

## 合成部材の分担断面力

### 序

我国では合成桁の建設が長らく抑制され、そのため設計計算法は昭和 40 年から発展してなく、いまだに未整備の問題が少なくないと思われる。そのため、先の技術報告“不完全合成部材の解析”において不完全合成部材の構造解析法を、これまでとは異なる視点で記述した。表記上ここでは鋼合成部材としたが、床版と主桁の鋼断面もコンクリート断面も断面積や断面二次モーメントを有するとしており、さらにプレストレス荷重も考慮してあるので、そのまま PC 合成桁にも適用可能である。当社では、クリープ・乾燥収縮を含む固定荷重用の連続桁解析プログラムは、鋼と PC どちらの合成桁にも適用できるように作成している。

この構造解析を引き継ぎ、数次の段階を経て構築される合成・複合構造の設計計算に適用するには、また新たな整理法が必要となる。本報告では、合成桁の総断面力から断面構成要素ごとの分担断面力を各段階で分離することを基本とする。その利点として、

- ・合成断面の全体断面力は加算しても、それから応力度の算定はできないので加算の意味がないが、コンクリート断面や鋼材断面の分担断面力を分離しておけば、断面構成が変化しても分担断面力の加算が可能になる。
- ・また、コンクリート断面の分担断面力が求めてあれば、それを用いてクリープ・乾燥収縮計算における荷重項を直接的に精度よく算定できる。

といったことが挙げられる。

本技術報告の原点は、先の技術報告と同様にかつて鋼合成桁の設計計算に用いていたものを平成 10 年に社内資料として整理したものにある。その後そのまま PC 連結合成桁の検討などにも適用してきたが、どちらの合成桁においても最近問題があらわになってきたのを機に再度整理しなおして公表することにしたものである。

2011 年 6 月 16 日 倉方 慶夫

# 合成桁の分担断面力

東京支社・設計部 田中 伸英，同 石澤 俊希，同 高濱 光夫  
西部支社・設計部 高 龍  
本社・技術本部長 梶田 順一，本社・顧問 倉方 慶夫

## [ 目 次 ]

<記号> -----	1
はじめに -----	2
1. 合成桁の断面定数の定義 -----	4
1.1 基準座標 -----	4
1.2 床版の断面定数 -----	4
1.3 主桁の断面定数 -----	5
1.4 総断面の断面定数 -----	7
2. 総断面力と分担断面力，および主桁のせん断流 -----	8
2.1 総断面の断面力 -----	8
2.2 直応力に関する分担断面力 -----	8
2.3 せん断応力に関する分担断面力(床版と主桁への分離) -----	10
2.4 主桁のせん断流 -----	11
3. 鋼材の付着力と分担せん断力 -----	13
3.1 床版における鋼材の付着力と分担せん断力 -----	13
3.2 主桁における鋼材の付着力と分担せん断力 -----	14
4. 自己つり合い系の断面力と変形 -----	17
4.1 クリープ・乾燥収縮 -----	17
4.2 床版と主桁の温度差 -----	26
4.3 床版コンクリートのひび割れによる応力解放 -----	28
4.4 床版の撤去に伴う床版総断面の応力解放 -----	29
5. PC 合成桁のクリープ・乾燥収縮 -----	31
5.1 クリープ・乾燥収縮応力の基本式 -----	31
5.2 クリープ・乾燥収縮による単体桁のプレストレス損失 -----	33
5.3 鋼材の無視と Mattock の式との比較 -----	34
5.3.1 鋼材を無視したクリープ・乾燥収縮応力の基本式 -----	34
5.3.2 PC 合成桁への適用(鋼材を無視した場合) -----	36
5.3.3 床版と主桁の接合面でのクリープ・乾燥収縮応力(鋼材を無視した場合) -----	37
5.3.4 Mattock の式との数式上の比較 -----	39
【参考文献】 -----	40

## < 記号 >

### [ 一般 ]

- $A$  : 断面積
- $I$  : 断面二次モーメント
- $J$  : 断面一次モーメント
- $e$  : 断面図心からの偏心
- $h$  : 断面の高さ
- $Q$  : 部分断面の断面一次モーメント
- $x$  : 水平方向の座標
- $y$  : 鉛直下向きの座標
- $z$  : 鉛直下向きの座標
- $\xi$  : 床版断面の水平方向の座標
- $\eta$  : 床版断面の鉛直下向きの座標
- $\zeta$  : 床版断面の鉛直下向きの座標
- $E$  : ヤング係数
- $n$  : 鋼とコンクリートのヤング係数比(その外, 図中において図心軸の表示に用いる)
- $M$  : 曲げモーメント
- $N$  : 軸力(軸方向力)
- $S$  : せん断力
- $q$  : せん断流, コンクリートと鋼材間の軸方向付着力
- $P$  : 分布水平力

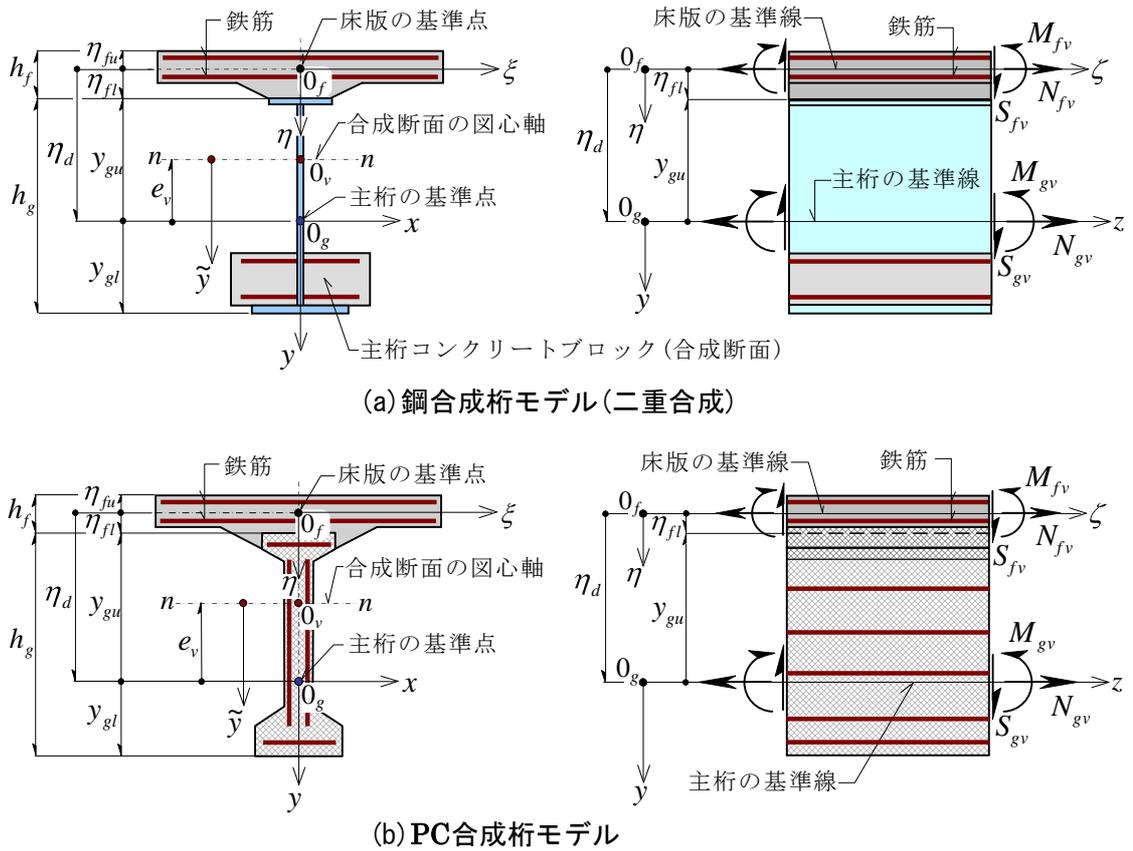
### [ 下添字 ]

- $b$  : 鋼桁に取り付く鉄筋コンクリート・ブロック
- $c$  : コンクリート
- $d$  : ずれ止め(その外, 床版基準線と主桁基準線の離れの表示に用いる)
- $f$  : 床版
- $g$  : 主桁
- $l$  : 断面の下縁
- $r$  : コンクリート中の鋼材(断面積のみ考慮する線材)
- $s$  : 鋼桁
- $,s$  : 拘束を受けない乾燥収縮
- $u$  : 断面の上縁
- $v$  : 合成断面

### [ 肩付 ]

- (0) : 初期応力
- ( $\phi$ ) : 断面力・応力の場合, クリープ応力  
ヤング係数・断面定数の場合,  $(1+\rho\cdot\phi)$  で補正したヤング係数, およびそのヤング係数で換算したコンクリート断面定数を用いて算出した合成断面の断面定数
- ( $s$ ) : 乾燥収縮による断面力と応力
- ( $t$ ) : 床版と主桁の温度差による断面力と応力
- ( $g$ ) : 床版の撤去による断面力と応力

はじめに



図一 1 完全合成桁モデル

図一 1 に代表的な合成部材を示す。我国におけるこれらの設計法は欧州の研究活動に負うところが多いが、近年その欧州において設計法の変革が進められた。その主体は限界状態設計法への移行であるが、合成部材に関しては次のような扱いの変化が見てとれる。

- ・クリープ・乾燥収縮応力の計算法の改訂
- ・鋼・コンクリート合成桁(以下では、鋼合成桁と略称する)における床版コンクリートのひび割れ幅照査の導入
- ・コンクリート中の鋼材の断面への参入

これに対し、我国の設計法は道路橋示方書 I<sup>1)</sup>~III<sup>3)</sup>(以下、道示と略記)およびこれらの設計便覧<sup>4),5)</sup>に記されているものからほとんど発展していない。許容応力度法の制約のもとで欧州方式の設計法に改める活動<sup>6),7)</sup>もあるが、それらでも設計計算の基本式やクリープ応力計算法は昭和 40 年代から変わらず、コンクリート中の鋼材やひび割れ区間の剛性の扱いも未整備に見える。一部では、計算法が迷走し、むしろ後退した感さえある計算も行われている<sup>8)</sup>。

このように我国では合成部材の設計法はいまだ混乱した状況にあり、全体を整理し、再編する必要性を感じる。本書は、その一環として合成部材における断面定数と分担断面力(合成断面を構成する各要素の断面力)を扱うが、本論に入る前にいま一つ現状の問題を概観し、本書の目的を説明しておく。

合成部材の設計では次の事項に配慮しなければならない。

- ・段階的に断面構成要素であるコンクリートや鋼材が付加される。
- ・コンクリートは材齢の経過に連れて強度が増加し、同時に乾燥収縮が進行する。
- ・コンクリートのクリープは初期応力が作用する材齢とその後の経過材齢が関与する。

このように、合成部材の断面性能は施工段階を追って、また時間経過でも変化するため、

- a. 合成部材の中立軸位置も各段階や時点で変化する。
- b. そのため、各段階や時点での総断面力(合成断面全体で応力を積分した断面力)を単に加算しても、加算結果から断面の応力度分布を算出できない。すなわち、総断面力は加算しても意味がない。

したがって、断面性能に変化がない非合成断面部材とは扱いを変えなければならず、本書では次の事項を前提として記述する。

- 1) 一般の骨組構造を対象とするとき各状態で常に中立軸を以って立式すると、解析の度に座標を設定し直すという困難を伴う。そのため、部材と平行に任意の位置に1つの解析の基準線を設け、それを部材座標軸として1つの全体座標系のもとで全解析を行う。
- 2) 段階ごとに、総断面力を分担断面力に分解して保存する。

分担断面力を用いる利点は次のようである。

- ・分担断面力は、合成構造の構築過程やコンクリートの材齢に関係なく加算が可能になる。
- ・これにより任意の段階あるいは時点で抵抗核モーメント図が正確に描け、状況把握が確実に行える。
- ・クリープ変形を引き起こすコンクリート断面の分担断面力を分離するので、クリープ応力の計算が行いやすくなる。

また、コンクリートのクリープ・乾燥収縮の計算法が世界的に見直されている中、我国では設計計算法としては未整理の状態に留まっている。その一つとして、PC合成桁のクリープ・乾燥収縮の計算には幾つかの疑問を感じる。すなわち、

- 1) PC合成桁のクリープ・乾燥収縮による断面内での応力の再分配の計算法として **Mattock** の計算法が道示Ⅲと便覧<sup>5)</sup>で解説されているが、この計算法には材齢係数が現れず、**Dischinger** の計算法<sup>9),10)</sup>などとも異なる。
- 2) 一方、PC連結合成桁のクリープ・乾燥収縮による不静定反力の計算に対して、便覧<sup>5)</sup>では **Dischinger** の計算法と思われるものが示されおり、時代と仮定が異なる計算法を組合せた設計法が提示されている。
- 3) 昭和55年の道示Ⅰにおいて“回復するひずみ(遅れ弾性ひずみ)”という用語を導入して新たな考えに切り替えたような記述がなされているが、上記のように実務に適用されている計算は **Dischinger** 時代から何も変わっていない。

このような不統一と説明不足は、クリープ現象の基本的な理解の妨げとなろう。本書はクリープ・乾燥収縮応力そのものの計算を扱うものではないが、**MC-90**<sup>11)</sup>にも取り込まれた **Trost**<sup>13),14)</sup>による新しいクリープ理論に適用可能で、鋼材によるクリープ・乾燥収縮の拘束効果も考慮可能な計算式を提示する。

まずは断面定数の定義から始めて通常荷重に対する分担断面力を扱い、続いてクリープ・乾燥収縮、床版と主桁の温度差、および床版コンクリートのひび割れに伴う分担断面力の再分配を扱う。その際、基本的には鋼合成桁とPC合成桁の区別なく記述する。また既往の計算式と比較し考察する。

## 1. 合成断面の断面定数の定義

骨組構造解析では骨組線を組んで計算を実行する。現在一般的に行われている剛性法による解析では骨組線上で定義された変位と断面力の関係をもとに結果が求められる。骨組線として一般には部材の図心軸が採られるが、その場合断面性能が刻々と変化する合成部材ではその度に解析上の骨組を組み直す必要が生じ不便である。骨組線を部材の図心軸に採る利点は、剛性マトリックスの作成において[軸方向変位]と[たわみ・たわみ角]との連成項が消えることであるが、今日のコンピュータで処理する時代になるとその利点は微々たるものであり、骨組を組み直す方が遙かに面倒である。

上記の理由から、部材の図心軸を解析の骨組線としない骨組解析を著者らは採用しており、この骨組線を以下では**基準線**と名付けている。この解析法によれば、初めに求まる断面力は基準線に関するものであり、断面図心の断面力ではない。したがって、基準線に関する断面力から直接的に断面上の応力度は算定できない。基準線上のモーメント断面力を断面図心の曲げモーメントに置きなおしてから断面応力度を計算しなければならない。

ここでは骨組解析法には言及しないが、上記の点を念頭に置いてそれに応用できる形で分担断面力の説明を行う。まずは、断面定数の定義を明確にすることから始める。

### 1.1 基準座標

図-1に示す合成部材を対象とし、床版と主桁の基準線を部材図心軸とは無関係にそれぞれ任意の位置に設定する。ただし、ここでは床版の基準線  $\zeta$  と主桁の基準線  $\varepsilon$  は桁全長に亘り主桁の上縁に平行とする。なお、主桁の基準線は総断面の基準線も兼ね、骨組構造解析上の骨組線でもある。また、床版の基準線と主桁の基準線に原点を持つ鉛直下向きの座標を、それぞれ  $\eta$  座標、 $y$  座標と表記する。

構造解析においては、

- ・  $\eta_{ft}$  : 鋼桁上縁から基準線までの高さ(正確には、床版基準線から鋼桁上縁までの  $\eta$  座標)
- ・  $\eta_d$  : 床版基準線と鋼桁基準線の距離(正確には、床版基準線から鋼桁基準線までの  $\eta$  座標)

などを入力して、基準線の位置を設定する。このとき、

$$y = \eta - \eta_d \quad (1.1)$$

である。

この基準線に関して以下のように断面定数を算定するが、断面の応力度計算などにおいて必要に応じて適宜図心軸に関する断面定数に変換する。

### 1.2 床版の断面定数

床版断面として、コンクリート断面と鋼材断面の断面定数を、次のように床版基準線に関して算定する。

#### (1) 床版基準線に関する床版コンクリート断面の断面定数

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{fc} = \int_{A_{fc}} dA_{fc} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{fc} = \int_{A_{fc}} \eta dA_{fc} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{fc} = \int_{A_{fc}} \eta^2 dA_{fc} \end{array} \right\} \quad (1.2a\sim c)$$

ここに、添字  $f$  は床版を、 $c$  はコンクリートを表し、 $\int_{A_{fc}} dA_{fc}$  は床版コンクリート断面に亘る積分を表す。

床版コンクリート断面の図心位置  $e_{fc}$  とこの図心軸に関するコンクリート断面の断面二次モーメント  $I_{fc0}$  は次式となる。

$$e_{fc} = J_{fc}/A_{fc} \quad , \quad I_{fc0} = I_{fc} - A_{fc} \cdot e_{fc}^2 \quad (1.3a,b)$$

(2) 床版基準線に関する床版鋼材断面の断面定数

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{fr} = \int_{A_{fr}} dA_{fr} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{fr} = \int_{A_{fr}} \eta dA_{fr} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{fr} = \int_{A_{fr}} \eta^2 dA_{fr} \end{array} \right\} \quad (1.4 a\sim c)$$

ここに、添字  $r$  はコンクリート中の鋼材を表し、 $\int_{A_{fr}} dA_{fr}$  は床版鋼材断面に亘る積分である。  
床版鋼材断面の図心位置  $e_{fr}$  とこの図心軸に関する鋼材断面の断面二次モーメント  $I_{fr0}$  は、

$$e_{fr} = J_{fr}/A_{fr} \quad , \quad I_{fr0} = I_{fr} - A_{fr} \cdot e_{fr}^2 \quad (1.5a,b)$$

(3) 床版基準線に関する床版総断面の断面定数

床版コンクリートと床版鋼材の合成断面を床版総断面と呼称する。その断面定数は次式で算定される。

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{fv} = \frac{1}{n_f} A_{fc} + A_{fr} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{fv} = \frac{1}{n_f} J_{fc} + J_{fr} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{fv} = \frac{1}{n_f} I_{fc} + I_{fr} \end{array} \right\} \quad (1.6a\sim c)$$

ここに、添字  $v$  は合成断面であることを表し、 $n_f$  は鋼材と床版コンクリートのヤング係数比である。すなわち、鋼のヤング係数を  $E_s$ 、床版コンクリートのヤング係数を  $E_{fc}$  とするとき、

$$n_f = E_s/E_{fc} \quad (1.7)$$

である。以下断面定数は全て鋼に換算した断面定数として扱う。

床版総断面の図心位置  $e_{fv}$  とこの図心軸に関する床版総断面の断面二次モーメント  $I_{fv0}$  は、

$$e_{fv} = J_{fv}/A_{fv} \quad , \quad I_{fv0} = I_{fv} - A_{fv} \cdot e_{fv}^2 \quad (1.8a,b)$$

### 1.3 主桁の断面定数

(1) 主桁基準線に関する主桁コンクリートの断面定数

前記と同様に、主桁コンクリート断面の主桁基準線に関する断面定数は、次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{gc} = \int_{A_{gc}} dA_{gc} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{gc} = \int_{A_{gc}} y dA_{gc} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{gc} = \int_{A_{gc}} y^2 dA_{gc} \end{array} \right\} \quad (1.9a\sim c)$$

ここに添字  $g$  は主桁を表し、 $\int_{A_{gc}} dA_{gc}$  は主桁内のコンクリート断面に亘る積分である。

主桁コンクリート断面の図心位置  $e_{gc}$  とこの図心軸に関するコンクリート断面の断面二次モーメント  $I_{gc0}$  は、

$$e_{gc} = J_{gc}/A_{gc} \quad , \quad I_{gc0} = I_{gc} - A_{gc} \cdot e_{gc}^2 \quad (1.10a,b)$$

(2) 主桁基準線に関する主桁コンクリート中の鋼材断面の断面定数

主桁の鋼材を、鋼桁とコンクリート中の鋼材に分けて記述する。以下主桁コンクリート中の鋼材を主桁鋼材と呼称することとし、その断面定数を次式で定義する。

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{gr} = \int_{A_{gr}} dA_{gr} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{gr} = \int_{A_{gr}} y dA_{gr} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{gr} = \int_{A_{gr}} y^2 dA_{gr} \end{array} \right\} \quad (1.11a\sim c)$$

ここに、 $\int_{A_{gr}} dA_{gr}$  は主桁鋼材断面に亘る積分を表す。

主桁鋼材断面の図心位置  $e_{gr}$  とこの図心軸に関するコンクリート断面の断面二次モーメント  $I_{gr0}$  は、

$$e_{gr} = J_{gr}/A_{gr} \quad , \quad I_{gr0} = I_{gr} - A_{gr} \cdot e_{gr}^2 \quad (1.12a,b)$$

同様に鋼桁の断面定数は、次のようである。

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{gs} = \int_{A_{gs}} dA_{gs} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{gs} = \int_{A_{gs}} y dA_{gs} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{gs} = \int_{A_{gs}} y^2 dA_{gs} \end{array} \right\} \quad (1.13a\sim c)$$

ここに、 $\int_{A_{gs}} dA_{gs}$  は鋼桁断面に亘る積分を表す。

主桁鋼材断面の図心位置  $e_{gs}$  とこの図心軸に関するコンクリート断面の断面二次モーメント  $I_{gs0}$  は、

$$e_{gs} = J_{gs}/A_{gs} \quad , \quad I_{gs0} = I_{gs} - A_{gs} \cdot e_{gs}^2 \quad (1.14a,b)$$

### (3) 主桁基準線に関する主桁コンクリートブロックの断面定数

ここで、図-1(a)の鋼桁の下側に取付けられた主桁コンクリートブロックの断面定数を定義しておく。

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{bv} = \frac{1}{n_g} A_{gc} + A_{gr} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{bv} = \frac{1}{n_g} J_{gc} + J_{gr} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{bv} = \frac{1}{n_g} I_{gc} + I_{gr} \end{array} \right\} \quad (1.15a\sim c)$$

ここに、 $n_g$  は鋼材と主桁コンクリートのヤング係数比である。すなわち、主桁コンクリートのヤング係数を  $E_{gc}$  とするとき、

$$n_g = E_s/E_{gc} \quad (1.16)$$

ブロックの図心位置  $e_{bv}$  とこの図心軸に関する床版総断面の断面二次モーメント  $I_{bv0}$  は、

$$e_{bv} = J_{bv}/A_{bv} \quad , \quad I_{bv0} = I_{bv} - A_{bv} \cdot e_{bv}^2 \quad (1.17a,b)$$

また、コンクリート断面の図心位置とこの図心に関するコンクリート断面の断面二次モーメントは、

$$e_{bc} = J_{bc}/A_{bc} \quad , \quad I_{bc0} = I_{bc} - A_{bc} \cdot e_{bc}^2 \quad (1.18a,b)$$

### (4) 主桁基準線に関する主桁総断面の断面定数

主桁総断面は、主桁コンクリート・主桁鋼材・鋼桁の3者の合成断面であり、その断面定数は、次のようである。

a. 鋼桁に対して、

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{断面積} \quad A_{gv} = \frac{1}{n_g} A_{gc} + A_{gr} + A_{gs} = A_{bv} + A_{gs} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{gv} = \frac{1}{n_g} J_{gc} + J_{gr} + J_{gs} = J_{bv} + J_{gs} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad I_{gv} = \frac{1}{n_g} I_{gc} + I_{gr} + I_{gs} = I_{bv} + I_{gs} \end{array} \right\} \quad (1.19a\sim c)$$

b. PC桁に対して、

$$\cdot \text{断面積} \quad A_{gv} = \frac{1}{n_g} A_{gc} + A_{gr} \quad (1.20a)$$

$$\cdot \text{断面一次モーメント} \quad J_{gv} = \frac{1}{n_g} J_{gc} + J_{gr} \quad (1.20b)$$

$$\cdot \text{断面二次モーメント } I_{gv} = \frac{1}{n_g} I_{gc} + I_{gr} \quad (1.20c)$$

#### 1.4 総断面の断面定数

床版総断面と主桁総断面の2者を合成した断面を単に**総断面**(あるいは**全体総断面**)と呼称し、下付の添字  $v$  を付けて表す。この総断面の断面定数は以下のものである。

##### (1) 総断面の主桁基準線に関する断面定数

$$\left. \begin{aligned} \cdot \text{断面積} \quad & A_v = \int_{A_v} dA_v = \int_{A_{fv}} dA_{fv} + \int_{A_{gv}} dA_{gv} = A_{fv} + A_{gv} \\ \cdot \text{断面一次モーメント} \quad & J_v = \int_{A_v} y dA_v = \int_{A_{fv}} (\eta - \eta_d) dA_{fv} + \int_{A_{gv}} y dA_{gv} = J_{fv} - A_{fv} \cdot \eta_d + J_{gv} \\ \cdot \text{断面二次モーメント} \quad & I_v = \int_{A_v} y^2 dA_v = \int_{A_{fv}} (\eta - \eta_d)^2 dA_{fv} + \int_{A_{gv}} y^2 dA_{gv} \\ & = I_{fv} - 2J_{fv} \cdot \eta_d + A_{fv} \cdot \eta_d^2 + I_{gv} \end{aligned} \right\} (1.21a,b)$$

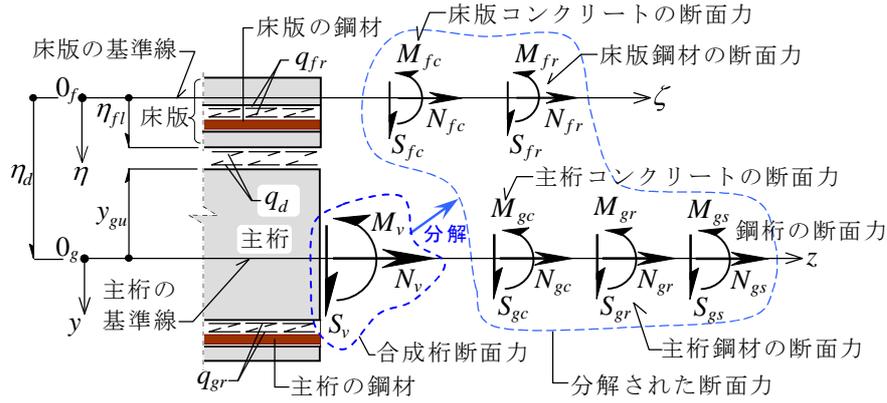
ここに、 $\int_{A_v} dA_v$  は総断面に亘る積分を表す。

##### (2) 総断面の断面図心に関する断面定数

総断面の図心位置  $e_v$  とこの図心軸に関する断面二次モーメント  $I_{v0}$  は、

$$e_v = J_v / A_v \quad , \quad I_{v0} = I_v - A_v \cdot e_v^2 \quad (1.22a,b)$$

## 2. 総断面力と分担断面力，および主桁のせん断流



図－2 分担断面力の分離

### 2.1 総断面の断面力

剛性法による構造解析の骨組線を主桁基準線に採れば，図－2の主桁基準線に関する総断面力  $N_v, M_v, S_v$  がまず出力される．すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \cdot \text{軸方向力} & N_v = \int_{A_v} \sigma_z dA_v \\ \cdot \text{曲げモーメント} & M_v = \int_{A_v} \sigma_z \cdot y dA_v \\ \cdot \text{せん断力} & S_v = \int_{A_v} \tau_{yz} dA_v \end{aligned} \right\} \quad (2.1a\sim c)$$

であり， $\sigma_z$  と  $\tau_{yz}$  は総断面に作用する直応力度とせん断応力度を表す．

総断面の図心軸に関する曲げモーメント  $M_{v0}$  は、

$$M_{v0} = \int_{A_v} \sigma_z \cdot \tilde{y} dA_v = \int_{A_v} \sigma_z (y - e_v) dA_v = M_v - N_v \cdot e_v \quad (2.2)$$

である． $\tilde{y}$  は図－1に示す総断面の図心軸に原点を持つ鉛直方向座標である．

$$\tilde{y} = y - e_v \quad (2.3)$$

総断面上の直応力  $\sigma_z$  を、コンクリート断面上では  $\sigma_c$ 、鋼桁と鋼材断面上では  $\sigma_s$  と表すとき、それらは次式で算定される．

$$\sigma_z = \left\{ \begin{array}{l} \text{コンクリート断面上: } \sigma_c = \frac{1}{n} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \tilde{y} \right) = \frac{1}{n} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (\eta - \eta_d - e_v) \right) \\ \text{鋼材断面上: } \sigma_s = \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \tilde{y} = \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y - e_v) \end{array} \right\} \quad (2.4a,b)$$

ここに  $n$  は、床版コンクリートにおいては  $n_f$ ，主桁コンクリートにおいては  $n_g$  である．

以下では，式(2.1)の総断面力を図－2に示すように断面構成要素の分担断面力に分解する．

### 2.2 直応力に関する分担断面力

#### 2.2.1 床版の断面力

##### (1) 床版コンクリート断面の軸力と曲げモーメント

床版コンクリート断面の床版基準線に関する断面力は，次式で算定される．

$$\left. \begin{aligned} N_{fc} &= \int_{A_{fc}} \sigma_z dA_{fc} = \frac{1}{n_f} \cdot \left( \frac{A_{fc}}{A_v} N_v + \frac{J_{fc} - A_{fc}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0} \right) \\ M_{fc} &= \int_{A_{fc}} \sigma_z \eta dA_{fc} = \frac{1}{n_f} \cdot \left( \frac{J_{fc}}{A_v} N_v + \frac{I_{fc} - J_{fc}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.5a,b)$$

床版コンクリート断面の図心に関する曲げモーメントは、

$$M_{fc0} = \int_{A_{fc}} \sigma_z (\eta - e_{fc}) dA_{fc} = M_{fc} - N_{fc} \cdot e_{fc} \quad (2.6)$$

## (2) 床版中の鋼材断面の軸力と曲げモーメント

床版基準線に関する床版鋼材断面の断面力は、次式で算定される。

$$\left. \begin{aligned} N_{fr} &= \int_{A_{fr}} \sigma_z dA_{fr} = \frac{A_{fr}}{A_v} N_v + \frac{J_{fr} - A_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0} \\ M_{fr} &= \int_{A_{fr}} \sigma_z \eta dA_{fr} = \frac{J_{fr}}{A_v} N_v + \frac{I_{fr} - J_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0} \end{aligned} \right\} \quad (2.7a,b)$$

床版鋼材断面の図心に関する曲げモーメントは、

$$M_{fr0} = \int_{A_{fr}} \sigma_z (\eta - e_{fr}) dA_{fr} = M_{fr} - N_{fr} \cdot e_{fr} \quad (2.8)$$

## (3) 床版合成断面の断面力

床版基準線に関する床版合成断面の断面力は、次式で算定される。

$$\left. \begin{aligned} N_{fv} &= \int_{A_{fv}} \sigma_z dA_{fv} = \int_{A_{fv}} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (\eta - \eta_d - e_v) \right) dA_{fv} \\ &= \frac{A_{fv}}{A_v} N_v + \frac{J_{fv} - A_{fv}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0} \\ M_{fv} &= \int_{A_{fv}} \sigma_z \eta dA_{fv} = \int_{A_{fv}} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (\eta - \eta_d - e_v) \right) \eta dA_{fv} \\ &= \frac{J_{fv}}{A_v} N_v + \frac{I_{fv} - J_{fv}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0} \end{aligned} \right\} \quad (2.9a,b)$$

床版合成断面の図心に関する曲げモーメントは、

$$M_{fv0} = \int_{A_{fv}} \sigma_z (\eta - e_{fv}) dA_{fv} = M_{fv} - N_{fv} \cdot e_{fv} \quad (2.10)$$

## 2.2.2 主桁の断面力

### (1) 主桁コンクリート断面の軸力と曲げモーメント

主桁基準線に関する主桁コンクリートの断面力は、次式で算定される。

$$\left. \begin{aligned} N_{gc} &= \int_{A_{gc}} \sigma_z dA_{gc} = \frac{1}{n_g} \cdot \left( \frac{A_{gc}}{A_v} N_v + \frac{J_{gc} - A_{gc} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \right) \\ M_{gc} &= \int_{A_{gc}} \sigma_z y dA_{gc} = \frac{1}{n_g} \cdot \left( \frac{J_{gc}}{A_v} N_v + \frac{I_{gc} - J_{gc} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.11a,b)$$

床版コンクリート断面の図心に関する曲げモーメントは、

$$M_{gc0} = \int_{A_{gc}} \sigma_z (y - e_{gc}) dA_{gc} = M_{gc} - N_{gc} \cdot e_{gc} \quad (2.12)$$

### (2) 主桁コンクリート中の鋼材断面の軸力と曲げモーメント

主桁基準線に関する主桁コンクリート中の鋼材の断面力は、

$$\left. \begin{aligned} N_{gr} &= \int_{A_{gr}} \sigma_z dA_{gr} = \frac{A_{gr}}{A_v} N_v + \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \\ M_{gr} &= \int_{A_{gr}} \sigma_z y dA_{gr} = \frac{J_{gr}}{A_v} N_v + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \end{aligned} \right\} \quad (2.13a,b)$$

鋼材断面の図心に関する曲げモーメントは次式となる。

$$M_{gr0} = \int_{A_{gr}} \sigma_z (y - e_{gr}) dA_{gr} = M_{gr} - N_{gr} \cdot e_{gr} \quad (2.14)$$

### (3) 鋼桁の軸力と曲げモーメント

主桁基準線に関する鋼桁の断面力は、

$$\left. \begin{aligned} N_{gs} &= \int_{A_{gs}} \sigma_z dA_{gs} = \frac{A_{gs}}{A_v} N_v + \frac{J_{gs} - A_{gs} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \\ M_{gs} &= \int_{A_{gs}} \sigma_z y dA_{gs} = \frac{J_{gs}}{A_v} N_v + \frac{I_{gs} - J_{gs} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \end{aligned} \right\} \quad (2.15a,b)$$

鋼桁断面の図心に関する曲げモーメントは次式となる。

$$M_{gs0} = \int_{A_{gs}} \sigma_z (y - e_{gs}) dA_{gs} = M_{gs} - N_{gs} \cdot e_{gs} \quad (2.16)$$

#### (4) 主桁合成断面の断面力

主桁基準線に関する主桁合成断面の断面力は、

$$\left. \begin{aligned} N_{gv} &= \int_{A_{gv}} \sigma_z dA_{gv} = \int_{A_{gv}} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y - e_v) \right) dA_{gv} = \frac{A_{gv}}{A_v} N_v + \frac{J_{gv} - A_{gv} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \\ M_{gv} &= \int_{A_{gv}} \sigma_z \eta dA_{gv} = \int_{A_{gv}} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y - e_v) \right) \eta dA_{gv} = \frac{J_{gv}}{A_v} N_v + \frac{I_{gv} - J_{gv} e_v}{I_{v0}} M_{v0} \end{aligned} \right\} \quad (2.17a,b)$$

主桁合成断面の図心に関する曲げモーメントは次式となる。

$$M_{gv0} = \int_{A_{gv}} \sigma_z (y - e_{gv}) dA_{gv} = M_{gv} - N_{gv} \cdot e_{gv} \quad (2.18)$$

#### (5) 各断面構成要素の断面力を用いた総断面力の表式

逆に、総断面力を断面構成要素の断面力で表すと次のようである。

$$\left. \begin{aligned} N_v &= \int_{A_v} \sigma_z dA_v = \int_{A_{fv}} \sigma_z dA_{fv} + \int_{A_g} \sigma_z dA_{gv} = N_{fv} + N_{gv} \\ M_v &= \int_{A_v} \sigma_z y dA_v = \int_{A_{fv}} \sigma_z (\eta - \eta_d) dA_{fv} + \int_{A_g} \sigma_z y dA_{gv} = M_{fv} - N_{fv} \cdot \eta_d + M_{gv} \end{aligned} \right\} \quad (2.19a,b)$$

### 2.3 せん断応力に関する分担断面力(床版と主桁への分離)

床版合成断面のせん断力  $S_{fv}$  は、主桁のせん断力  $S_{gv}$  と合せて総断面のせん断力  $S_v$  を構成する。

$$S_v = S_{fv} + S_{gv} \quad (2.20)$$

図-3の微小梁要素を考え、床版には水平分布外力  $p_{fz}$ 、鋼桁には水平分布外力  $p_{gz}$  が作用しているとする。この他に、床版と鋼桁の間にはずれ止めのせん断応力  $q_d$  が作用する。

この床版と鋼桁の微小桁要素の  $z$  軸方向のつり合いは、

$$N'_{fv} = -q_d - p_{fz}, \quad N'_{gv} = q_d - p_{gz} \quad (2.21a,b)$$

また回転のつり合いは、

$$S_{fv} = M'_{fv} + (q_d \eta_{fl} + p_{fz} \eta_p), \quad S_{gv} = M'_{gv} - (q_d y_{gu} - p_{gz} y_p) \quad (2.22a,b)$$

となる。ここに、 $()' = d()/dz$  である。

以上から、床版の受け持つせん断力  $S_{fv}$  と鋼桁の分担せん断力  $S_{gv}$ 、およびずれ止めのせん断応力  $q_d$  が次のように求まる。

$$\begin{aligned} S_{fv} &= \left( \frac{J_{fv}}{A_v} \right)' N_v + \left( \frac{J_{fv}}{A_v} \right) N'_v + \left( \frac{I_{fv} - J_{fv} (\eta_d + e_v)}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{I_{fv} - J_{fv} (\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M'_{v0} \\ &\quad + q_d \eta_{fl} + p_{fz} \eta_p \end{aligned} \quad (2.23a)$$

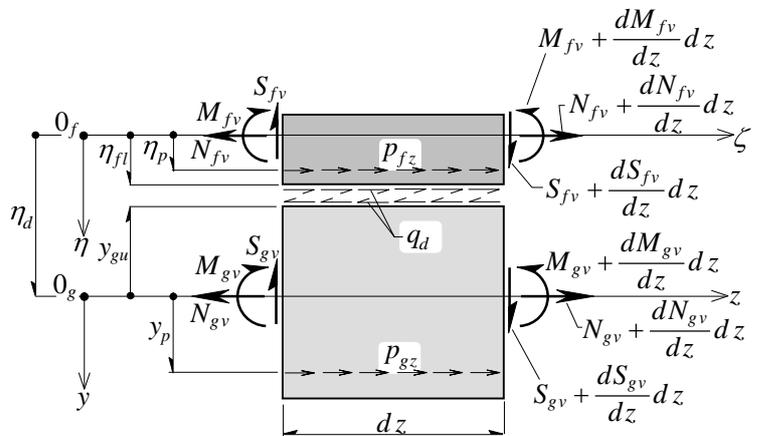


図-3 微小梁要素

$$S_{gv} = \left( \frac{J_{gv}}{A_v} \right)' N_v + \left( \frac{J_{gv}}{A_v} \right) N'_v + \left( \frac{I_{gv} - J_{gv} e_v}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{I_{gv} - J_{gv} e_v}{I_{v0}} M'_{v0} - q_d y_{gu} + p_{gz} y_p \quad (2.23b)$$

$$\begin{aligned} q_d &= - \left( \frac{A_{fv}}{A_v} \right)' N_v - \left( \frac{A_{fv}}{A_v} \right) N'_v - \left( \frac{J_{fv} - A_{fv} (\eta_d + e_v)}{I_{v0}} \right)' M_{v0} - \left( \frac{J_{fv} - A_{fv} (\eta_d + e_v)}{I_{v0}} \right) M'_{v0} - p_{fz} \\ &= \left( \frac{A_{gv}}{A_v} \right)' N_v + \left( \frac{A_{gv}}{A_v} \right) N'_v + \left( \frac{J_{gv} - A_{gv} e_v}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \left( \frac{J_{gv} - A_{gv} e_v}{I_{v0}} \right) M'_{v0} + p_{gz} \end{aligned} \quad (2.24)$$

ここに、式(2.2),(2.19)～(2.22)より、

$$N'_v = N'_{fv} + N'_{gs} = -p_{fz} - p_{gz} \quad , \quad M'_{v0} = S_v - N_v e'_v + p_{fz} [(\eta_d + e_v) - \eta_p] - p_{gz} (y_p - e_v) \quad (2.25a,b)$$

## 2.4 主桁のせん断流

図-4は主桁を側面から見たときの微小要素を表す。主桁の厚み方向(図-1の $x$ 軸方向)に応力度は一様に分布すると仮定して微小要素の厚みは単位厚としている。この微小要素の水平方向のつり合いから、

$$\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial \bar{y}} = - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}$$

を得る。これを主桁厚 $t$ のせん断流 $q = t \cdot \tau_{zy}$ で表すと、

$$\frac{\partial q}{\partial \bar{y}} = -t \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (2.26b)$$

一方、主桁の直応力 $\sigma_z$ は、

$$\sigma_z = \frac{N_{gv}}{A_{gv}} + \frac{M_{gv0}}{I_{gv0}} \bar{y} \quad (2.27)$$

であり、 $\bar{y}$ は図-5に示す主桁の図心軸を原点とする鉛直下向きの座標である。

$$\bar{y} = y - e_{gv} \quad (2.28)$$

式(2.26b)に式(2.27)を代入して $\bar{y}$ に沿って積分すると、腹板のせん断流 $q$ の算定式が、

$$q = q_d \left( 1 - \frac{\Delta A_{gv}}{A_{gv}} \right) + \frac{\Delta Q_{gv}}{I_{gv0}} M'_{gv0} - \left( \frac{1}{A_{gv}} \right)' N_{gv} \cdot \Delta A_{gv} + \left( \frac{1}{I_{gv0}} \right)' M_{gv0} \cdot \Delta Q_{gv} \quad (2.29)$$

と求まる。ここに、

$$\Delta A_g = \int_{\bar{y}_u}^{\bar{y}} t d\bar{y} \quad , \quad \Delta Q_g = - \int_{\bar{y}_u}^{\bar{y}} t \bar{y} d\bar{y} \quad (2.30)$$

であり、PC桁の場合はコンクリート中の鋼材を換算して $t$ に含める。 $\Delta A_g$ は主桁上縁から着目する点 $\bar{y}$ までの断面積(図-5の斜線部)を表し、 $\Delta Q_g$ は $\Delta A_g$ 部の主桁図心軸に関する断面一次モーメントを表す。また、式(2.17)と(2.23b)から、

$$M'_{gv0} = S_{gv} + q_d \cdot (y_{gu} - e_{gv}) - N_{gv} \cdot e'_{gv} \quad (2.31)$$

である。

とくに断面が一定の場合には式(2.29)の右辺3,4項はゼロになり、主桁のせん断流は図-5に示す分布となる。

図-5(a)の主桁コンクリートが無い鉄桁の場合は、フランジのせん断流は式(2.29)ではなく、薄肉梁のせん断流理論から計算する必要がある。ただし、上フランジに関しては床版からのせん断応力の伝達が一般に明確でない。また、図-1のように鋼桁腹板の $\bar{y}_b$ の位置に主桁コンクリートブロックが取付くとすると、それから伝達されるせん断応力 $q_{bd}$ の分だけせん断流に段差が生ずる。この $q_{bd}$ は、式(2.21a),(2.24)と同様にして次式で算定される。

$$q_{bd} = -(N_{gc} + N_{gr})' = -\left(\frac{A_{bv}}{A_v}\right)' N_v - \frac{A_{bv}}{A_v} N_v' - \left(\frac{J_{bv} - A_{bv}e_v}{I_{v0}}\right)' M_{v0} - \frac{J_{bv} - A_{bv}e_v}{I_{v0}} M_{v0}' - p_{gz} \quad (2.32)$$

図-5 (b)の PC 桁に関しては、桁上縁に床版からのせん断流  $q$  (ずれ止めのせん断応力  $q_d$ ) が作用するとして描いたものであるが、一般にはその作用点は明確でない。また、上下の突縁部のせん断応力度  $\tau_{xy}$  は乱れが大きく、 $\tau_{xy} = q/t$  と単純に計算できるものではない。ただ腹部のみはほぼそれに近いと判断される。腹部に鋼材があると図に示すようにその位置でせん断流  $q$  は段差を生ずる。

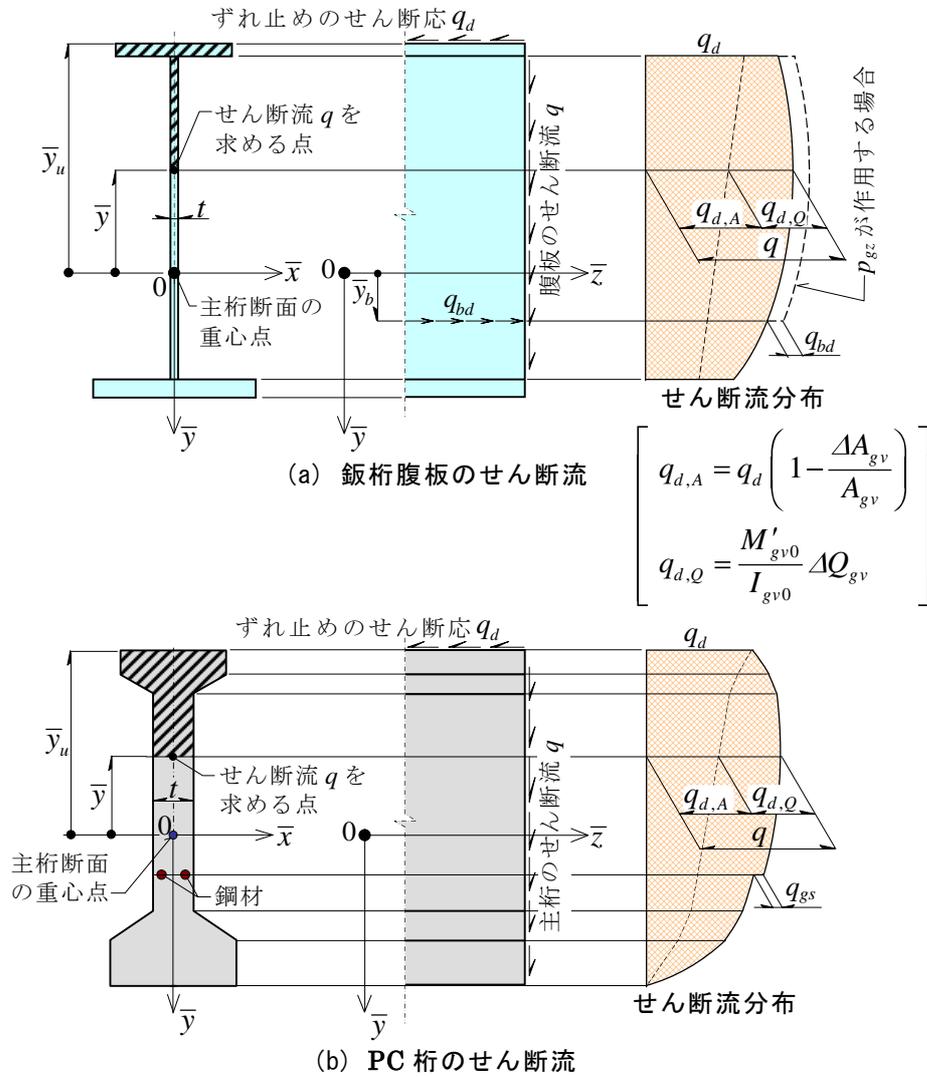


図-5 主桁のせん断流

### 3. 鋼材の付着力と細分化した分担せん断力

#### 3.1 床版における鋼材の付着力とせん断力の分離

床版断面上のコンクリート応力度  $\sigma_{fc}$  と鋼材応力度  $\sigma_{fr}$  は、次式で算定される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{fc} &= \frac{1}{n_f} \left( \frac{N_{fv}}{A_{fv}} + \frac{M_{fv0}}{I_{fv0}} \tilde{\eta} \right) = \frac{1}{n_f} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \tilde{y} \right) \\ \sigma_{fr} &= \frac{N_{fv}}{A_{fv}} + \frac{M_{fv0}}{I_{fv0}} \tilde{\eta} = \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \tilde{y} \end{aligned} \right\} \quad (3.1a,b)$$

ここに、 $\tilde{\eta}$  は、床版総断面の図心軸に原点を有する鉛直下向きの座標である。

$$\tilde{\eta} = \eta - e_{fv} \quad (3.2)$$

床版中の鋼材は、**図-6**に示すように幾つかの鋼材の集積から成り、その中の鋼材要素  $i$  の図心点の  $\tilde{\eta}$  座標を  $\tilde{\eta}_{fr,i}$ 、同  $\tilde{y}$  座標を  $\tilde{y}_{fr,i}$ 、断面積を  $A_{fr,i}$  と表す。このとき、床版中の鋼材  $i$  の付着力  $q_{fr,i}$  (鋼材の表面に作用するせん断応力を鋼材外周に亘り積分したものは、

$$q_{fr,i} = (A_{fr,i} \cdot \sigma_{fr,i})' = \left[ A_{fr,i} \left( \frac{N_{fv}}{A_{fv}} + \frac{M_{fv0}}{I_{fv0}} \tilde{\eta}_{fr,i} \right) \right]' = \left[ A_{fr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \tilde{y}_{fr,i} \right) \right]' \quad (3.3)$$

となる。 $q_{fr,i}$  はずれ止めのせん断応力  $q_d$  と同様に鋼材に沿うせん断応力であるが、今後とも付着力と呼称する。

鋼材の付着力の合力  $\hat{q}_{fr}$  は、総断面力を用いて次式で算定される。

$$\begin{aligned} \hat{q}_{fr} &= \sum_i q_{fr,i} = \sum_i \left[ A_{fr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \tilde{y}_{fr,i} \right) \right]' = \sum_i \left[ A_{fr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (\eta_{fr,i} - \eta_d - e_v) \right) \right]' \\ &= \left( \frac{A_{fr}}{A_v} \right)' N_v + \frac{A_{fr}}{A_v} N_v' + \left( \frac{J_{fr} - A_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{J_{fr} - A_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0}' \end{aligned} \quad (3.4)$$

床版のコンクリートと鋼材の水平方向のつり合いは、式(2.21a)と同様に、

$$N'_{fc} = -q_d - \hat{q}_{fr}, \quad N'_{fr} = \hat{q}_{fr} \quad (3.5a,b)$$

となるから(せん断応力と付着力の向きは**図-2**を参照されたい)、上式(3.5b)に式(2.9a)を代入しても式(3.4)と同じ結果を得る。

ずれ止めのせん断応力  $q_d$  と式(2.18)の分布外力  $p_{fz}$  はコンクリート要素に作用しているとし、式(2.18)を床版コンクリートと床版鋼材に対するものに置き換え、個々の鋼材の付着力はモーメント成分を持たないとするとき、

$$S_{fc} = M'_{fc} + q_d \eta_{fl} + \hat{m}_{fr} + p_{fz} \eta_p, \quad S_{fr} = M'_{fr} - \hat{m}_{fr} \quad (3.6a,b)$$

となる。ここに、式(2.5b)から、

$$M'_{fc} = \frac{1}{n_f} \left[ \left( \frac{J_{fc}}{A_v} \right)' N_v + \frac{J_{fc}}{A_v} N_v' + \left( \frac{I_{fc} - J_{fc}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{I_{fc} - J_{fc}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0}' \right] \quad (3.7a)$$

式(2.7b)から、

$$M'_{fr} = \left( \frac{J_{fr}}{A_v} \right)' N_v + \frac{J_{fr}}{A_v} N_v' + \left( \frac{I_{fr} - J_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{I_{fr} - J_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0}' \quad (3.7b)$$

また、鋼材の付着力のモーメント成分  $\hat{m}_{fr}$  は

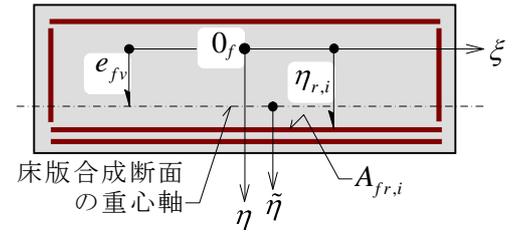


図-6 床版断面

$$\begin{aligned}
\hat{m}_{fr} &= \sum_i (q_{fr,i} \cdot \eta_{fr,i}) = \sum_i \left[ \left\{ A_{fr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (\eta_{fr,i} - \eta_d - e_v) \right) \right\}' \cdot \eta_{fr,i} \right] \\
&= \left( \frac{1}{A_v} \right)' J_{fr} \cdot N_v + \frac{J_{fr}}{A_v} N_v' + \left( \frac{1}{I_{v0}} \right)' [I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v)] M_{v0} + \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0}' \\
&\quad + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \sum_i \left[ A_{fr,i} (\eta_{fr,i} - \eta_d - e_v)' \eta_{fr,i} \right] + \sum_i \left[ \left\{ A_{fr,i}' \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (\eta_{fr,i} - \eta_d - e_v) \right) \right\} \cdot \eta_{fr,i} \right] \quad (3.8)
\end{aligned}$$

である。

ここで、床版の鋼材は基準線に平行に配置されていることを前提にして、

$$\eta'_{fr,i} = 0, \quad \frac{A'_{fr,i}}{A_{fr,i}} = \text{const} = c_f \quad (3.9a,b)$$

となる場合は、式(3.8)は

$$\begin{aligned}
\hat{m}_{fr} &= \left[ \left( \frac{1}{A_v} \right)' J_{fr} + c_f \frac{J_{fr}}{A_v} \right] \cdot N_v + \frac{J_{fr}}{A_v} N_v' + \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0}' \\
&\quad + \left[ \left( \frac{1}{I_{v0}} \right)' [I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v)] + c_f \cdot \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v)}{I_{v0}} - \frac{J_{fr}}{I_{v0}} e_v' \right] M_{v0} \quad (3.10)
\end{aligned}$$

となる。上式と式(3.7b)を式(3.6b)に代入すると、

$$S_{fr} = \frac{J'_{fr} - c_f J_{fr}}{A_v} N_v + \frac{[I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v)]' - c_f [I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v)] + J_{fr} e_v'}{I_{v0}} M_{v0} = \frac{J_{fr} e_v'}{I_{v0}} \cdot M_{v0} \quad (3.11)$$

となる。

一般的には式(3.6)に式(3.8)と式(2.5b)や式(2.7b)を代入して床版コンクリートと床版鋼材のせん断力を算定する。

### 3.2 主桁における鋼材の付着力とせん断力の分離

主桁断面上の応力度は、式(2.4)により算定される。改めて記すと、

$$\left. \begin{aligned}
\sigma_c &= \frac{1}{n_g} \left( \frac{N_{gv}}{A_{gv}} + \frac{M_{gv0}}{I_{gv0}} \bar{y} \right) = \frac{1}{n_g} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y - e_v) \right) \\
\sigma_s &= \frac{N_{gv}}{A_{gv}} + \frac{M_{gv0}}{I_{gv0}} \bar{y} = \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y - e_v)
\end{aligned} \right\} \quad (3.12a,b)$$

以下、鋼合成桁と PC 合成桁に分けて記述する。

#### 3.2.1 鋼合成桁の場合

ずれ止めのせん断応力  $q_d$  は鋼桁に作用しているとし、式(2.21)と(2.22)を鋼桁と主桁コンクリートブロックに対するものに置き換える。

式(2.21)から、

$$N'_{gs} = q_d + q_{bd}, \quad N'_{gc} = -q_{bd} - \hat{q}_{gr} + p_{gz}, \quad N'_{gr} = \hat{q}_{gr} \quad (3.13a\sim c)$$

式(2.22)から、

$$S_{gs} = M'_{gs} - q_d y_{gu} + q_{bd} y_b, \quad S_{gc} = M'_{gc} - q_{bd} y_b - \hat{q}_{gr} + p_{gz} y_p, \quad S_{gr} = M'_{gr} - \hat{m}_{gr} \quad (3.14 a\sim c)$$

ここに、ブロック中の個々の鋼材  $i$  の  $y$  座標を  $y_{r,i}$ 、コンクリート間の付着力を  $q_{gr,i}$  と表した。

また、個々の鋼材の付着力はモーメント成分を有しないものとした。

式(3.14a)と(2.14a)より、鋼桁のせん断力は次式で算定される。

$$S_{gs} = \left( \frac{J_{gs}}{A_v} \right)' N_v + \frac{J_{gs}}{A_v} N'_v + \left( \frac{I_{gs} - J_{gs} e_v}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{I_{gs} - J_{gs} e_v}{I_{v0}} M'_{v0} - q_d y_{gu} - q_{bd} y_b \quad (3.15)$$

また、式(2.10b)と(2.12b)から、

$$M'_{gc} = \frac{1}{n_g} \left[ \left( \frac{J_{gc}}{A_v} \right)' N_v + \frac{J_{gc}}{A_v} N'_v + \left( \frac{I_{gc} - J_{gc} e_v}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{I_{gc} - J_{gc} e_v}{I_{v0}} M'_{v0} \right] \quad (3.16a)$$

$$M'_{gr} = \frac{1}{n_g} \left[ \left( \frac{J_{gr}}{A_v} \right)' N_v + \frac{J_{gr}}{A_v} N'_v + \left( \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v}{I_{v0}} M'_{v0} \right] \quad (3.16b)$$

である。

ここで、鋼材  $i$  の断面積を  $A_{gr,i}$  と表すと、

$$q_{gr,i} = (A_{gr,i} \cdot \sigma_{gr,i})' = \left[ A_{gr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y_{gr,i} - e_v) \right) \right]' \quad (3.17)$$

である。この合力  $\hat{q}_{gr}$  は、次式となる。

$$\begin{aligned} \hat{q}_{gr} &= \sum_i q_{gr,i} = \sum_i (A_{gr,i} \cdot \sigma_{gr,i})' = \sum_i \left[ A_{gr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y_{gr,i} - e_v) \right) \right]' \\ &= \left( \frac{A_{gr}}{A_v} \right)' N_v + \frac{A_{gr}}{A_v} N'_v + \left( \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v}{I_{v0}} \right)' M_{v0} + \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v}{I_{v0}} M'_{v0} \end{aligned} \quad (3.18)$$

また、付着力のモーメント成分  $\hat{m}_{gr}$  は、

$$\begin{aligned} \hat{m}_{gr} &= \sum_i (q_{gr,i} y_{gr,i}) = \sum_i \left[ (A_{gr,i} \cdot \sigma_{gr,i})' y_{gr,i} \right] = \sum_i \left[ \left\{ A_{gr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y_{gr,i} - e_v) \right) \right\}' y_{gr,i} \right] \\ &= \left( \frac{1}{A_v} \right)' J_{gr} \cdot N_v + \frac{J_{gr}}{A_v} N'_v + \left( \frac{1}{I_{v0}} \right)' [I_{gr} - J_{gr} e_v] M_{v0} + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v}{I_{v0}} M'_{v0} \\ &\quad + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \sum_i \left[ A_{gr,i} (y_{r,i} - e_v)' y_{r,i} \right] + \sum_i \left[ \left\{ A'_{gr,i} \left( \frac{N_v}{A_v} + \frac{M_{v0}}{I_{v0}} (y_{r,i} - e_v) \right) \right\} \cdot y_{r,i} \right] \end{aligned} \quad (3.19)$$

となる。とくに主桁コンクリートブロックの位置が一定で、鋼材  $i$  に関して、

$$y'_{gr,i} = 0, \quad \frac{A'_{gr,i}}{A_{gr,i}} = const = c_g \quad (3.20a,b)$$

となる場合は、式(3.19)は、

$$\begin{aligned} \hat{m}_{gr} &= \left( \frac{1}{A_v} \right)' J_{gr} \cdot N_v + \frac{J_{gr}}{A_v} N'_v + \left[ \left( \frac{1}{I_{v0}} \right)' [I_{gr} - J_{gr} e_v] - \frac{J_{gr}}{I_{v0}} \cdot e'_v \right] M_{v0} + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v}{I_{v0}} M'_{v0} \\ &\quad + c_g \left( \frac{J_{gr}}{A_v} N_v + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v}{I_{v0}} \cdot \frac{M_{v0}}{I_{v0}} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

となる。上式と式(2.13b)を式(3.14c)に代入して次式を得る。

$$S_{gr} = \frac{J_{gr} e'_v}{I_{v0}} \cdot M_{v0} \quad (3.22)$$

一般的には、式(3.15)と(3.19)を式(3.13b,c)に代入してコンクリートブロックのコンクリートせん断力と鋼材せん断力を求める。

### 3.2.2 PC 桁の場合

ずれ止めのせん断応力  $q_d$  と式(2.18)の分布外力  $p_{gz}$  は主桁コンクリートに作用しているとし、式(2.22)を主桁コンクリートと主桁鋼材に対するものに置き換える。

$$\text{主桁コンクリートのせん断力 } S_{gc} = M'_{gc} - q_d y_{gu} - \hat{m}_{gr} + p_{gz} y_p \quad (3.23a)$$

$$\text{主桁鋼材のせん断力 } S_{gr} = M'_{gr} - \hat{m}_{gr} \quad (3.23b)$$

上式の  $\hat{m}_{gr}$  にも、前記の式(3.19)を適用すればよい。

#### 4. 自己つり合い系の断面力と変形

合成部材では、クリープ・乾燥収縮や床版と鋼桁の温度差によって内部で応力が再分配され、各断面構成要素の断面力は変化する。ただし静定系では、変形は生ずるものの、断面全体での断面力は0となる。これを、ここでは“自己つり合い系の応力の再分配”と呼称し、再分配された結果の分担断面力と合成部材の変形を扱う。

なお、以下では図-1(a)の鋼合成部材を対象として記述するが、図-1(b)のPC合成部材に対しては、以下の結果において次のように扱えばよい。

- ・鋼桁は考慮しないので、

$$A_{gs} \equiv J_{gs} \equiv I_{gs} \equiv 0 \quad (4.1a)$$

したがって、鋼桁の断面力は全て0と扱う。

- ・床版の断面力や分布水平力を除き、主桁側に作用するずれ止めのせん断応力において、

$$q_d^{(0)} \Rightarrow 0, \quad y_b \Rightarrow y_{gu}, \quad q_{bd}^{(0)} \Rightarrow -q_d^{(0)} \quad (4.1b)$$

と置き換える(肩付の(0)に関しては以下で説明する)。

- ・同時に、次のように添字  $bv$  を  $gv$  に置換える。

$$A_{bv} \Rightarrow A_{gv}, \quad J_{bv} \Rightarrow J_{gv}, \quad I_{bv} \Rightarrow I_{gv} \quad (4.1c)$$

##### 4.1 クリープ・乾燥収縮による応力

クリープ・乾燥収縮応力は、コンクリートの塑性的変形が拘束されることによって発生する応力である。前者では持続荷重によりクリープ変形が発生し、後者では乾燥収縮により変形が発生するという点で違いがあるものの、それらを拘束することによって応力が発生する仕組みは同じでコンクリートのクリープが関与する。

図-7に、自己つり合い系のクリープ・乾燥収縮応力の発生過程を示す。

##### (1) クリープ応力の発生過程

まず、図-7(1)のクリープ応力の発生過程を説明する。

##### (a) 初期応力状態

コンクリートのクリープ変形を誘起する持続応力(後死荷重応力)として、床版総断面の総断面力  $N_{fv}^{(0)}, M_{fv}^{(0)}, S_{fv}^{(0)}$  と主桁総断面の総断面力  $N_{gv}^{(0)}, M_{gv}^{(0)}, S_{gv}^{(0)}$  が作用した状態を示す。これを初期応力状態と呼び、断面力などの諸量の肩付に(0)を付けて表す。これを基準状態として以降の説明を行う。

##### (b) 拘束を受けないクリープ変形

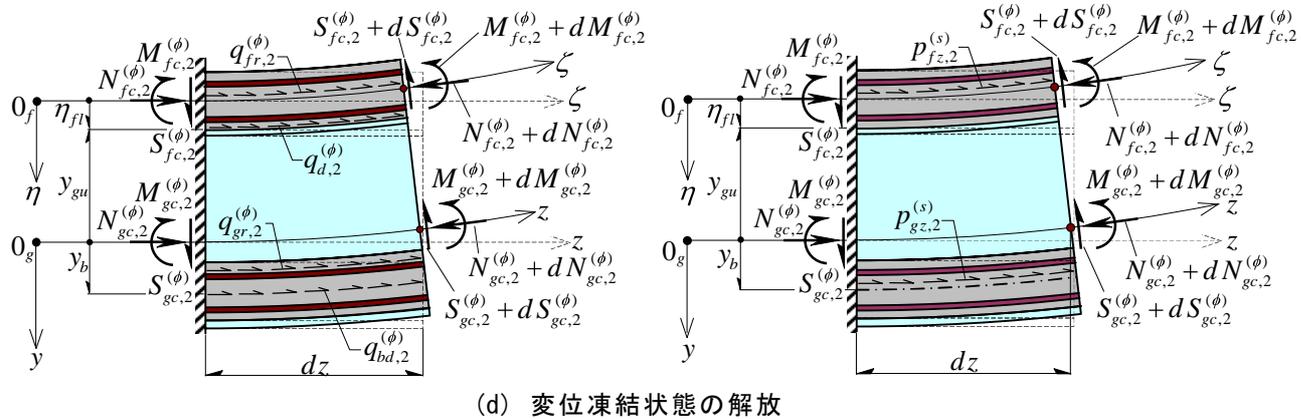
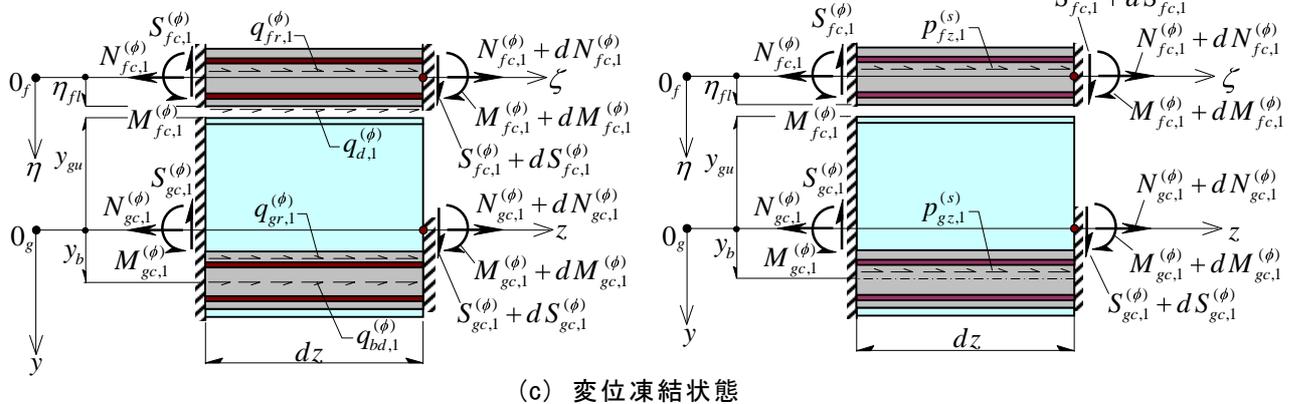
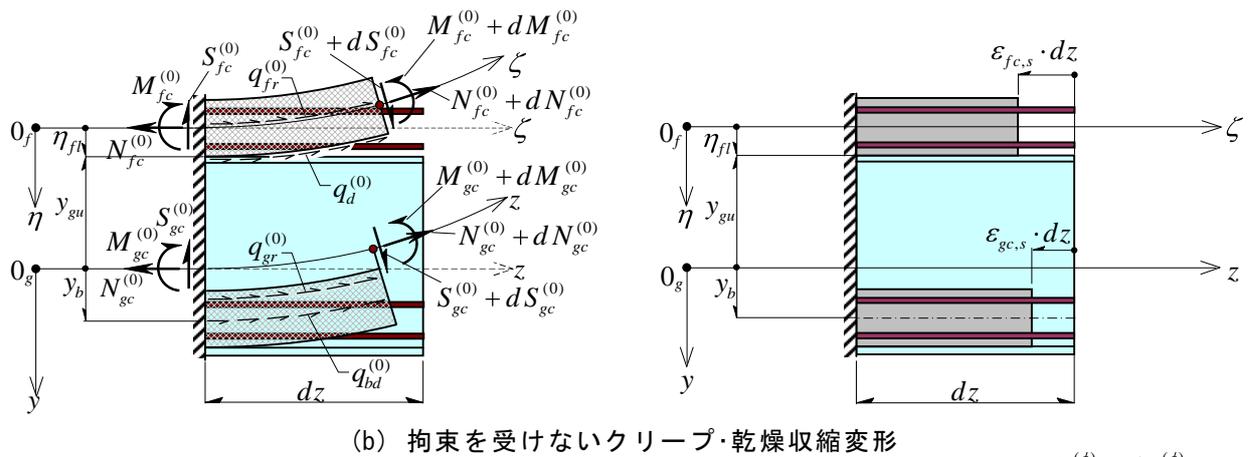
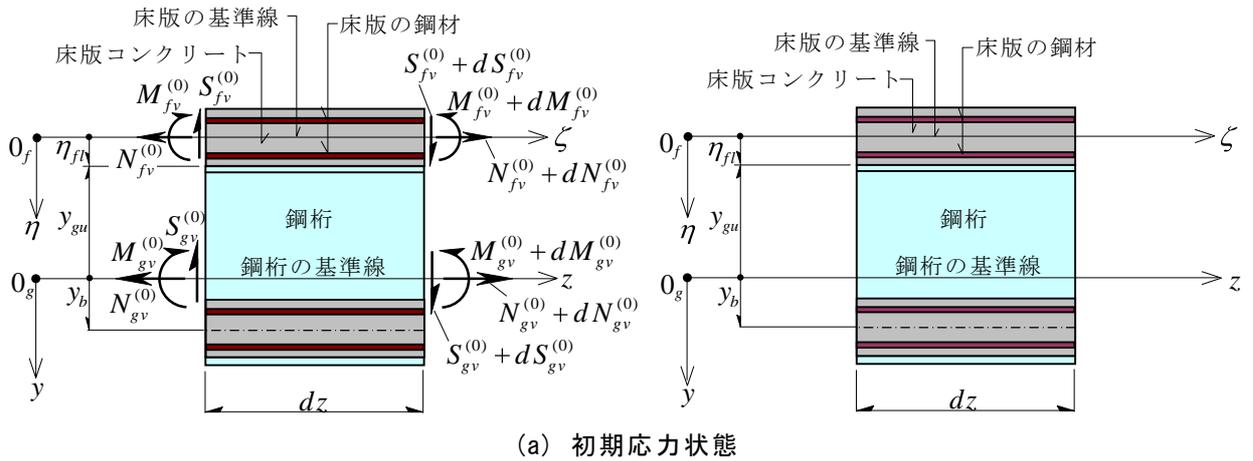
要素の左端を固定し、断面構成要素間の付着を切って、それらが完全に独立して変形しうるとしたときのクリープ変形を表している。床版のコンクリートのみが、コンクリート断面に働く初期断面力 ( $N_{fc}^{(0)}, M_{fc}^{(0)}, S_{fc}^{(0)}$  および  $N_{gc}^{(0)}, M_{gc}^{(0)}, S_{gc}^{(0)}$ ) によって自由な(拘束を受けない)クリープ変形を起こす。材齢  $t_0$  において発生した初期応力によるコンクリートのひずみを  $\varepsilon_c^{(0)}(t_0)$ 、材齢  $t_0 \rightarrow t$  間のクリープ係数を  $\phi(t, t_0)$  と表すとき、材齢  $t$  における自由なクリープひずみ  $\varepsilon_{c,\phi}(t, t_0)$  は、

$$\varepsilon_{c,\phi}(t, t_0) = \phi(t, t_0) \cdot \varepsilon_c^{(0)}(t_0) \quad (4.2a)$$

である。したがって、初期ひずみを含めた全ひずみは、

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_c^{(0)} + \varepsilon_{c,\phi}(t, t_0) = [1 + \phi(t, t_0)] \cdot \varepsilon_c^{(0)}(t_0) = \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \cdot \sigma_c^{(0)}(t_0) \quad (4.2b)$$

となる。なお、上の2式では添字  $f$  や  $g$  を省略して表記した。しばらく同様に表記する。



(1) クリープ応力の発生過程

(2) 乾燥収縮応力の発生過程

図-7 クリープ・乾燥収縮応力の発生過程

### (c) 変位凍結状態

上記の自由なクリープ変形を完全に拘束した状態である。式(4.2a)のクリープひずみを0に引き戻すためにクリープ応力  $\sigma_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0)$  が発生する(以降, 変位凍結状態で発生する応力等には下付に“1”を付けて表示する)。この間, クリープ応力に対してもクリープ変形が発生し, [クリープ応力の増加 → 増加クリープ応力に対するクリープ応力(反クリープ応力)の発生]という過程を繰り返す<sup>14)</sup>。このため, クリープ応力に対するクリープ係数は式(4.2b)より低減され,  $\sigma_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0)$  によるクリープひずみ  $\varepsilon_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0)$  を定義すれば, 式(4.2b)に対して次のようになる。

$$\varepsilon_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0) = \frac{1 + \rho \cdot \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \cdot \sigma_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0) = \frac{\sigma_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0)}{E_c^{(\phi)}(t_0)} \quad (4.3)$$

ここに,

$$E_c^{(\phi)}(t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \rho \cdot \phi(t, t_0)} \quad (4.4)$$

である。 $\rho$  は材齢係数と呼ばれ, 本来は  $\rho(t, t_0)$  と表記されるべきものであるが, 常に  $\phi(t, t_0)$  と組で用いられるので表記の簡略化のために  $(t, t_0)$  は省略されることが多い。ここでも以降は  $\rho$  の材齢表示を省略する。

式(4.2a)の自由なクリープひずみを0に引き戻すためのクリープ応力  $\sigma_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0)$  は, 式(4.3)の  $\varepsilon_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0)$  に式(4.2a)の  $\varepsilon_{c,\phi}(t, t_0)$  の負値を代入して, 次式で算定される。

$$\sigma_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0) = -\frac{\phi(t, t_0)}{1 + \rho \cdot \phi(t, t_0)} \cdot \sigma_c^{(0)}(t_0) \quad (4.5)$$

### (d) 変位凍結状態の解放

上記の変位凍結状態を解放することによって最終的な自己つり合い系のクリープ応力が求められる。具体的には, 右端の固定状態を外した図-7(d)のコンクリート断面に式(4.5)のクリープ応力によるコンクリート断面力と逆向きの断面力を作用させたときの合成部材要素の応力を求め, これと変位凍結状態の応力と加算したものが自己つり合い系のクリープ応力である。

## (2) 乾燥収縮応力の発生過程

次に, 図-7(2)の乾燥収縮応力の発生過程を説明する。

### (a) 初期応力状態

乾燥収縮を起こす前の状態であり, これを基準状態として以降の説明を行う。

### (b) 拘束を受けない乾燥収縮変形

要素の左端を固定し, 断面構成要素間の付着を切って, それらが完全に独立して変形しうるとしたときの乾燥収縮変形を表している。コンクリートのみが乾燥収縮により拘束を受けずに短縮する。このときのひずみを  $\varepsilon_{c,s}(t, t_0)$  と表す。いわゆる乾燥収縮度である。

### (c) 変位凍結状態

上記の自由な乾燥収縮変形を完全に拘束した状態である。ひずみ  $\varepsilon_{c,s}$  を引き戻すために, 式(4.3)を逆にして, 床版と主桁のコンクリートに次式の直応力  $\sigma_{c,1}^{(\phi)}$  が発生する。

$$\sigma_{c,1}^{(\phi)}(t, t_0) = -\frac{\bar{E}_{c,s}}{1 + \rho \cdot \phi(t, t_0)} \cdot \varepsilon_{c,s}(t, t_0) \quad (4.6)$$

ここに,  $\bar{E}_{c,s}$  は乾燥収縮計算に用いるコンクリートのヤング係数の基準値である。ちなみに Eurocode では  $t_0 = 1$  日としたときの値としている。ただし, 湿潤養生の終了時点とする考え方もあるようで, 乾燥収縮度の決め方によるのであろうか, これに関して著者らは不勉強である。

(d) 変位凍結状態の解放

先のクリープ応力の場合と記述内容は同じであるので説明を省略する。

4.1.1 鋼合成部材のクリープ・乾燥収縮応力と変形

以上に概要を記したクリープ・乾燥収縮応力の発生過程を、以下では断面力を以って具体的に記述していく。

(1) 変位凍結状態の断面力

1) クリープ応力において

変位凍結によって発生する応力は、式(4.5)から下記のようなものである。これらはコンクリート断面にのみ作用する。以下では、 $(t, t_0)$  などの材齢表示は省略するが、床版と主桁のコンクリートの基準強度および材齢は一般に異なるものとする。

・床版コンクリートにおいて

$$N_{fc,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f} \cdot N_{fc}^{(0)}, \quad M_{fc,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f} \cdot M_{fc}^{(0)}, \quad S_{fc,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f} \cdot S_{fc}^{(0)} \quad (4.7a\sim c)$$

・主桁コンクリートにおいて

$$N_{gc,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_g}{1+\rho\cdot\phi_g} \cdot N_{gc}^{(0)}, \quad M_{gc,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_g}{1+\rho\cdot\phi_g} \cdot M_{gc}^{(0)}, \quad S_{gc,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_g}{1+\rho\cdot\phi_g} \cdot S_{gc}^{(0)} \quad (4.8a\sim c)$$

ここに、 $\rho$  と  $\phi$  は常に対で用いられ、その属性は  $\phi$  で決まるので、 $\rho$  に関しては  $f$  や  $g$  の添字表記を省略した。

上記の断面力は要素内で変化するので、それに対応した次の分布水平力を付加しなければならない。

・床版ずれ止めのせん断応力  $q_{d,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f} \cdot q_d^{(0)} \quad (4.9)$

・床版鋼材の付着力

$$\hat{q}_{fr,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f} \cdot \hat{q}_{fr}^{(0)}, \quad \hat{m}_{fr,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f} \cdot \hat{m}_{fr}^{(0)} \quad (4.10a,b)$$

・主桁コンクリートのずれ止めのせん断応力  $q_{bd,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_g}{1+\rho\cdot\phi_g} \cdot q_{bd}^{(0)} \quad (4.11)$

・主桁コンクリート中の鋼材の付着力

$$\hat{q}_{gr,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_g}{1+\rho\cdot\phi_g} \cdot \hat{q}_{gr}^{(0)}, \quad \hat{m}_{gr,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_g}{1+\rho\cdot\phi_g} \cdot \hat{m}_{gr}^{(0)} \quad (4.12a,b)$$

なお、これまでのほとんどの合成桁の解説書では、ずれ止めの初期せん断応力  $q_d^{(0)}, q_{bd}^{(0)}$  と鋼材の初期付着力  $\hat{q}_{fr,i}^{(0)}, \hat{q}_{gr,i}^{(0)}$  は省略されている。これらの影響は小さく一般には問題にならないが、無視するとクリープ応力計算の結果において床版や主桁コンクリートブロックの軸力の変化量とずれ止めのせん断応力のつり合い(式(2.21))が微妙に成立しないことに気付くはずである。

2) 乾燥収縮応力において

式(4.6)から、

$$\left. \begin{aligned} N_{fc,1}^{(\phi)} &= \sigma_{fc,1}^{(\phi)} \cdot A_{fc} = -E_{fc,s}^{(\phi)} A_{fc} \cdot \varepsilon_{fc,s} = -\frac{N_{fc}^{(s)}}{1+\rho\cdot\phi_f} \\ M_{fc,1}^{(\phi)} &= \sigma_{fc,1}^{(\phi)} \cdot J_{fc} = -E_{fc,s}^{(\phi)} J_{fc} \cdot \varepsilon_{fc,s} = -\frac{M_{fc}^{(s)}}{1+\rho\cdot\phi_f} \end{aligned} \right\} \quad (4.13a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{gc,1}^{(\phi)} &= \sigma_{gc,1}^{(\phi)} \cdot A_{gc} = -E_{gc,s}^{(\phi)} A_{gc} \cdot \varepsilon_{gc,s} = -\frac{N_{gc}^{(s)}}{1 + \rho \cdot \phi_g} \\ M_{gc,1}^{(\phi)} &= \sigma_{gc,1}^{(\phi)} \cdot J_{gc} = -E_{gc,s}^{(\phi)} J_{gc} \cdot \varepsilon_{gc,s} = -\frac{M_{gc}^{(s)}}{1 + \rho \cdot \phi_g} \end{aligned} \right\} \quad (4.14a,b)$$

となる．ここに，乾燥収縮を扱う場合は，式(4.4)に対し，

$$E_{fc,s}^{(\phi)} = \frac{\bar{E}_{fc,s}}{1 + \rho \cdot \phi_f} \quad , \quad E_{gc,s}^{(\phi)} = \frac{\bar{E}_{gc,s}}{1 + \rho \cdot \phi_g} \quad (4.15a,b)$$

であり，

$$N_{fc}^{(s)} = \bar{E}_{fc,s} A_{fc} \cdot \varepsilon_{fc,s} \quad , \quad M_{fc}^{(s)} = \bar{E}_{fc,s} J_{fc} \cdot \varepsilon_{fc,s} \quad (4.16a,b)$$

$$N_{gc}^{(s)} = \bar{E}_{gc,s} A_{gc} \cdot \varepsilon_{gc,s} \quad , \quad M_{gc}^{(s)} = \bar{E}_{gc,s} J_{gc} \cdot \varepsilon_{gc,s} \quad (4.16c,d)$$

と表した．

コンクリート断面が変化すると、そこに作用する軸力も変化するので、つり合い上、分布水平力が存在する．式(2.21)をコンクリートに適用して、

$$\hat{p}_{fz,1}^{(\phi)} = -N_{fc,1}^{(\phi)'} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} N_{fc}^{(s)'} \quad , \quad \hat{p}_{gz,1}^{(\phi)} = -N_{gc,1}^{(\phi)'} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} N_{gc}^{(s)'} \quad (4.17a,b)$$

であり，これらはコンクリート断面の図心位置に作用する水平分布力である．

このとき，式(3.6a)と(3.14b)と同様にして，

$$\left. \begin{aligned} S_{fc,1}^{(\phi)} &= M_{fc,1}^{(\phi)'} + \hat{p}_{fz,1}^{(\phi)} \cdot e_{fc} = -E_{fc,s}^{(\phi)} (J'_{fc} - A'_{fc} \cdot e_{fc}) \cdot \varepsilon_{fc,s} = -\frac{S_{fc}^{(s)}}{1 + \rho \cdot \phi_f} \\ S_{gc,1}^{(\phi)} &= M_{gc,1}^{(\phi)'} + \hat{p}_{gz,1}^{(\phi)} \cdot e_{gc} = -E_{gc,s}^{(\phi)} (J'_{gc} - A'_{gc} \cdot e_{gc}) \cdot \varepsilon_{gc,s} = -\frac{S_{gc}^{(s)}}{1 + \rho \cdot \phi_g} \end{aligned} \right\} \quad (4.18a,b)$$

となる．ここに，

$$S_{fc}^{(s)} = \bar{E}_{fc,s} (J'_{fc} - A'_{fc} \cdot e_{fc}) \cdot \varepsilon_{fc,s} \quad , \quad S_{gc}^{(s)} = \bar{E}_{gc,s} (J'_{gc} - A'_{gc} \cdot e_{gc}) \cdot \varepsilon_{gc,s} \quad (4.19a,b)$$

## (2) 変位凍結状態の解放による断面力

上記の変位凍結状態の断面力や分布水平力を解放することによって総断面に以下の断面力(下付に“2”を付けて表示する)が発生する．

### 1) クリープ応力において

式(2.19)と式(2.20)に式(4.7), (4.8)と異符号の断面力を与えればよい．

$$\left. \begin{aligned} N_{v,2}^{(\phi)} &= \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot N_{fc}^{(0)} + \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot N_{gc}^{(0)} \\ M_{v,2}^{(\phi)} &= \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot (M_{fc}^{(0)} - N_{fc}^{(0)} \cdot \eta_d) + \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot M_{gc}^{(0)} \\ S_{v,2}^{(\phi)} &= \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot S_{fc}^{(0)} + \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot S_{gc}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (4.20a\sim c)$$

また分布水平力も，式(4.9)～(4.12)と逆向きに作用させる．

$$q_{d,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot q_d^{(0)} \quad (4.21)$$

$$\hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot \hat{q}_{fr}^{(0)} \quad , \quad \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot \hat{m}_{fr}^{(0)} \quad (4.22a,b)$$

$$q_{bd,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot q_{bd}^{(0)} \quad (4.23)$$

$$\hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot \hat{q}_{gr}^{(0)}, \quad \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot \hat{m}_{gr}^{(0)} \quad (4.24a,b)$$

このときの全体総断面の図心軸に関する曲げモーメントは、

$$M_{v,0,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot \left[ M_{fc}^{(0)} - N_{fc}^{(0)} \cdot (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right] + \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot \left[ M_{gc}^{(0)} - N_{gc}^{(0)} \cdot e_v^{(\phi)} \right] \quad (4.25)$$

である．ここに  $e_v^{(\phi)}$  は、式(1.7)の  $n_f$  と式(1.16)の  $n_g$  の代わりに、下記の  $n_f^{(\phi)}$  と  $n_g^{(\phi)}$  を用いて式(1.22a)から算定した総断面の図心軸の偏心である．

$$n_f^{(\phi)} = \frac{1 + \rho \cdot \phi_f}{E_{fc}} \cdot E_s, \quad n_g^{(\phi)} = \frac{1 + \rho \cdot \phi_g}{E_{gc}} \cdot E_s \quad (4.26)$$

以下、肩付きに  $(\phi)$  を付けた断面定数は全てこのように算出する．

## 2) 乾燥収縮応力において

クリープ応力の場合と同様に、

$$\left. \begin{aligned} N_{v,2}^{(\phi)} &= -N_{fc,1}^{(\phi)} - N_{gc,1}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot N_{fc}^{(s)} + \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot N_{gc}^{(s)} \\ M_{v,2}^{(\phi)} &= -M_{fc,1}^{(\phi)} + N_{fc,1}^{(\phi)} \cdot \eta_d - M_{gc,1}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot (M_{fc}^{(s)} - N_{fc}^{(s)} \cdot \eta_d) + \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot M_{gc}^{(s)} \\ S_{v,2}^{(\phi)} &= -S_{fc,1}^{(\phi)} - S_{gc,1}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot S_{fc}^{(s)} + \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot S_{gc}^{(s)} \end{aligned} \right\} \quad (4.27a\sim c)$$

$$\hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} = -\hat{p}_{fz,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} N_{fc}^{(s)'}, \quad \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} = -\hat{p}_{gz,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} N_{gc}^{(s)'} \quad (4.28)$$

このときの全体総断面の図心軸に関する曲げモーメントは、

$$\begin{aligned} M_{v,0,2}^{(\phi)} &= M_{v,2}^{(\phi)} - N_{v,2}^{(\phi)} \cdot e_v^{(\phi)} \\ &= \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot \left[ M_{fc}^{(s)} - N_{fc}^{(s)} \cdot (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right] + \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot \left[ M_{gc}^{(s)} - N_{gc}^{(s)} \cdot e_v^{(\phi)} \right] \end{aligned} \quad (4.29)$$

## (3) 変位凍結状態とその解放による断面力の和

分担断面力の計算においては、変位凍結状態(下付き“1”)とその解放によるもの(下付き“2”)を加算しなければならない．

それを以下に記していくが、その殆どはクリープと乾燥収縮で共通の式になり、図-7に記入した分布水平力関係が異なるだけである．そのため、クリープ応力と乾燥収縮応力を加算した形で記述するので、

$$\begin{aligned} \cdot \text{クリープ応力の場合、} & \begin{cases} \hat{p}_{fz,1}^{(\phi)} = \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} = 0 \\ \hat{p}_{gz,1}^{(\phi)} = \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} = 0 \end{cases} \\ \cdot \text{乾燥収縮応力の場合、} & \begin{cases} q_d^{(0)} = q_{d,1}^{(\phi)} = q_{d,2}^{(\phi)} = 0 \\ \hat{q}_{fr}^{(0)} = \hat{q}_{fr,1}^{(\phi)} = \hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} = \hat{m}_{fr,1}^{(\phi)} = \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} = 0 \\ \hat{q}_{gr}^{(0)} = \hat{q}_{gr,1}^{(\phi)} = \hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} = \hat{m}_{gr,1}^{(\phi)} = \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)} = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

と扱っていただきたい．

まず式(2.5),(2.7)から、

$$\left. \begin{aligned} N_{fc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{A_{fc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{fc} - A_{fc} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\ M_{fc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{J_{fc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{fc} - J_{fc} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \end{aligned} \right\} \quad (4.30a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{fr}^{(\phi)} &= \frac{A_{fr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{fr} - A_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \\ M_{fr}^{(\phi)} &= \frac{J_{fr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \end{aligned} \right\} \quad (4.31a,b)$$

したがって、

$$\left. \begin{aligned} N_{fv}^{(\phi)} &= N_{fc}^{(\phi)} + N_{fr}^{(\phi)} = \frac{A_{fv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{fv}^{(\phi)} - A_{fv}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\ M_{fv}^{(\phi)} &= M_{fc}^{(\phi)} + M_{fr}^{(\phi)} = \frac{J_{fv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{fv}^{(\phi)} - J_{fv}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \end{aligned} \right\} \quad (4.32a,b)$$

$$M_{fv0}^{(\phi)} = M_{fv}^{(\phi)} - N_{fv}^{(\phi)} \cdot e_v^{(\phi)} \quad (4.33)$$

また、式(2.11),(2.13),(2.15)から、

$$\left. \begin{aligned} N_{gc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{A_{gc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gc} - A_{gc} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\ M_{gc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{J_{gc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gc} - J_{gc} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \end{aligned} \right\} \quad (4.34a,b)$$

$$N_{gr}^{(\phi)} = \frac{A_{gr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)}, \quad M_{gr}^{(\phi)} = \frac{J_{gr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \quad (4.35a,b)$$

$$N_{gs}^{(\phi)} = \frac{A_{gs}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gs} - A_{gs} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)}, \quad M_{gs}^{(\phi)} = \frac{J_{gs}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gs} - J_{gs} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \quad (4.36a,b)$$

したがって、

$$\left. \begin{aligned} N_{gv}^{(\phi)} &= N_{gc}^{(\phi)} + N_{gr}^{(\phi)} + N_{gs}^{(\phi)} = \frac{A_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gv}^{(\phi)} - A_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\ M_{gv}^{(\phi)} &= M_{gc}^{(\phi)} + M_{gr}^{(\phi)} + M_{gs}^{(\phi)} = \frac{J_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gv}^{(\phi)} - J_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \\ M_{gv0}^{(\phi)} &= M_{gv}^{(\phi)} - N_{gv}^{(\phi)} \cdot e_v^{(\phi)} \end{aligned} \right\} \quad (4.37a,b)$$

床版総断面と主桁総断面のせん断力は、式(2.23)から、

$$\begin{aligned} S_{fv}^{(\phi)} &= \left( \frac{J_{fv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \left( \frac{J_{fv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right) N_{v,2}^{(\phi)'} + \left( \frac{I_{fv}^{(\phi)} - J_{fv}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} \right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \frac{I_{fv}^{(\phi)} - J_{fv}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \\ &\quad + (q_d^{(\phi)} + q_{d,2}^{(\phi)}) \eta_{fl} + \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} + p_{fz,2}^{(\phi)} \cdot e_{fc} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f S_{fc}^{(0)} + S_{fc}^{(s)}) \end{aligned} \quad (4.39a)$$

$$\begin{aligned} S_{gv}^{(\phi)} &= \left( \frac{J_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \left( \frac{J_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right) N_{v,2}^{(\phi)'} + \left( \frac{I_{gv}^{(\phi)} - J_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gv}^{(\phi)} - J_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \\ &\quad - q_d^{(\phi)} y_{gu} + q_{bd,2}^{(\phi)} y_b + \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)} + \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} \cdot e_{gc} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g S_{gc}^{(0)} + S_{gc}^{(s)}) \end{aligned} \quad (4.39b)$$

ここに、ずれ止めのせん断応力は、式(2.24)から、床版の断面定数を用いて表示すると、

$$q_d^{(\phi)} = -\left(\frac{A_{fv}}{A_v^{(\phi)}}\right)' N_{v,2}^{(\phi)} - \left(\frac{A_{fv}}{A_v^{(\phi)}}\right) N_{v,2}^{(\phi)'} - \left(\frac{J_{fv} - A_{fv} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}}\right)' M_{v0,2}^{(\phi)} - \left(\frac{J_{fv} - A_{fv} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}}\right) M_{v0,2}^{(\phi)'} - q_{d,2}^{(\phi)} - \hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} - \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} \quad (4.40a)$$

となる。上式は PC 合成部材においても有効である。

一方、主桁の断面定数を用いると、

$$q_d^{(\phi)} = \left(\frac{A_{gv}}{A_v^{(\phi)}}\right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \left(\frac{A_{gv}}{A_v^{(\phi)}}\right) N_{v,2}^{(\phi)'} + \left(\frac{J_{gv} - A_{gv} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}}\right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \left(\frac{J_{gv} - A_{gv} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}}\right) M_{v0,2}^{(\phi)'} + q_{bd,2}^{(\phi)} + \hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} + \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} \quad (4.40b)$$

となる。この式(4.38b)はPC合成部材に対しては無効であり、主桁側から算定する場合は式(4.1b)の規約を以って後の式(4.47)により算定する。

以上における  $N_{v,2}^{(\phi)'}$  や  $M_{v0,2}^{(\phi)'}$  は、式(2.25)から、

$$\left. \begin{aligned} N_{v,2}^{(\phi)'} &= -q_{d,2}^{(\phi)} - q_{bd,2}^{(\phi)} - \hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} - \hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} - \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} - \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} \\ M_{v0,2}^{(\phi)'} &= S_{v,2}^{(\phi)} - N_{v,2}^{(\phi)} \cdot e_v^{(\phi)'} + q_{d,2}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)} - \eta_{fl}) - \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} + \hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} \cdot (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \\ &\quad - q_{bd,2}^{(\phi)} (y_b - e_v^{(\phi)}) - \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)} + \hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} \cdot e_v^{(\phi)} + \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)} - e_{fc}) - \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} (e_{gc} - e_v^{(\phi)}) \end{aligned} \right\} \quad (4.41a,b)$$

である。

次に更にコンクリートと鋼材類にせん断力関係を分解する。まず床版コンクリートと鋼材のせん断力は、式(3.6a,b)から、

$$\left. \begin{aligned} S_{fc}^{(\phi)} &= M_{fc,2}^{(\phi)'} + (q_d^{(\phi)} + q_{d,2}^{(\phi)}) \cdot \eta_{fl} + \hat{m}_{fr}^{(\phi)} + \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} + \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} \cdot e_{fc} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f S_{fc}^{(0)} + S_{fc}^{(s)}) \\ S_{fr}^{(\phi)} &= M_{fr,2}^{(\phi)'} - \hat{m}_{fr}^{(\phi)} \end{aligned} \right\} \quad (4.42a,b)$$

ここに、式(3.7)から、

$$M_{fc,2}^{(\phi)'} = \frac{1}{n_f^{(\phi)}} \left[ \left(\frac{J_{fc}}{A_v^{(\phi)}}\right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \left(\frac{I_{fc} - J_{fc} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}}\right)' M_{v0,2}^{(\phi)} \right] + \frac{1}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{J_{fc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \frac{I_{fc} - J_{fc} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \right) \quad (4.43a)$$

$$M_{fr,2}^{(\phi)'} = \left(\frac{J_{fr}}{A_v^{(\phi)}}\right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \left(\frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}}\right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \left(\frac{J_{fr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \right) \quad (4.43b)$$

また、式(3.4)から、

$$\hat{m}_{fr}^{(\phi)} = \left(\frac{A_{fr}}{A_v^{(\phi)}}\right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{A_{fr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \left(\frac{J_{fr} - A_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}}\right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \frac{J_{fr} - A_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \quad (4.44a)$$

式(3.9)を前提として、式(3.10)から、

$$\begin{aligned} \hat{m}_{fr}^{(\phi)} = & \left[ \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} \right)' J_{fr} + c_f \frac{J_{fr}}{A_v^{(\phi)}} \right] \cdot N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{fr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \\ & + \left[ \left( \frac{1}{I_{v0}^{(\phi)}} \right)' \left[ I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right] + c_f \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} - \frac{J_{fr}}{I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)'} \right] M_{v0,2}^{(\phi)} \end{aligned} \quad (4.44b)$$

となる．この場合，式(4.42b)は次のように簡略化される．

$$S_{fr}^{(\phi)} = \frac{J_{fr} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0}^{(\phi)} \quad (4.45)$$

続いて主桁の分担せん断力を記述する．まず鋼桁のせん断力は，式(3.15)から，

$$S_{gs}^{(\phi)} = \left( \frac{J_{gs}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gs}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \left( \frac{I_{gs}^{(\phi)} - J_{gs}^{(\phi)} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) M_{v0,2}^{(\phi)'} + \frac{I_{gs}^{(\phi)} - J_{gs}^{(\phi)} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - q_d^{(\phi)} y_{gu} - q_{bd}^{(\phi)} y_b \quad (4.46)$$

ここに，式(2.32)から，

$$q_{bd}^{(\phi)} = - \left( \frac{A_{bv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} - \frac{A_{bv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} - \left( \frac{J_{bv}^{(\phi)} - A_{bv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{J_{bv}^{(\phi)} - A_{bv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} - q_{bd,2}^{(\phi)} - q_{gr,2}^{(\phi)} \quad (4.47)$$

また，主桁のコンクリートと鋼材のせん断力は，式(3.14b,c)から，

$$\left. \begin{aligned} S_{gc}^{(\phi)} &= M_{gc,2}^{(\phi)'} - (q_{bd}^{(\phi)} + q_{bd,2}^{(\phi)}) \cdot y_{gu} - (\hat{m}_{gr}^{(\phi)} + \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)}) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g S_{gc}^{(0)} + S_{gc}^{(s)}) \\ S_{gr}^{(\phi)} &= M_{gr,2}^{(\phi)'} - \hat{m}_{gr}^{(\phi)} \end{aligned} \right\} \quad (4.48a,b)$$

ここに，式(3.18)と(3.19)から，

$$\sum_i (q_{gr,i}^{(\phi)}) = \left( \frac{A_{gr}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{A_{gr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \left( \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) M_{v0,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \quad (4.49a)$$

$$\begin{aligned} \sum_i (q_{gr,i}^{(\phi)} y_{gr,i}) &= \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} \right)' J_{gr} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} + \left[ \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v^{(\phi)'}}{I_{v0}^{(\phi)'}} - \frac{J_{gr}}{I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)'} \right] M_{v0,2}^{(\phi)} \\ &+ \frac{\sum_i (A_{gr,i} y'_{r,i} y_{r,i})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} + \sum_i \left[ \left\{ A'_{gr,i} \left( \frac{N_{v,2}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} (y_{r,i} - e_v) \right) \right\} \cdot y_{r,i} \right] \end{aligned} \quad (4.49b)$$

#### (4) 自己つり合い系のクリープ応力に伴う変形

以上の自己つり合い系のクリープ応力によって合成部材に変形が発生する．その変形は， $N_{v,2}^{(\phi)}$ と $M_{v0,2}^{(\phi)}$ によって誘起される．これらの断面力による鋼桁断面上の応力度とひずみは，

$$\sigma_s^{(\phi)} = \frac{N_{v,2}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{I_v^{(\phi)}} \cdot \tilde{y}^{(\phi)} = \frac{N_{v,2}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{I_v^{(\phi)}} \cdot (y - e_v^{(\phi)}) \quad (4.50a)$$

$$\varepsilon_s^{(\phi)} = \frac{N_{v,2}^{(\phi)}}{E_s A_v^{(\phi)}} + \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{E_s I_v^{(\phi)}} \cdot \tilde{y}^{(\phi)} = \frac{N_{v,2}^{(\phi)}}{E_s A_v^{(\phi)}} + \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{E_s I_v^{(\phi)}} \cdot (y - e_v^{(\phi)}) \quad (4.50b)$$

であるから，総断面の図心 ( $y = e_v^{(\phi)}$ ) 上での軸方向ひずみ  $\tilde{\varepsilon}_0^{(\phi)}$  と曲率  $\tilde{\kappa}_0^{(\phi)}$  は，

$$\tilde{\varepsilon}_0^{(\phi)} = \frac{N_{v,2}^{(\phi)}}{E_s A_v^{(\phi)}} \quad , \quad \tilde{\kappa}_0^{(\phi)} = \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{E_s I_v^{(\phi)}} \quad (4.51a,b)$$

である．鋼桁の基準線上での軸方向ひずみ  $\varepsilon_0^{(\phi)}$  と曲率  $\kappa_0^{(\phi)}$  は，

$$\varepsilon_0^{(\phi)} = \frac{N_{v,2}^{(\phi)}}{E_s A_v^{(\phi)}} - \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{E_s I_v^{(\phi)}} \cdot e_v^{(\phi)} \quad , \quad \kappa_0^{(\phi)} = \frac{M_{v0,2}^{(\phi)}}{E_s I_v^{(\phi)}} = \tilde{\kappa}_0^{(\phi)} \quad (4.52a,b)$$

となる。

不静定構造の場合は、式(4.51)を弾性荷重として静定基本形に作用させ、変形の適合条件により不静定反力を求めればよい。あるいは、温度変化や梁の上下縁の温度差が組み込まれている骨組解析プログラムでは上記の変形と等価な温度変化や温度差に変換して不静定反力を求めることができる。

このとき、式(4.7)右辺の  $M_{fc}^{(0)}, N_{fc}^{(0)}$  や  $M_{gc}^{(0)}, N_{gc}^{(0)}$  を次のように補間するとよい。

$$\left. \begin{aligned} N_{fc}^{(0)} &= N_{fc}^{(0)}(\mu=0) \cdot g_1 + N_{fc}^{(0)'}(\mu=0) \cdot g_2 + N_{fc}^{(0)}(\mu=1) \cdot g_3 + N_{fc}^{(0)'}(\mu=1) \cdot g_4 \\ M_{fc}^{(0)} &= M_{fc}^{(0)}(\mu=0) \cdot g_1 + M_{fc}^{(0)'}(\mu=0) \cdot g_2 + M_{fc}^{(0)}(\mu=1) \cdot g_3 + M_{fc}^{(0)'}(\mu=1) \cdot g_4 \end{aligned} \right\} \quad (4.53a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{gc}^{(0)} &= N_{gc}^{(0)}(\mu=0) \cdot g_1 + N_{gc}^{(0)'}(\mu=0) \cdot g_2 + N_{gc}^{(0)}(\mu=1) \cdot g_3 + N_{gc}^{(0)'}(\mu=1) \cdot g_4 \\ M_{gc}^{(0)} &= M_{gc}^{(0)}(\mu=0) \cdot g_1 + M_{gc}^{(0)'}(\mu=0) \cdot g_2 + M_{gc}^{(0)}(\mu=1) \cdot g_3 + M_{gc}^{(0)'}(\mu=1) \cdot g_4 \end{aligned} \right\} \quad (4.54a,b)$$

ここに、部材要素両端の  $z$  座標を  $z_1, z_2$  とするとき、

$$\ell = z_2 - z_1, \quad \mu = (z - z_1) / \ell \quad (4.55a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= 1 - 3\mu^2 + 2\mu^3, & g_2 &= (\mu - 2\mu^2 + \mu^3) \cdot \ell \\ g_3 &= 3\mu^2 - 2\mu^3, & g_4 &= (-\mu^2 + \mu^3) \cdot \ell \end{aligned} \right\} \quad (4.56a\sim d)$$

であり、

$N_{fc}^{(0)}(\mu=0), N_{fc}^{(0)}(\mu=1)$  : 部材両端における床版コンクリート断面の軸力

$N_{fc}^{(0)'}(\mu=0), N_{fc}^{(0)'}(\mu=1)$  : 部材両端における上記の軸力の微分値

$M_{fc}^{(0)}(\mu=0), M_{fc}^{(0)}(\mu=1)$  : 部材両端における上記断面の曲げモーメント

$M_{fc}^{(0)'}(\mu=0), M_{fc}^{(0)'}(\mu=1)$  : 部材両端における上記の曲げモーメントの微分値

$N_{gc}^{(0)}(\mu=0), N_{gc}^{(0)}(\mu=1)$  : 部材両端における下段ブロック・コンクリート断面の軸力

$N_{gc}^{(0)'}(\mu=0), N_{gc}^{(0)'}(\mu=1)$  : 部材両端における上記の軸力の微分値

$M_{gc}^{(0)}(\mu=0), M_{gc}^{(0)}(\mu=1)$  : 部材両端における上記断面の曲げモーメント

$M_{gc}^{(0)'}(\mu=0), M_{gc}^{(0)'}(\mu=1)$  : 部材両端における上記の曲げモーメントの微分値

である。これらの値は式(2.5),(2.11),(3.5a),(3.16a)から算出する。

剛性方程式を求める場合にも、式(4.52)を用いて仮想仕事の原理により等価節点力を算出すればよい。

## 4.2 床版と主桁間の温度差

乾燥収縮の場合はコンクリートのみが変形する問題であったが、床版と主桁間での温度差に関しては主桁に対して床版のコンクリートと鋼材が同時に相対的な変形差を発生する問題である。したがって、温度差による自己つり合い系の応力の再分配と変形は先の乾燥収縮の式がほとんど使えるので、以下では異なる個所のみ記述する。

### (1) 変位凍結状態の断面力

主桁に対して床版が相対的な温度差  $t_p$  を生じたとする。床版の線膨張係数を  $\alpha$  とするとき、拘束が受けなければ、床版には次の温度ひずみが発生する。

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot t_p \quad (4.57)$$

この床版の変形を完全に拘束したとすると床版構成要素には次の境界力と分布水平力が発生する。

- ・床版コンクリートと床版鋼材の断面力

式(4.13),(4.18)と同様に、

$$N_{fc,1}^{(t)} = -E_{fc} A_{fc} \cdot \varepsilon_t, \quad M_{fc,1}^{(t)} = -E_{fc} J_{fc} \cdot \varepsilon_t, \quad S_{fc,1}^{(t)} = -E_{fc} (J'_{fc} - A'_{fc} \cdot e_{fc}) \cdot \varepsilon_t \quad (4.58a\sim c)$$

$$N_{fr,1}^{(t)} = -E_s A_{fr} \cdot \varepsilon_t, \quad M_{fr,1}^{(t)} = -E_s J_{fr} \cdot \varepsilon_t, \quad S_{fr,1}^{(t)} = -E_s (J'_{fr} - A'_{fr} \cdot e_{fr}) \cdot \varepsilon_t \quad (4.59a\sim c)$$

- ・床版総断面の断面力

$$\left. \begin{aligned} N_{fv,1}^{(t)} &= N_{fc,1}^{(t)} + N_{fr,1}^{(t)} = -(E_c A_{fc} + E_s A_{fr}) \cdot \varepsilon_t = -E_s A_{fv} \cdot \varepsilon_t \\ M_{fv,1}^{(t)} &= M_{fc,1}^{(t)} + M_{fr,1}^{(t)} = -(E_c J_{fc} + E_s J_{fr}) \cdot \varepsilon_t = -E_s J_{fv} \cdot \varepsilon_t \\ S_{fv,1}^{(t)} &= -\left[ E_c (J'_{fc} - A'_{fc} \cdot e_{fc}) + E_s (J'_{fr} - A'_{fr} \cdot e_{fr}) \right] \cdot \varepsilon_t = -c_f \cdot E_s (J'_{fv} - A_{fv} \cdot e_{fv}) \cdot \varepsilon_t \end{aligned} \right\} \quad (4.60a\sim c)$$

ここに、式(4.60c)では、

$$\eta'_{fr,i} = 0, \quad \frac{A'_{fc}}{A_{fc}} = \frac{A'_{fr,i}}{A_{fr,i}} = \text{const} = c_f \quad (4.61a,b)$$

であることを前提とした。

また床版断面が変化すると、それにつり合う軸方向分布力が作用しなければならない。すなわち、式(2.14a)から、

$$\left. \begin{aligned} \text{床版コンクリートに対し } q_{fzc,1}^{(t)} &= -N_{fc,1}^{(t)'} = E_{fc} A'_{fc} \cdot \varepsilon_t \\ \text{床版鋼材に対し } q_{fzr,1}^{(t)} &= -N_{fr,1}^{(t)'} = E_s A'_{fr} \cdot \varepsilon_t \end{aligned} \right\} \quad (4.62 a,b)$$

であり、それぞれコンクリート断面と鋼材断面の重心に作用する。

## (2) 変位凍結状態の解放による断面力

上記の変位凍結状態の断面力を解放する。すなわち、次の断面力や分布水平力を、変位凍結状態を解放した系に与える。

$$\left. \begin{aligned} N_{v,2}^{(t)} &= -N_{fv,1}^{(t)} = E_s A_{fv} \cdot \varepsilon_t \\ M_{v,2}^{(t)} &= -M_{fv,1}^{(t)} + N_{fv,1}^{(t)} \cdot \eta_d = E_s (J_{fv} - A_{fv} \eta_d) \cdot \varepsilon_t \\ S_{v,2}^{(t)} &= -S_{fv,1}^{(t)} = E_s (J'_{fv} - A'_{fv} \cdot e_{fv}) \cdot \varepsilon_t \end{aligned} \right\} \quad (4.63a\sim c)$$

$$q_{fzv,2}^{(t)} = -(q_{fzc,1}^{(t)} + q_{fzr,1}^{(t)}) = -E_s A'_{fv} \cdot \varepsilon_t \quad (4.64)$$

このときの全体総断面の図心軸に関する曲げモーメントは、

$$M_{v,0,2}^{(t)} = M_{v,2}^{(t)} - N_{v,2}^{(t)} \cdot e_v = E_s [J_{fv} - A_{fv} (\eta_d + e_v)] \cdot \varepsilon_t \quad (4.65)$$

## (3) 温度差による断面力の和

乾燥収縮に対する式(4.30),(4.33),(4.34),(4.36)~(4.38),(4.39),(4.43)~(4.49)は、以下の置き換えによって温度差応力に適用できる。

- 断面力や分布水平力の肩付の $(\phi)$ を $(t)$ に置き換える。
- 温度差は短期荷重であるので、断面定数やヤング係数比の肩付の $(\phi)$ を削除する。すなわちこれらは1章で定義したものに置き換える。
- 上記の置き換えを行った上で、次の境界力や分布水平力を零と置く。

$$M_{gc,1}^{(t)} = S_{gc,1}^{(t)} = q_{bd,2}^{(t)} = q_{gr,i,2}^{(t)} = p_{gz,2}^{(t)} = 0 \quad (4.66)$$

以下、乾燥収縮に対する式と異なるもののみを記述する。

- ・床版鋼材の断面力(式(4.31b)に対し)

$$\left. \begin{aligned} N_{fr}^{(t)} &= \frac{A_{fr}}{A_v} N_{v,2}^{(t)} + \frac{J_{fr} - A_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0,2}^{(t)} + N_{fr,1}^{(t)} \\ M_{fr}^{(t)} &= \frac{J_{fr}}{A_v} N_{v,2}^{(t)} + \frac{I_{fr} - J_{fr}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0,2}^{(t)} + M_{fr,1}^{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (4.67a,b)$$

- ・床版総断面の断面力(式(4.32)に対し)

$$\left. \begin{aligned} N_{fv}^{(t)} &= N_{fc}^{(t)} + N_{fr}^{(t)} = \frac{A_{fv}}{A_v} N_{v,2}^{(t)} + \frac{J_{fv} - A_{fv}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0,2}^{(t)} + N_{fc,1}^{(t)} + N_{fr,1}^{(t)} \\ M_{fv}^{(t)} &= M_{fc}^{(t)} + M_{fr}^{(t)} = \frac{J_{fv}}{A_v} N_{v,2}^{(t)} + \frac{I_{fv} - J_{fv}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0,2}^{(t)} + M_{fc,1}^{(t)} + M_{fr,1}^{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (4.68a,b)$$

- ・床版総断面のせん断力(式(4.39)に対し)

$$\begin{aligned} S_{fv}^{(t)} &= \left( \frac{J_{fv}}{A_v} \right)' N_{v,2}^{(t)} + \left( \frac{J_{fv}}{A_v} \right) N_{v,2}^{(t)'} + \left( \frac{I_{fv} - J_{fv}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} \right)' M_{v0,2}^{(t)} + \frac{I_{fv} - J_{fv}(\eta_d + e_v)}{I_{v0}} M_{v0,2}^{(t)'} \\ &\quad + (q_d^{(t)} + q_{d,2}^{(t)})\eta_{fl} + \sum_i (q_{fr,i,2}^{(t)} \cdot \eta_{fs,i}) + q_{fzv,2}^{(t)} \cdot e_{fv} + S_{fv,1}^{(t)} \end{aligned} \quad (4.69)$$

- ・ずれ止めのせん断応力(式(4.40)に対し)

$$q_d^{(t)} = \left( \frac{A_g}{A_v} \right)' N_{v,2}^{(t)} + \left( \frac{A_g}{A_v} \right) N_{v,2}^{(t)'} + \left( \frac{J_g - A_g e_v}{I_{v0}} \right)' M_{v0,2}^{(t)} + \left( \frac{J_g - A_g e_v}{I_{v0}} \right) M_{v0,2}^{(t)'} \quad (4.70)$$

- ・総断面力の微分(式(4.41)に対し)

$$N_{v,2}^{(t)'} = -p_{fzv,2}^{(t)}, \quad M_{v0,2}^{(t)'} = S_{v,2}^{(t)} - N_{v,2}^{(t)} \cdot e_v' + p_{fzv,2}^{(t)} \left[ (\eta_d + e_v) - e_{fv} \right] \quad (4.71a,b)$$

- ・床版のコンクリートと鋼材のせん断力(式(4.42)に対し)

$$\left. \begin{aligned} S_{fc}^{(t)} &= M_{fc,2}^{(t)'} + q_d^{(t)} \cdot \eta_{fl} + \hat{m}_{gr,2}^{(t)} + p_{fzc,2}^{(t)} \cdot e_{fc} + S_{fc,1}^{(t)} \\ S_{fr}^{(t)} &= M_{fr,2}^{(t)'} - \hat{m}_{gr,2}^{(t)} - p_{fzs,2}^{(t)} \cdot e_{fr} + S_{fr,1}^{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (4.72a,b)$$

この他、自己つり合い系の変形に関しても、先の a.と b.に記した置き換えを行えば、温度差に対しても式(4.50)と(4.51)は有効である。

### 4.3 床版コンクリートのひび割れによる応力解放

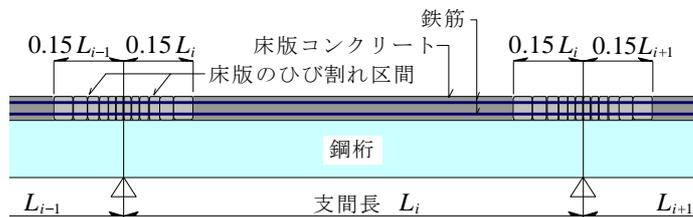


図-9 床版コンクリートの無効区間

プレストレスしない鋼連続合成桁，および床版にプレストレスしない PC 連結合成桁では，合成後において後死荷重，クリープ・乾燥収縮および活荷重などの作用により中間支点部の床版コンクリートのひび割れは避けられない．とくに終局限界状態ではひび割れによる床版コンクリートの無効区間は，ある程度の拡がりを示す<sup>15), 16)</sup>．このため鋼連続合成桁では，図-9のように中間支点の両片側でそれが属する支間長の 0.15 l 区間を

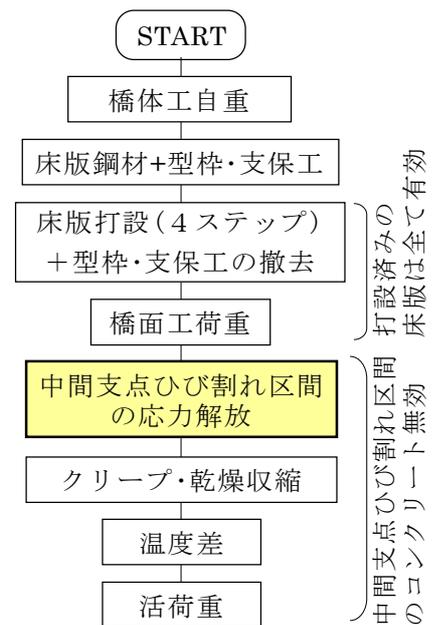


図-10 鋼連続合成桁の断面力の計算手順

無効として設計断面力を計算する<sup>16)~18)</sup>。ただし、日本では床版の区分打設を行う際にコンクリートに床版に過度な引張応力が発生しないように打設区分と順序を検討することを推奨しており<sup>19),20)</sup>、床版コンクリート打設終了までは打設済みコンクリートは全て有効とした計算を行う。したがって、**図-9**に示すように、段階計算の途中で床版コンクリートに発生している応力を解放する計算を挟み込む必要を生ずる。

以下の計算は、床版コンクリートの断面力を他の分担断面力に再分配する際に、およびそれによる付加変位の計算に用いる。不静定構造であれば、不静定反力の計算にも用いる。

応力解放計算では4.1のクリープ計算で導いた結果を利用できる。クリープ応力計算は初期応力  $N_{fc}^{(0)}, M_{fc}^{(0)}, S_{fc}^{(0)}, q_d^{(0)}$  によりクリープ応力  $N_v^{(\phi)}, M_v^{(\phi)}, S_v^{(\phi)}, q_d^{(\phi)}$  などが発生するとした応力問題であった。これをコンクリートの応力解放に適用するに際しては、

$$\phi=1, \rho=0, E_c=0 \quad (4.73)$$

と置けばよい。このとき、式(4.7)と(4.8)、および式(4.9)~(4.12)に代わり、**図-7(c)**の変位凍結状態で床版コンクリートに作用させる力は次のようである(以下、肩付き( $\phi$ )を( $r$ )に置換えて表す)。

$$\cdot \text{床版コンクリートの境界力 } N_{fc,1}^{(r)} = -N_{fc}^{(0)}, \quad M_{fc,1}^{(r)} = -M_{fc}^{(0)}, \quad S_{fc,1}^{(r)} = -S_{fc}^{(0)} \quad (4.74a\sim c)$$

$$\cdot \text{ずれ止めのせん断応力 } q_{d,1}^{(r)} = -q_d^{(0)} \quad (4.75)$$

$$\cdot \text{床版鋼材の付着力 } \hat{q}_{fr,1}^{(r)} = -\hat{q}_{fr}^{(0)}, \quad \hat{m}_{fr,1}^{(r)} = -\hat{m}_{fr}^{(0)} \quad (4.76a,b)$$

これらから、**図-7(d)**で全体総断面に作用させる力は、式(4.20)~(4.25)に代わって、次のようになる。

$$N_{v,2}^{(r)} = N_{fc}^{(0)}, \quad M_{v,2}^{(r)} = M_{fc}^{(0)} - N_{fc}^{(0)} \cdot \eta_d, \quad S_{v,2}^{(r)} = S_{fc}^{(0)} \quad (4.77a\sim c)$$

$$M_{v,0,2}^{(r)} = M_{fc}^{(0)} - N_{fc}^{(0)} \cdot (\eta_d + e_v^{(r)}) \quad (4.78)$$

$$q_{d,2}^{(r)} = q_d^{(0)} \quad (4.79)$$

$$\hat{q}_{fr,2}^{(r)} = \hat{q}_{fr}^{(0)}, \quad \hat{m}_{fr,2}^{(r)} = \hat{m}_{fr}^{(0)} \quad (4.80a,b)$$

ここに、床版のコンクリート断面は無効であるから、総断面の断面定数は次のようである。

$$A_v^{(r)} = A_{fr} + A_{gv}, \quad J_v^{(r)} = J_{fr} - A_{fr} \cdot \eta_d + J_{gv}, \quad I_v^{(r)} = I_{fr} - 2J_{fr} \cdot \eta_d + A_{fr} \cdot \eta_d^2 + I_{gv} \quad (4.81a\sim c)$$

$$e_v^{(r)} = J_v^{(r)} / A_v^{(r)}, \quad I_{v,0}^{(r)} = I_v^{(r)} - A_v^{(r)} \cdot (e_v^{(r)})^2 \quad (4.82a,b)$$

なお、ひび割れたコンクリートは直応力を負担しないが、せん断応力を伝達する機能は残ることを注記しておく。

上記の式(4.74)~(4.80)の境界力や分布水平力を作用させると、断面内で応力の再分配が発生し、それに伴い変形する。それらは、式(4.73)と(4.81),(4.82)を前提として、4.1のクリープ計算で導いた結果(式(4.50)~(4.52))において肩付き( $\phi$ )を( $r$ )に置き換えて、この応力解放問題にも適用可能である。したがって、以下は省略する。

#### 4.4 床版の撤去に伴う床版総断面の応力解放

前節は床版コンクリートのひび割れによるコンクリート応力の解放であったが、この節では床版総断面の全断面力の解放を扱う。床版が損傷を受け、そのために床版を打ち替えることもありうるので、その場合に備えたものである。

床版を撤去するという事は、力学的には床版の剛性をゼロと置き、同時に床版に作用していた内力を消去することである。したがって、式(4.7)~(4.12)に代わって、**図-7(c)**において床

版に次の力を作用させる．ここに，床版の撤去に伴う作用を肩付きに(g)を付して表す．

・床版断面の境界力

$$\left. \begin{aligned} N_{fv,1}^{(g)} &= -N_{fv}^{(0)} = -N_{fc}^{(0)} - N_{fs}^{(0)} \\ M_{fv,1}^{(g)} &= -M_{fv}^{(0)} = -M_{fc}^{(0)} - M_{fs}^{(0)} \\ S_{fv,1}^{(g)} &= -S_{fv}^{(0)} = -S_{fc}^{(0)} - S_{fs}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (4.83a\sim c)$$

・ずれ止めのせん断応力  $q_{d,1}^{(g)} = -q_d^{(0)}$  (4.84)

図-7(c)の変位凍結状態を解放するということは，図-7(d)において上記の力を，向きを変えて床版の無い総断面に与えることであり，式(2.19),(2.20)および式(2.2)から，

$$N_{v,2}^{(g)} = N_{fv}^{(0)} \quad , \quad M_{v,2}^{(g)} = M_{fv}^{(0)} - N_{fv}^{(0)} \cdot \eta_d \quad , \quad S_{v,2}^{(g)} = S_{fv}^{(0)} \quad (4.85a\sim c)$$

$$M_{v,0,2}^{(g)} = M_{fv}^{(0)} - N_{fv}^{(0)} \cdot (\eta_d + e_{gv}) \quad (4.86)$$

また，分布水平力も向きを変えて与え，

$$q_{d,2}^{(g)} = q_d^{(0)} \quad (4.87)$$

である．ここに，床版は無効であるから，総断面の断面定数は次のようである．

$$A_v^{(g)} = A_{gv} \quad , \quad J_v^{(g)} = J_{gv} \quad , \quad I_v^{(g)} = I_{gv} \quad (4.89a\sim c)$$

$$e_v^{(g)} = J_v^{(g)} / A_v^{(g)} = e_{gv} = J_{gv} / A_{gv} \quad , \quad I_{v0}^{(g)} = I_v^{(g)} - A_v^{(g)} \cdot (e_v^{(g)})^2 = I_{gv0} = I_{gv} - A_{gv} \cdot (e_{gv})^2 \quad (4.90a,b)$$

以下，主桁総断面の断面力を示し，その分担断面力は省略する．式(4.37)と(4.39b)から，

$$N_{gv}^{(g)} = N_{v,2}^{(g)} = N_{fv}^{(0)} \quad , \quad M_{gv}^{(g)} = M_{v,0,2}^{(g)} + N_{v,2}^{(g)} \cdot e_{gv} = M_{fv}^{(0)} - N_{fv}^{(0)} \cdot \eta_d \quad (4.91a,b)$$

$$S_{gv}^{(g)} = (M_{v,0,2}^{(g)} + N_{v,2}^{(g)} e_{gv})' + q_d^{(0)} \cdot y_{gu} = S_{fv}^{(0)} \quad (4.92)$$

## 5. PC 合成部材のクリープ・乾燥収縮応力

4章 4.1 で扱ったクリープ・乾燥収縮応力の算定式は PC 合成部材に対してはやや解りにくいと思われるので、図-1 (b) の PC 合成部材を対象として書き直す。その上で、道示 I の式(解 2.2.7)に相当する、クリープ・乾燥収縮によるプレストレスの減少量の算定式を誘導する。また、道示 III の式(解 11.2.1)～(解 11.2.6)の Mattock の式に相当する分担断面力の算定式を導き、道示 III の計算手法を批評する。

### 5.1 クリープ・乾燥収縮応力の基本式

4章 4.1 で扱ったクリープ・乾燥収縮応力の算定式は PC 合成部材に対してはやや解りにくいと思われるので、図-1 (b) の PC 合成部材に対するものを書き直す。

#### (1) 変位凍結状態の断面力と分布水平力

まず、変位凍結状態の断面力と分布水平力を、クリープ応力と乾燥収縮応力を加算して表すと、式(4.7)～(4.17)より、

- ・床版と主桁のコンクリート断面力

$$N_{fc,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot(\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \quad , \quad M_{fc,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot(\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \quad (5.1a,b)$$

$$S_{fc,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot(\phi_f S_{fc}^{(0)} + S_{fc}^{(s)}) \quad (5.1c)$$

$$N_{gc,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot(\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \quad , \quad M_{gc,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot(\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \quad (5.2a,b)$$

$$S_{gc,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot(\phi_g S_{gc}^{(0)} + S_{gc}^{(s)}) \quad (5.2c)$$

- ・ずれ止め位置の分布水平力  $q_{d,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot q_d^{(0)}$  (5.3)

- ・床版鋼材の付着力，他

乾燥収縮における  $\hat{p}_{fz}^{(\phi)}$  を  $\hat{q}_{fr,1}^{(\phi)}$  に加算して、

$$\hat{q}_{fr,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot\left(\phi_f \hat{q}_{fr}^{(0)} - N_{fc}^{(\phi)'}\right) \quad , \quad \hat{m}_{fr,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_f}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot\hat{m}_{fr}^{(0)} \quad (5.4a,b)$$

- ・主桁コンクリート中の鋼材の付着力

乾燥収縮における  $\hat{p}_{gz}^{(\phi)}$  を  $\hat{q}_{gr,1}^{(\phi)}$  に加算して、

$$\hat{q}_{gr,1}^{(\phi)} = -\frac{1}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot\left(\phi_g \hat{q}_{gr}^{(0)} - N_{gc}^{(s)'}\right) \quad , \quad \hat{m}_{gr,1}^{(\phi)} = -\frac{\phi_g}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot\hat{m}_{gr}^{(0)} \quad (5.5a,b)$$

#### (2) 変位凍結状態の解放による断面力と分布水平力

次に、変位凍結状態の解放による断面力と分布水平力は、式(4.18)～(4.27)より、

$$N_{v,2}^{(\phi)} = \frac{1}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot(\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) + \frac{1}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot(\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \quad (5.6a)$$

$$M_{v,0,2}^{(\phi)} = \frac{1}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot\left[\phi_f \left\{M_{fc}^{(0)} - N_{fc}^{(0)}\cdot(\eta_d + e_v^{(\phi)})\right\} + \left\{M_{fc}^{(s)} - N_{fc}^{(s)}\cdot(\eta_d + e_v^{(\phi)})\right\}\right] \\ + \frac{1}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot\left[\phi_g \left(M_{gc}^{(0)} - N_{gc}^{(0)}\cdot e_v^{(\phi)}\right) + \left(M_{gc}^{(s)} - N_{gc}^{(s)}\cdot e_v^{(\phi)}\right)\right] \quad (5.6b)$$

$$S_{v,2}^{(\phi)} = \frac{1}{1+\rho\cdot\phi_f}\cdot(\phi_f S_{fc}^{(0)} + S_{fc}^{(s)}) + \frac{1}{1+\rho\cdot\phi_g}\cdot(\phi_g S_{gc}^{(0)} + S_{gc}^{(s)}) \quad (5.6c)$$

$$q_{d,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot q_d^{(0)} \quad (5.7)$$

$$\hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} \left( \phi_f \hat{q}_{fr}^{(0)} - N_{fc}^{(s)'} \right), \quad \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot \hat{m}_{fr}^{(0)} \quad (5.8a,b)$$

$$\hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \left( \phi_g \hat{q}_{gr}^{(0)} - N_{gc}^{(s)'} \right), \quad \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)} = \frac{\phi_g}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot \hat{m}_{gr}^{(0)} \quad (5.9a,b)$$

### (3) クリープ・乾燥収縮応力

これらによる床版合成断面と主桁合成断面のクリープ・乾燥収縮による断面力は、式(4.28), (4.30), (4.32), (4.35)から、

$$\left. \begin{aligned} N_{fc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{A_{fc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{fc} - A_{fc} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\ M_{fc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{J_{fc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{fc} - J_{fc} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \end{aligned} \right\} \quad (5.10a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{fr}^{(\phi)} &= \frac{A_{fr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{fr} - A_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \\ M_{fr}^{(\phi)} &= \frac{J_{fr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{fr} - J_{fr} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \end{aligned} \right\} \quad (5.11a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{gc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{A_{gc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gc} - A_{gc} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\ M_{gc}^{(\phi)} &= \frac{1}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{J_{gc}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gc} - J_{gc} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \end{aligned} \right\} \quad (5.12a,b)$$

$$N_{gr}^{(\phi)} = \frac{A_{gr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)}, \quad M_{gr}^{(\phi)} = \frac{J_{gr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gr} - J_{gr} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \quad (5.13a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{fv}^{(\phi)} &= \frac{A_{fv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} - \frac{A_{fv}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\ M_{fv}^{(\phi)} &= \frac{I_{fv0}^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{\phi_f}{1 + \rho \cdot \phi_f} \cdot M_{fc0}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (5.14a,b)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{gv}^{(\phi)} &= \frac{A_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gv}^{(\phi)} - A_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\ M_{gv}^{(\phi)} &= \frac{J_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gv}^{(\phi)} - J_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g M_{gc0}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \end{aligned} \right\} \quad (5.15a,b)$$

式(4.37)から、

$$\begin{aligned} S_{fv}^{(\phi)} &= \left( \frac{J_{fv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \left( \frac{J_{fv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right) N_{v,2}^{(\phi)'} + \left( \frac{I_{fv}^{(\phi)} - J_{fv}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} \right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \frac{I_{fv}^{(\phi)} - J_{fv}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \\ &\quad + (q_d^{(\phi)} + q_{d,2}^{(\phi)}) \eta_{fl} + \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} + p_{fz,2}^{(\phi)} \cdot e_{fc} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_f} (\phi_f S_{fc}^{(0)} + S_{fc}^{(s)}) \end{aligned} \quad (5.16a)$$

$$S_{gv}^{(\phi)} = \left( \frac{J_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \left( \frac{J_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right) N_{v,2}^{(\phi)'} + \left( \frac{I_{gv}^{(\phi)} - J_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \frac{I_{gv}^{(\phi)} - J_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} \quad (5.16b)$$

$$-q_d^{(\phi)} y_{gu} + \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)} + \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} \cdot e_{gc} - \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} (\phi_g S_{gc}^{(0)} + S_{gc}^{(s)}) \quad (5.16b)$$

である．ここに，式(4.38a)から，床版側から算定したずれ止めのせん断応力は，

$$q_d^{(\phi)} = - \left( \frac{A_{fv}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} - \left( \frac{A_{fv}}{A_v^{(\phi)}} \right) N_{v,2}^{(\phi)'} - \left( \frac{J_{fv} - A_{fv} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right)' M_{v0,2}^{(\phi)} - \left( \frac{J_{fv} - A_{fv} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) M_{v0,2}^{(\phi)'} - q_{d,2}^{(\phi)} - \hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} - \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} \quad (5.17a)$$

主桁側から算定すれば，式(4.45)より，

$$q_d^{(\phi)} = \left( \frac{A_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} \right)' N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{A_{gv}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)'} + \left( \frac{J_{gv}^{(\phi)} - A_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right)' M_{v0,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gv}^{(\phi)} - A_{gv}^{(\phi)} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)'} - q_{d,2}^{(\phi)} + q_{gr,2}^{(\phi)} \quad (5.17b)$$

である．また式(4.39)から，

$$\left. \begin{aligned} N_{v,2}^{(\phi)'} &= q_{d,2}^{(\phi)} - \hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} - \hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} - \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} - \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} \\ M_{v0,2}^{(\phi)'} &= S_{v,2}^{(\phi)} - N_{v,2}^{(\phi)} e_v^{(\phi)'} - \hat{m}_{fr,2}^{(\phi)} + \hat{q}_{fr,2}^{(\phi)} \cdot (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \\ &\quad - \hat{m}_{gr,2}^{(\phi)} + \hat{q}_{gr,2}^{(\phi)} \cdot e_v^{(\phi)} + \hat{p}_{fz,2}^{(\phi)} (\eta_d + e_v^{(\phi)} - e_{fc}) - \hat{p}_{gz,2}^{(\phi)} (e_{gc} - e_v^{(\phi)}) \end{aligned} \right\} \quad (5.18a,b)$$

## 5.2 クリープ・乾燥収縮による単体桁のプレストレス損失

図-10の床版が合成されることのない主桁単体の有効プレストレスを扱う．主桁基準線はコンクリート断面の断面図心軸に設定する．したがって， $J_{gc} = 0$ である．また，PC鋼線(断面積  $A_{gr}$ )はその図心軸から  $y_p$  の位置にあるとする．したがって，主桁合成断面の断面定数は，PC鋼線は曲げ剛性を有しないとするとき，以下のものである．

- ・基準線に関する合成断面の断面定数

$$\left. \begin{aligned} A_v^{(\phi)} &= \frac{A_{gc}}{n_g} + A_{gr} = A_{gc}^{(\phi)} + A_{gr} \\ J_v^{(\phi)} &= J_{gr} = A_{gr} y_p \\ I_v^{(\phi)} &= \frac{I_{gc0}}{n_g^{(\phi)}} + A_{gr} y_p^2 = I_{gc0}^{(\phi)} + A_{gr} y_p^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.19a\sim c)$$

- ・基準線から合成断面図心までの  $y$  座標  $e_v^{(\phi)} = \frac{J_v^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)}} = \frac{A_{gr} y_p}{A_v^{(\phi)}} \quad (5.19d)$

- ・合成断面図心に関する断面二次モーメント

$$I_{v0}^{(\phi)} = I_v^{(\phi)} - A_v^{(\phi)} e_v^{(\phi)2} = I_{gc0}^{(\phi)} + A_{gr} y_p^2 - \frac{(A_{gr} y_p)^2}{A_v^{(\phi)}} \quad (5.19e)$$

この桁に材齢  $t_0$  で主桁にプレストレス  $T^{(0)}$  が与えられたとする．

$$N_{gc}^{(0)} = -T^{(0)}, \quad M_{gc0}^{(0)} = -T^{(0)} \cdot y_p \quad (5.20a\sim c)$$

これによる PC 鋼線位置のコンクリート応力度は，

$$\sigma_{gc,p}^{(0)} = -\frac{T^{(0)}}{A_{gc}} + \frac{M_{gc0}^{(0)}}{I_{gc0}} y_p = -\left( \frac{1}{A_{gc}} + \frac{y_p^2}{I_{gc0}} \right) \cdot T^{(0)} = -\frac{A_{gr}}{A_{gc}} \left( 1 + \frac{A_{gc} y_p^2}{I_{gc0}} \right) \cdot \sigma_{gr,p}^{(0)} \quad (5.21a)$$

となる．ここに， $\sigma_{gr,p}^{(0)}$  は PC 鋼線の初期応力度である．すなわち，

$$\sigma_{gr,p}^{(0)} = \frac{T^{(0)}}{A_{gr}} \quad (5.21b)$$

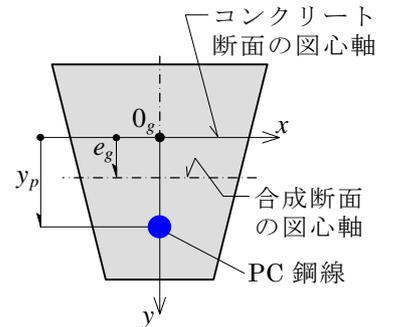


図-10 PC桁断面

この後、グラウトが施され PC 鋼線はコンクリート桁と一体化され、時間の経過につれてクリープ・乾燥収縮応力が発生する。その PC 鋼線の軸力の変動  $N_{gr}^{(\phi)}$  は、式(5.6)から、

$$N_{v,2}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \left( \phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)} \right) = \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \left( -\phi_g T^{(0)} + N_{gc}^{(s)} \right) \quad (5.22a)$$

$$\begin{aligned} M_{v0,2}^{(\phi)} &= \frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot \left[ \phi_g \left( M_{gc}^{(0)} - N_{gc}^{(0)} \cdot e_v^{(\phi)} \right) - N_{gc}^{(s)} \cdot e_v^{(\phi)} \right] \\ &= -\frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} \cdot \left[ \phi_g \left( y_p - e_v^{(\phi)} \right) \cdot T^{(0)} + N_{gc}^{(s)} \cdot e_v^{(\phi)} \right] \end{aligned} \quad (5.22b)$$

となるから、式(5.13a)より、

$$\begin{aligned} N_{gr}^{(\phi)} &= \frac{A_{gr}}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{J_{gr} - A_{gr} e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} = A_{gr} \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} N_{v,2}^{(\phi)} + \frac{y_p - e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} M_{v0,2}^{(\phi)} \right) \\ &= -\frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} A_{gr} \left[ \phi_g \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} + \frac{\left( y_p - e_v^{(\phi)} \right)^2}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) \cdot T^{(0)} - \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} - \frac{\left( y_p - e_v^{(\phi)} \right) e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) \cdot N_{gc}^{(s)} \right] \\ &= -\frac{1}{1 + \rho \cdot \phi_g} A_{gr} \left[ \phi_g A_{gr} \frac{I_{gc0}^{(\phi)} + A_{gc}^{(\phi)} \left( y_p \right)^2}{A_v^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} \cdot T^{(0)} - A_{gr} \frac{I_{gc0}^{(\phi)}}{A_v^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} \cdot N_{gc}^{(s)} \right] \end{aligned} \quad (5.23)$$

と算定される。これは、クリープ・乾燥収縮によるプレストレス  $T^{(0)}$  の損出力であり、鋼材として PC 鋼線のみがあるときの鋼材によるクリープ・乾燥収縮の拘束力である。これを PC 鋼線の応力度  $\sigma_{gr}^{(\phi)}$  で表すと、次式となる。

$$\sigma_{gr}^{(\phi)} = \frac{N_{gr}^{(\phi)}}{A_{gr}} = \frac{n_g \left( \phi_g \sigma_{gc,p}^{(0)} + \bar{E}_{gc,s} \varepsilon_{gc,s} \right)}{1 + n_g \frac{A_{gr}}{A_{gc}} \left( 1 + \frac{A_{gc} y_p^2}{I_{gc0}} \right) (1 + \rho \phi_g)} = \frac{n_g \phi_g \sigma_{gc,p}^{(0)} + E_p \varepsilon_{gc,s}}{1 + n_g \frac{A_{gr}}{A_{gc}} \left( 1 + \frac{A_{gc} y_p^2}{I_{gc0}} \right) (1 + \rho \phi_g)} \quad (5.24)$$

ここに、

$$E_p = n_g \bar{E}_{gc,s} \quad (5.25)$$

と表した。  $E_p$  は PC 鋼線のヤング係数である。

式(5.24)は、よく知られているクリープ・乾燥収縮による PC 鋼線の損失の算定式である。DIN の分野別規定では、特に検討をしない場合は Trost の材齢係数  $\rho$  を  $\rho=0.8$  としてよいとしている。道示 I でも式(解 2.1.7)で同様の算定式を与えているが、 $\rho=1/2$  としおり、古い Dischinger のクリープ理論の名残が見られる。また同式では、式(5.21a)から、

$$\frac{A_{gr}}{A_{gc}} \left( 1 + \frac{A_{gc} y_p^2}{I_{gc0}} \right) = -\frac{\sigma_{gc,p}^{(0)}}{\sigma_{gr,p}^{(0)}}$$

を導き、これを以って式(5.24)の分母を置換えている(道示ではコンクリートの圧縮応力度を正値としている)。しかし、初期プレストレス  $\sigma_{gr,p}^{(0)}$  があることが前提となるため、一般的には適切な置換えとは思えない。

## 5.3 鋼材の無視と Mattock の式との比較

### 5.3.1 鋼材を無視したクリープ・乾燥収縮応力の基本式

道示 III およびその便覧で解説されている Mattock の式ではコンクリート中の鋼材は考慮されていない。それとの比較を行う準備として、クリープ・乾燥収縮による直応力に関する断面力を、鋼材を無視した算定式に改める。

式(5.10)と(5.12)の床版と主桁のコンクリート断面のクリープ・乾燥収縮による直応力の断面力を、初期応力で表示する。

$$\begin{aligned}
N_{fc}^{(\phi)} &= \frac{1}{1+\rho\phi_f} \left( \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{J_{fc} - A_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) - 1 \right) (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_f} \cdot \frac{J_{fc} - A_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left( \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{J_{fc} - A_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right) (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{J_{fc} - A_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \tag{5.26a}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{fc}^{(\phi)} &= \frac{1}{1+\rho\phi_f} \left[ \frac{J_{fc}}{n_f^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{I_{fc} - J_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right] (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_f} \left( \frac{I_{fc} - J_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} - 1 \right) (\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ \frac{J_{fc}}{n_f^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{I_{fc} - J_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right] (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{I_{fc} - J_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \tag{5.26b}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{gc}^{(\phi)} &= \frac{1}{1+\rho\phi_f} \left[ \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{J_{gc} - A_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right] (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_f} \cdot \frac{J_{gc} - A_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{J_{gc} - A_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} - 1 \right] (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{J_{gc} - A_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \tag{5.26a}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{gc}^{(\phi)} &= \frac{1}{1+\rho\phi_f} \left[ \frac{J_{gc}}{n_g^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{I_{gc} - J_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right] (\phi_f N_{fc}^{(0)} + N_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_f} \cdot \frac{I_{gc} - J_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (\phi_f M_{fc}^{(0)} + M_{fc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ \frac{J_{gc}}{n_g^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{I_{gc} - J_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right] (\phi_g N_{gc}^{(0)} + N_{gc}^{(s)}) \\
&+ \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ \frac{I_{gc} - J_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} - 1 \right] (\phi_g M_{gc}^{(0)} + M_{gc}^{(s)}) \tag{5.26b}
\end{aligned}$$

ここに、合成断面の断面定数は次式で算定される。

$$A_v^{(\phi)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} + \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}}, \quad I_{v0}^{(\phi)} = \frac{I_{fc0}}{n_f^{(\phi)}} + \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \eta_d^2 + \frac{I_{gc0}}{n_g^{(\phi)}} \tag{5.27a,b}$$

### 5.3.2 PC 合成部材への適用(鋼材を無視した場合)

道示Ⅲの式(解 11.2.1)と(解 11.2.2)および式(解 11.2.5)と(解 11.2.6)は、主桁にプレストレスを与えた後に桁を架設して横桁と床版の施工を行い、それらによるクリープと乾燥収縮が進行した状態である。式(5.26)を、施工過程を追ったクリープと乾燥収縮断面力の式に改める。その際、床版と主桁の断面は一定で、それらの基準線はそれぞれの断面図心と一致するように定めるものとする。すなわち、

$$J_{fc} \equiv J_{gc} \equiv e_{fc} \equiv e_{gc} \equiv 0 \quad (5.28a,b)$$

である。したがって、以降では、

$$I_{fc} = I_{fc0}, I_{gc} = I_{gc0} \quad (5.28c)$$

と扱う。

#### (1) 自重とプレストレスによるクリープ・乾燥収縮応力

材齢  $t_0$  で主桁にプレストレスを与え、同時に主桁自重が作用するものとする、初期応力は、

$$N_{fc}^{(0)} = M_{fc0}^{(0)} = 0, \quad N_{gc}^{(0)} = -T^{(0)}, \quad M_{gc0}^{(0)} = M_{d0}^{(0)} - T^{(0)} \cdot y_p \quad (5.29a\sim c)$$

となる。ここに、

$T^{(0)}$  : プレストレス張力の桁軸方向成分

$y_p$  :  $T$  の作用点の  $y$  座標

$M_{d0}^{(0)}$  : 主桁自重による曲げモーメント

である。

ここで、床版打設時の主桁材齢を  $t_1$  とし、その後の材齢  $t$  におけるクリープ・乾燥収縮応力を求めるものとし、

$$\Delta\phi_{g0} = \phi_g(t-t_1, t_0) - \phi_g(t_1, t_0) \quad (5.30)$$

とおく。すなわち、床版打設により主桁のクリープ・乾燥収縮の拘束が始まるものとし、以下では、

$$\phi_g = \phi_g(t, t_0) \quad (5.31)$$

と表すものとする。このとき、式(5.26)は次のようになる。

$$N_{fc}^{(\phi)} = -\frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \left( \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{A_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \right) \cdot T^{(0)} - \frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{A_{fc}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} \cdot M_{d0}^{(0)} \quad (5.32a)$$

$$M_{fc}^{(\phi)} = -\frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{I_{fc}}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \cdot T^{(0)} + \frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{I_{fc}}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} M_{d0}^{(0)} \quad (5.32b)$$

$$N_{gc}^{(\phi)} = -\frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \left( \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)} A_v^{(\phi)}} - \frac{A_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) - 1 \right) \cdot T^{(0)} - \frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{A_{gc}e_v^{(\phi)}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} M_{d0}^{(0)} \quad (5.32c)$$

$$M_{gc}^{(\phi)} = -\frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \cdot \frac{I_{gc}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \cdot T^{(0)} + \frac{\Delta\phi_{g0}}{1+\rho\phi_g} \left( \frac{I_{gc}}{n_g^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} - 1 \right) \cdot M_{d0}^{(0)} \quad (5.32d)$$

このとき、MC-90<sup>7)</sup>によると、床版の材齢は  $t_0 = 1$  日を充てるとしており、

$$E_{fc} = E_{fc}(1), \quad \phi_f = \phi_f(t, 1) \quad (5.33a,b)$$

である(ここに、着目点の材齢を、床版も主桁も  $t$  と表したが、具体的にはコンクリート打設日の差の日数だけ異なることに留意されたい)。したがって、式(4.4)より、

$$E_{fc}^{(\phi)} = \frac{E_{fc}(1)}{1 + \rho\phi_f(t,1)} \quad (5.34a)$$

である。一方、主桁については、

$$E_{gc}^{(\phi)} = \frac{E_{gc}(t_0)}{1 + \rho\phi_g(t,t_0)} \quad (5.34b)$$

である。したがって、

$$n_f^{(\phi)} = \frac{E_s}{E_{fc}^{(\phi)}}, \quad n_g^{(\phi)} = \frac{E_s}{E_{gc}^{(\phi)}} \quad (5.35a,b)$$

となる。式(5.27a,b)の断面定数の算定においては上式を充てる。なお、乾燥収縮応力に対して式(5.26)はそのまま有効であり、その際にも式(5.31)および(5.33)～(5.35)を充てる。

## (2) 床版打設によるクリープ応力

床版打設による主桁の曲げモーメント  $M_{d1}^{(0)}$  も上記と同様にクリープ応力を発生させ、式(5.32)は  $M_{d0}^{(0)}$  を  $M_{d1}^{(0)}$  と入れ替えることにより有効である。ただし、床版打設時は主桁材齢  $t_1$  において行われるので、式(5.34b)の  $E_{gc}^{(\phi)}$  は次式で算定しなければならない。

$$E_{gc}^{(\phi)} = \frac{E_{gc}(t_1)}{1 + \rho\phi_g(t,t_1)} \quad (5.36)$$

### 5.3.3 床版と主桁の接合面でのクリープ・乾燥収縮応力(鋼材を無視した場合)

Mattock の式は、床版と主桁の接合面での曲げモーメントを算定しているので、式(5.32)の曲げモーメントを接合面の曲げモーメント  $\bar{M}_{fc}^{(\phi)}$  と  $\bar{M}_{gc}^{(\phi)}$  に置き直す。

$$r_{fc} = \sqrt{\frac{I_{fc0}}{A_{fc}}}, \quad r_{gc} = \sqrt{\frac{I_{gc0}}{A_{gc}}} \quad (5.37)$$

と置くと、それらは以下ようになる。

$$\begin{aligned} \bar{M}_{fc}^{(\phi)} &= M_{fc}^{(\phi)} - N_{fc}^{(\phi)} \cdot \eta_{fl} \\ &= \frac{\Delta\phi_{g0}}{1 + \rho\phi_g} \cdot \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left[ \frac{\eta_{fl}}{A_v^{(\phi)}} - \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \right] \cdot T^{(0)} \\ &\quad + \frac{\Delta\phi_{g0}}{1 + \rho\phi_g} \cdot \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \cdot \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} \cdot M_{d0}^{(0)} \\ &\quad - \frac{1}{1 + \rho\phi_f} \left[ \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{\eta_{fl}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right) - \eta_{fl} \right] \cdot N_{fc}^{(s)} \\ &\quad - \frac{1}{1 + \rho\phi_g} \cdot \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{\eta_{fl}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl}(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right) \cdot N_{gc}^{(s)} \end{aligned} \quad (5.38a)$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_{gc}^{(\phi)} &= M_{gc}^{(\phi)} - N_{gc}^{(\phi)} \cdot y_{gu} \\ &= \frac{\Delta\phi_{g0}}{1 + \rho\phi_g} \left[ \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{y_{gu}}{A_v^{(\phi)}} - \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \right) + y_p - y_{gu} \right] \cdot T^{(0)} \\ &\quad + \frac{\Delta\phi_{g0}}{1 + \rho\phi_g} \left( \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \cdot \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} - 1 \right) \cdot M_{d0}^{(0)} \\ &\quad - \frac{1}{1 + \rho\phi_f} \cdot \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{y_{gu}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right) \cdot N_{fc}^{(s)} \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{y_{gu}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right) - y_{gu} \right] N_{gc}^{(s)} \quad (5.38b)$$

ここで,

$$F_{N1}^{(\phi)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} - \frac{(\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \right), \quad F_{N2}^{(\phi)} = \frac{A_{fc} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{n_f^{(\phi)} I_{v0}^{(\phi)}} \quad (5.39a,b)$$

$$F_{N1}^{(s)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} + \frac{(\eta_d + e_v^{(\phi)})^2}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) - 1, \quad F_{N2}^{(s)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} + \frac{\eta_d + e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right) \quad (5.39c,d)$$

$$\bar{F}_{M1}^{(\phi)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{\eta_{fl}}{A_v^{(\phi)}} - \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \right), \quad \bar{F}_{M2}^{(\phi)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \cdot \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} \quad (5.40a,b)$$

$$\bar{F}_{M1}^{(s)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{\eta_{fl}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right) - \eta_{fl} \quad (5.40c)$$

$$\bar{F}_{M2}^{(s)} = \frac{A_{fc}}{n_f^{(\phi)}} \left( \frac{\eta_{fl}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{fc}^2 + \eta_{fl} (\eta_d + e_v^{(\phi)})}{I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right) \quad (5.40d)$$

$$G_{N1}^{(\phi)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} - \frac{e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \right) - 1, \quad G_{N2}^{(\phi)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \cdot \frac{e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} \quad (5.41a,b)$$

$$G_{N1}^{(s)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} + \frac{e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right), \quad G_{N2}^{(s)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{1}{A_v^{(\phi)}} + \frac{e_v^{(\phi)^2}}{I_{v0}^{(\phi)}} \right) - 1 \quad (5.41c,d)$$

$$\bar{G}_{M1}^{(\phi)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{y_{gu}}{A_v^{(\phi)}} - \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} (y_p - e_v^{(\phi)}) \right) + y_p - y_{gu}, \quad \bar{G}_{M2}^{(\phi)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \cdot \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} - 1 \quad (5.42a,b)$$

$$\bar{G}_{M1}^{(s)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{y_{gu}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} (\eta_d + e_v^{(\phi)}) \right) \quad (5.42c)$$

$$\bar{G}_{M2}^{(s)} = \frac{A_{gc}}{n_g^{(\phi)}} \left( \frac{y_{gu}}{A_v^{(\phi)}} + \frac{r_{gc}^2 + y_{gu}e_v^{(\phi)}}{I_{v0}^{(\phi)}} e_v^{(\phi)} \right) - y_{gu} \quad (5.42d)$$

と置くと、式(5.26a,c)と式(5.38)は次のように表せる。

$$N_{fc}^{(\phi)} = \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ -\Delta\phi_{g0} (F_{N1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + F_{N2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)}) + F_{N1}^{(s)} \cdot N_{fc}^{(s)} + F_{N2}^{(s)} \cdot N_{gc}^{(s)} \right] \quad (5.43a)$$

$$\bar{M}_{fc}^{(\phi)} = \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ \Delta\phi_{g0} (\bar{F}_{M1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + \bar{F}_{M2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)}) - \bar{F}_{M1}^{(s)} \cdot N_{fc}^{(s)} - \bar{F}_{M2}^{(s)} \cdot N_{gc}^{(s)} \right] \quad (5.43b)$$

$$N_{gc}^{(\phi)} = \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ -\Delta\phi_{g0} (G_{N1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + G_{N2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)}) + G_{N1}^{(s)} \cdot N_{fc}^{(s)} + G_{N2}^{(s)} \cdot N_{gc}^{(s)} \right] \quad (5.43c)$$

$$\bar{M}_{gc}^{(\phi)} = \frac{1}{1+\rho\phi_g} \left[ \Delta\phi_{g0} (\bar{G}_{M1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + \bar{G}_{M2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)}) - \bar{G}_{M1}^{(s)} \cdot N_{fc}^{(s)} - \bar{G}_{M2}^{(s)} \cdot N_{gc}^{(s)} \right] \quad (5.43d)$$

このとき次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} F_{N1}^{(\phi)} + G_{N1}^{(\phi)} &= F_{N2}^{(\phi)} + G_{N2}^{(\phi)} = F_{N1}^{(s)} + G_{N1}^{(s)} = F_{N2}^{(s)} + G_{N2}^{(s)} = 0 \\ \bar{F}_{M1}^{(\phi)} + \bar{G}_{M1}^{(\phi)} &= \bar{F}_{M2}^{(\phi)} + \bar{G}_{M2}^{(\phi)} = \bar{F}_{M1}^{(s)} + \bar{G}_{M1}^{(s)} = \bar{F}_{M2}^{(s)} + \bar{G}_{M2}^{(s)} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.44a,b)$$

また,

$$\left. \begin{aligned} E_{fc}^{(\phi)} A_{fc} F_{N1}^{(s)} &= -E_{gc}^{(\phi)} A_{gc} F_{N2}^{(s)} = -E_{fc}^{(\phi)} A_{fc} G_{N1}^{(s)} = E_{gc}^{(\phi)} A_{gc} G_{N2}^{(s)} \\ E_{fc}^{(\phi)} A_{fc} \bar{F}_{M1}^{(s)} &= -E_{gc}^{(\phi)} A_{gc} \bar{F}_{M2}^{(s)} = -E_{fc}^{(\phi)} A_{fc} \bar{G}_{M1}^{(s)} = E_{gc}^{(\phi)} A_{gc} \bar{G}_{M2}^{(s)} \end{aligned} \right\} \quad (5.44a,b)$$

となる。これと式(4.15)の関係を用いると、式(5.43)は次のように表せる。

$$N_{fc}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho\phi_g} \left[ -\Delta\phi_{g0} \left( F_{N1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + F_{N2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)} \right) + F_{N1}^{(s)} \cdot \bar{E}_{fc} A_{fc} \left( \varepsilon_{fc,s} - \varepsilon_{gc,s} \right) \right] \quad (5.45a)$$

$$\bar{M}_{fc}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho\phi_g} \left[ \Delta\phi_{g0} \left( \bar{F}_{M1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + \bar{F}_{M2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)} \right) - \bar{F}_{M1}^{(s)} \cdot \bar{E}_{fc} A_{fc} \left( \varepsilon_{fc,s} - \varepsilon_{gc,s} \right) \right] \quad (5.45b)$$

$$N_{gc}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho\phi_g} \left[ -\Delta\phi_{g0} \left( G_{N1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + G_{N2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)} \right) + G_{N1}^{(s)} \cdot \bar{E}_{fc} A_{fc} \left( \varepsilon_{fc,s} - \varepsilon_{gc,s} \right) \right] \quad (5.45c)$$

$$\bar{M}_{gc}^{(\phi)} = \frac{1}{1 + \rho\phi_g} \left[ \Delta\phi_{g0} \left( \bar{G}_{M1}^{(\phi)} \cdot T^{(0)} + \bar{G}_{M2}^{(\phi)} \cdot M_{d0}^{(0)} \right) - \bar{G}_{M1}^{(s)} \cdot \bar{E}_{fc} A_{fc} \left( \varepsilon_{fc,s} - \varepsilon_{gc,s} \right) \right] \quad (5.45d)$$

### 5.3.4 Mattock の式との数式上の比較

前節の結果を道示Ⅲの Mattock の式(解 11.2.1)と(解 11.2.2)および式(解 11.2.5)と(解 11.2.6)と比較する。そのため、本報告と道示Ⅲの記号の対応を表-1に示しておく。

また Mattock の式では、本書とは異なる幾つかの前提が置かれている(正しくは、当時のクリープ理論との違いと説明した方がよいものもあるように思われる)。それらを以下の a.~d.で説明する。併せて本報告の記号を Mattock に合わせるための置き換え方を示す。

- a. 明らかに材齢係数を考慮していない。したがって、

$$\rho \Rightarrow 1 \quad (5.46a)$$

- b. クリープ応力に対するクリープ係数を、床版と主桁の区別なく、 $\varphi_\infty$ としている。したがって、

$$\phi_f = \phi_g \Rightarrow \varphi_\infty \quad (5.46b)$$

- c. 主桁の初期応力によるクリープ係数の合成後の増分を  $\varphi_t$ と表している。よって、

$$\Delta\phi_g \Rightarrow \varphi_t \quad (5.46c)$$

- d. コンクリートの材齢によるヤング係数の変化が考慮されてなく、通常的设计値が用いられている。したがって、

$$E_{gc}(t_1) \Rightarrow E_{c1}, E_{fc}(1) \Rightarrow E_{c2} \quad (5.46d)$$

以上の前提を置いて、本報告の記号で Mattock の式を表すと次のようである。

$$m = \frac{E_{gc} I_{gc0}}{E_{fc} I_{fc0}}, \quad K = \frac{\phi_g}{1 + \phi_g}, \quad K' = \frac{\Delta\phi_g}{1 + \phi_g} \quad (5.47a\sim c)$$

$$B = 1 + m, \quad C = -y_{gu} - m \cdot \eta_{fl}, \quad F = y_{gu}^2 + r_{gc}^2 + m(r_{fc}^2 + y_{fl}^2) \quad (5.48a\sim c)$$

このとき、本報告(次式の各左辺)と道示Ⅲ(次式の各右辺)は次のように一致する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_{N1} &= \frac{B(-y_{gu} y_P - r_{cg}^2) - C \cdot y_P}{C^2 - BF}, & \bar{F}_{N2} &= \frac{C + B \cdot y_{gu}}{C^2 - BF} \\ \bar{F}_{M1} &= \frac{C(-y_{gu} \cdot e_{p1} - r_{cg}^2) - F \cdot y_P}{BF - C^2}, & \bar{F}_{M2} &= \frac{F + C \cdot y_{gu}}{BF - C^2} \end{aligned} \right\} \quad (5.49a\sim d)$$

つまり、5.2 で扱った PC 鋼線によるクリープ・乾燥収縮の拘束効果を Mattock の式では考慮してなく、さらに上記 a.~d.の条件のもとで Mattock の式は本報告と一致する。つまり、道示Ⅲとその設計便覧の合成桁の設計では、鋼材の拘束効果を考慮したものとししないもの、および時代の異なるクリープ理論を組合せて設計法を解説している。また、コンクリートの材齢も考慮されていない。このような不統一な扱いは、クリープ計算法の正しい理解を妨げるものとする。

表-1 記号の対応

本報告	道示Ⅲ
$E_{gc}, E_{fc}$	$E_{c1}, E_{c2}$
$A_{gc}, A_{fc}$	$A_{c1}, A_{c2}$
$I_{gc0}, I_{fc0}$	$I_{c1}, I_{c2}$
$y_{gu}$	$-y_1'$
$\eta_{fl}$	$y_2$
$y_P$	$e_{p1}$
$\Delta\phi, \phi$	$\varphi_t, \varphi_\infty$
$\varepsilon_{fc,s} - \varepsilon_{gc,s}$	$\varepsilon_s$
$r_{gc}, r_{fc}$	$r_{c1}, r_{c2}$

【参考文献】

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ 共通編，昭和 14 年 3 月
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ 鋼橋編，昭和 14 年 3 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，平成 14 年 3 月
- 4) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，昭和 55 年 8 月改訂版
- 5) (社)日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧，平成 6 年 2 月
- 6) (社)日本橋梁建設協会：PC 床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)，平成 8 年 3 月
- 7) (財)高速道路技術センター：PC 床版鋼連続合成 2 主桁橋の設計・施工マニュアル，平成 14 年 3 月
- 8) 梶田順一・川平英史・西川貴志・高濱光夫・小菅匠・高橋眞太郎・倉方慶夫：鋼連続合成桁の設計における幾つかの問題，新日本技研(株)・技術報告，新日本技研(株)ホームページ，2011.6
- 9) Dischinger, F. : Untersuchungen über die Knicksicherheit, die elastische Verformung und das Kriechen des Betons bei Bogenbrücken. Der Bauingenieur, 18. Jahrg., 1937
- 10) Dischinger, F. : Elastische und plastische Verformungen der Eisenbetontragwerke und insbesondere der Bogenbrücken. Der Bauingenieur, 20. Jahrg., 1939
- 11) Comite Euro-international du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 Design Code , Thomas Telford
- 12) Trost, H. : Auswirkungen des Superpositionsprinzips auf Kriech- und Relaxationsproblem bei Beton und Spannbeton. Beton- und Stahlbetonbau ,1967, Heft 10 und 11
- 13) Trost, H., Corders, H. , Abele, G. : Kriech- und Relaxationsversuche an sehr altem Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 295, 1978
- 14) A.Ghali・R.Favre 著，川上洵,櫻福 浄 他訳：コンクリート構造物の応力と変形，1995-1, 技報堂
- 15) 中村・倉方・松田：連続鋼合成桁における中間支点部のコンクリート剛性の評価，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2000.10
- 16) 中藪・安川・稲葉・橘・秋山・佐々木：PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法(上)，橋梁と基礎，2002.3
- 17) K.Roik・G.Hanswille 著、伊藤・平城 訳：合成桁におけるひび割れ幅の制限，橋梁と基礎'93-2
- 18) DIN-Fachbericht 104 Verbundbrücken，2003
- 19) 国土交通省・東北地方整備局：道路橋計画設計資料，平成 17 年 5 月
- 20) (社)日本橋梁建設協会：RC 床版施工マニュアル，平成 13 年 7 月
- 21) DIN-Fachbericht 102 Betonbrücken，2003