が一体構造の連続ラーメン構造であるため、上部工の荷重に変更が生ずれば、その影響は橋脚（下部工）および反力にまで及ぶ。したがってこの場合、橋脚の応力度チェックあるいは反力のチェックの作業が必要となるが、対象となる荷重が高欄荷重の増加分荷重であるため、この荷重強度は全死荷重強度および活荷重強度に比べて非常に小さく、特にチェックの必要性はないと考えられるが、チェックの必要性を生じた場合には、i) で説明した方法で実行すればよい。

3) 支間長が設計長と異なる場合のスパン長および荷重強度の変更

支間長が設計長と異なる場合というのは通常考えられないが、例えば、現場で橋脚の位置あるいはアバットの位置に変更が生じた場合には、それらの変更に伴い、主桁長(スパン長)あるいは橋脚高さに変更が生ずることになり、つまり、構造系の部材長および荷重強度に変更が生ずるわけで、特に、連続ラーメン構造の場合には、上・下部一体構造となっているため、これらの変更が構造全体に影響を及ぼすことになり、これらに対するチェックは設計サイドで再度構造解析を行い、主桁、横桁、橋脚（下部工）および反力について入念にチェックする必要がある。

(2) プレストレスに関する事項

1) PC 鋼材の種類の変更

張出し施工される橋梁の場合の使用 PC 鋼材としては、通常、PC 鋼棒あるいは PC 鋼より線の A 種あるいは B 種鋼材が用いられている。PC 鋼材の種類の変更については現場で変更されることはまず考えられず、変更されるとすれば実施設計の段階である。したがって、PC 鋼材の種類が変更になれば、その配置形状やプレストレス導入力が変更されることになり、プレストレスによる断面力、つまり、プレストレスによる静定断面力、不静定 2 次断面力およびクリープの影響による塑性断面力に変更され、主桁、横桁、床版および橋脚の設計上の問題となるので、現場での対応としては非常に困難となり、その対応策は設計サイドで再度入念に応力度のチェ

ックをする必要性がある。

2) 導入プレストレス力の変更

導入プレストレス力の変更については、特に主桁において前述の 1) の問題あるいは、設計導入力を現場サイドで緊張しきれないような問題に伴い、プレストレス力に変更を生ずる場合があるが、例えば、主桁長さの全域にわたって変更される場合にはその影響は構造系全体に及ぶので、この場合には、現場で対応するには非常に困難となり、設計サイドで再度入念な応力度のチェックが必要となろう。しかし、その変更箇所が部分的であれば、それによる影響が構造系全体に及ぶことは考えにくく、この場合には、次のような応力度チェックをすればよからう。

(a) 部分的に変更された導入プレストレス力は、構造系全体に分配されるプレストレス力による 2 次断面力には特に影響しないと考えて応力度をチェックすればよからう。

$$\sigma_u = \sigma_{d,u} + \left(\pm \frac{P' \cdot e_p'}{W_o} + \frac{P'}{A_c} \right) + \sigma_{p2,u}$$

ここに、

$\sigma_{d,u}$: 設計荷重時の死荷重(主桁自重, 橋面荷重ほか)と活荷重によって主桁に生ずる応力度

P' : 変更されたプレストレス力

e_p' : 変更された PC 鋼材の偏心量

W_o : 主桁断面の断面係数

A_c : 主桁断面積

$\sigma_{p2,u}$: プレストレス力によって生ずる 2 次断面力

3) PC 鋼材配置の変更

PC 鋼材配置の変更が構造物の安全性に大きく影響するのは主桁部である。

現場での PC 鋼材配置は、現場での鉄筋と PC 鋼材の配置上の問題、かぶりの問題等により、設計上の PC 鋼材配置とは異なる場合がまま生ずる。この問題は主として主桁の安全性に大きく影響を及ぼす。

主桁では、主桁全長にわたり PC 鋼材の配置が変更されることはまず考えられず、通常部分的な変更となる。したがって、PC 鋼材配置の変更、つまり、この場合 PC 鋼材の偏心量のみが変更されると考えてよい。この場合には、(2) の 2) で述べたチェック方法と同様、部分的な鋼材配置の変更により、プレストレス力による構造系全体へ分配されるプレストレス 2 次断面力(クリープの影響を含む)は変化しないと考えて応力度チェックを行えばよい。

(3) 架設に関する事項

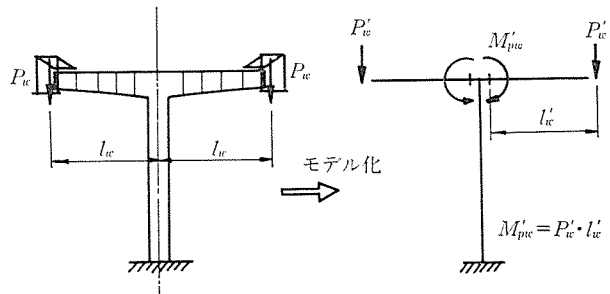
1) 架設荷重の変更

張出し施工される橋梁の場合、架設荷重の変更により

構造物の安全性に大きく影響されるものとしては、特に張出しワーゲン荷重の変更(増加)が考えられる。張出し施工時の応力検討は、各施工ブロックを張り出すごとに、主桁自重、プレストレスおよびワーゲン荷重による合成応力度が所定の許容応力度を満足するように行われるが、通常張出し施工の場合、施工ブロック数も多く、かつ PC 鋼材の偏心量も施工ステップごとに変化するため、一般的にはコンピューターの助けをかりて実施しているのが現状である。したがってこの場合にはワーゲン荷重を変更して再度架設時の計算をし、応力度が所定の許容応力度の範囲内にあればよい。もし、許容応力度の範囲を超える場合には、PC 鋼材量を増やすか、鋼材の緊張力を可能な限り大きくするか、あるいは、PC 鋼材の配置を検討し PC 鋼材の偏心量を変えるなど、現場で可能な処置を行えばよからう。

また、コンピューターの助けをかりずに架設時の応力チェックを行う場合には、例えば 図-6 に示すように、断面力(曲げモーメント)の比較を行い、2) で述べた方法と同様に応力度チェックを行えばよからう。

以上は、特に主桁の応力度に関するチェック方法を示したが、局所的な問題として、ワーゲン荷重の変更に伴い、ワーゲンの転倒に対する安全性の検討²⁾が生ずる。この方法は、図-7 に示すように、ワーゲンは B 点を中心にして右回りに回転しようとするので、A 点において既設の桁の中に固定したアンカーによりワーゲンが浮き上がらないようにする。したがって、アンカーに生じる



ここに、
 P'_w : ワーゲン荷重の増分荷重
 l'_w : 主桁の柱頭部付け根位置からワーゲン荷重載荷位置までの距離

図-6 張出し施工時のモデル化

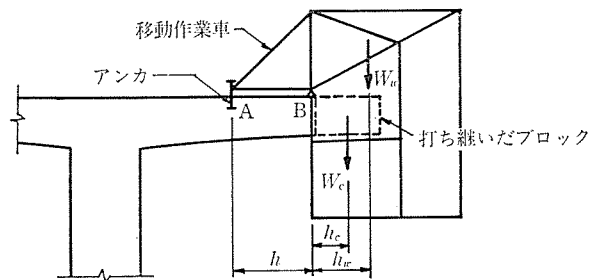


図-7 移動作業車の転倒

張力を T とすれば、 T は次のように計算される。

$$T = \frac{1}{h} \cdot (W_c \cdot h_c + W_w \cdot h_w)$$

ここに、

W_c : 新設ブロックの重量

W_w : ワーゲンの自重

ここで、アンカーの断面積を A 、許容応力度を σ_{sa} とすれば、次の関係を満足するように断面積を求め、固定アンカーのチェックをすればよい。

$$A > \frac{1}{h \cdot \sigma_{sa}} \cdot (W_c \cdot h_c + W_w \cdot h_w)$$

2) 架設方法の変更

3 径間連続ラーメン橋の施工は、通常、張出し施工部と支保工施工部に分けられ、図-8 に示すような施工順序で行われる。しかし、現場での施工条件あるいは施工工程により、その架設方法が変更される場合がある。その変更とは、架設ワーゲンの転用を考慮した変更(図-9 参照)、あるいは、側径間の支保工施工から図-10 に示すような仮支柱と吊支保工を併用した施工方法への変更が考えられる。以下にこれらの施工方法の変更に伴う対応策を述べることにする。

(a) 架設ワーゲンの転用による変更

架設ワーゲンの転用を考慮した場合には、架設方法として図-9 に示すような方法が考えられる。

この場合、施工順序に沿った弾性断面力には差が生じないが、特にクリープによる塑性断面力に差を生ずることになる。このクリープの影響を考慮するための計算法としては、大きく分けて、橋脚および主桁の施工ブロックごとのコンクリート材令を考慮する厳密な計算法と、次式に示すように道路橋示方書(昭和

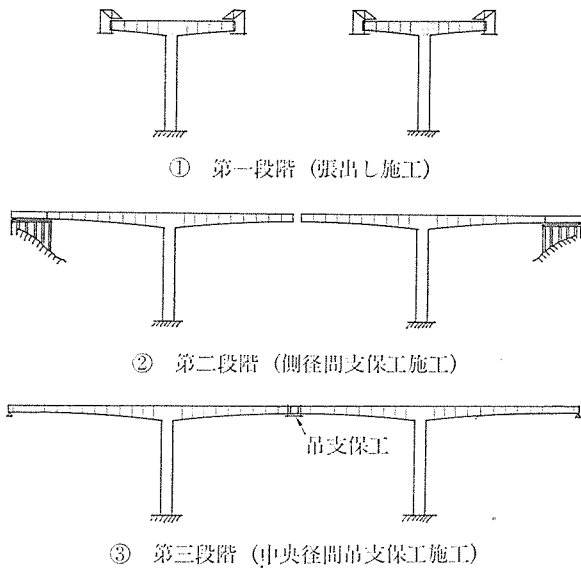


図-8 一般的な架設順序図

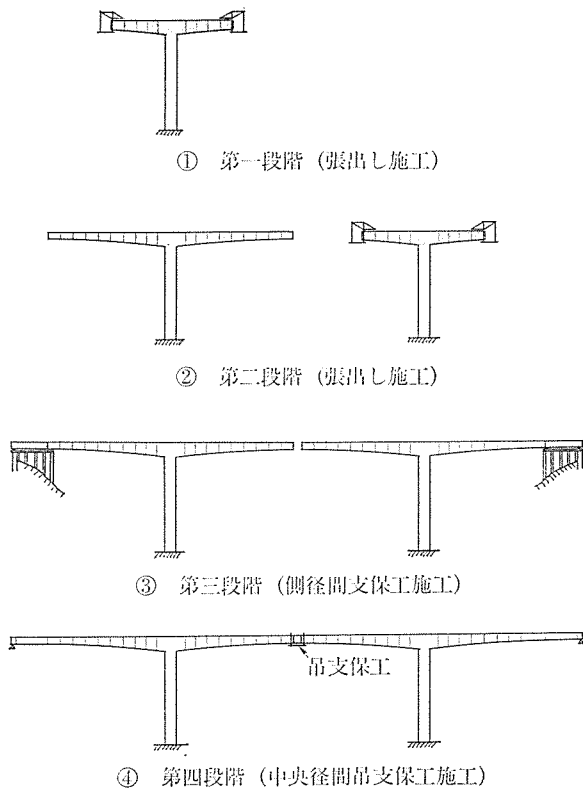


図-9 ワーゲン転用による架設順序図

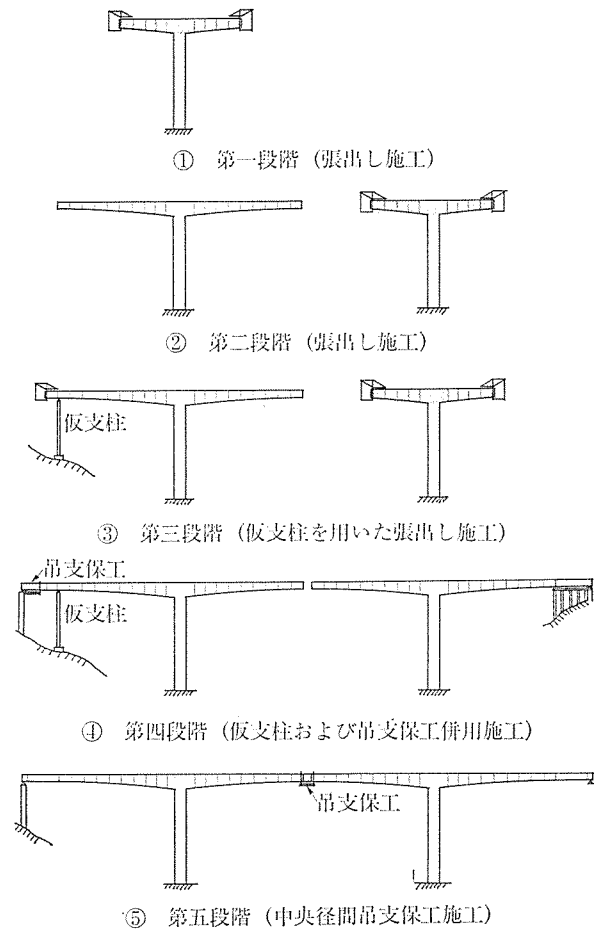


図-10 仮支柱および吊支保工併用による架設順序図

53年1月)³⁾の計算方法

$$\Delta R_{\phi} = (R_0 - R_1)(1 - e^{-\phi})$$

ここに、

ΔR_{ϕ} : コンクリートのクリープによる反力の変化量 (kg)

R_0 : 最終構造系を一度に施工すると仮定した場合の死荷重およびプレストレスによる反力 (kg)

R_1 : 最終構造系になる前の構造における死荷重およびプレストレスによる反力 (kg)

ϕ : 最終構造系が完成した後の各部材におけるクリープ係数の平均値

を用いる簡略計算方法があるが、一般的には、簡略計算法が用いられる場合が多いようである。なお、上式において、反力はすべて断面力として取り扱われる。

したがって、ここでは簡略計算法を用いた場合のクリープの影響を考える。

ここで問題となるのは、施工時のコンクリート部材の材令に係るクリープ係数 ϕ のみであり、上式の中で考えられる断面力については、架設方法が図-8に示す方法から図-9に示す方法に変更された状態では、施工時に生ずる弾性断面力は同じである。したがって、クリープによる不静定力、例えば曲げモーメントは次のように計算される。ここで、クリープ係数を、図-8の施工方法の場合（実施設計の場合）を $\phi = 2.0$ 、図-9の施工方法の場合（架設方法変更の場合）を $\phi' = 1.6$ と仮定する。

$$\begin{aligned} \Delta M_{\phi} &= (M_0 - M_1) \cdot (1 - e^{-2.0}) \\ &= 0.865 \cdot (M_0 - M_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{\phi'} &= (M_0 - M_1) \cdot (1 - e^{-1.6}) \\ &= 0.798 \cdot (M_0 - M_1) \end{aligned}$$

したがって、クリープによる不静定曲げモーメントは、架設方法の変更に伴って約8%の増減を示すことになる。これにより、架設方法の変更に伴う安全度（応力度）チェックは、クリープによる不静定断面力の8%増減分を考慮して、(1)の2)で述べた方法を用い、必要に応じて主桁、横桁、橋脚および反力について行えばよい。

(b) 側径間支保工施工が、仮支柱および吊支保工併用の架設方法に変更される場合（図-10参照）

このような施工方法の変更がある場合には、(a)の変更の場合とは異なり、施工順序に沿った弾性断面力は、実施設計（図-8）の場合と大きく異なり、また、段階施工に伴うクリープによる塑性断面力も大きく異なることにより、もはや、簡単に安全性のチェックはできなくなる。

したがって、この場合には、再度設計サイドで構造解析を行い、プレストレス量も再度検討を行い、入念な安全性のチェックをする必要がある。

また、この場合には、構造物本体の安全性のチェックのほかに、仮支柱および吊支保工の設計の作業がふえることになる。

(4) 施工工程に関する事項

1) 施工工程（施工日数）の変更

架設方法は実施設計時と同様で、施工工程（施工日数）のみが変更される場合（図-8および図-9参照）には、(3)の2)の(a)で述べたように架設順序に沿った弾性断面力には差を生じず、施工日数の差に伴うクリープによる塑性断面力に差を生ずる。

したがって、この場合の安全性のチェックは、前述の(3)の2)の(a)で述べた方法を用いて行えばよいことになる。

4

あとがき

PC 3径間連続ラーメン橋の現場において想定される荷重、プレストレス、架設方法および施工工程のそれぞれの条件変更に対し、構造物の簡単な安全性のチェック方法を述べたが、本文でも述べたとおり、3径間連続ラーメン橋は構造的に高次の不静定構造であり、断面力の解折手法もこのような高次の不静定構造となると、手計算で計算することは困難で、通常コンピューターの助けをかりて変位法により計算される場合が多く、また、構造系が一体構造であるため、それぞれの条件変更に伴い、それがすべて構造系全体に影響を及ぼすので、現場サイドでそれぞれの安全性を簡単にチェックすることは非常に困難となる。したがって、これらの条件変更に対し、厳密に安全性をチェックする場合には、設計サイドで再度構造解析を行い、プレストレス量を決定し、安全性のチェックをする必要がある。

また、特に、現場における条件変更に対し、現場サイドで問題となるのはたわみ（上げ越し量）およびPC鋼材の緊張の管理である。これらについては、想定した条件変更（荷重、プレストレス、架設方法および施工工程）がすべて関連しあうので、特に注意を払って安全性のチェックをする必要がある。

参考文献

- 1) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC多径間連続ラーメン橋に関する研究報告書（昭和63年5月）
- 2) (社)日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧（昭和59年2月）
- 3) (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（昭和53年1月）