

RC One Point Advice #4

拘束コンクリートの応力 - ひずみ曲線
-新道路橋示方書における算定手法-

1. まえがき

構造材料（コンクリートと鉄筋）の応力-ひずみ関係（構成則とも呼ばれる）は、鉄筋コンクリート部材の非線形挙動と耐荷力に大きな影響を与える。特に、橋脚下部工（柱部材）においては、横補強筋（帯鉄筋、あばら鉄筋 etc.）の拘束効果の評価方法が重要である。

ここでは、コンクリートの応力-ひずみ関係について、道路橋示方書での算定手法に基づき解説したい。道路橋示方書[1]は、平成 24 年にて改訂（以降、新示方書[2]と呼ぶ）がなされたので、新示方書における算定式の要点を述べ、分かり易い数値計算事例を提示した。

なお、横補強筋に囲まれたコンクリートは、圧縮応力下において横方向の変形が拘束され、強度/靱性が向上する。これは、拘束コンクリート(Confined Concrete)と呼ばれ、鉄筋コンクリート柱部材において基本的な力学特性であり、応力-ひずみ関係において適確に評価されなければならない（拘束コンクリートは、本講座にて詳述しているので参照されたい[3]）。

2. コンクリートの応力-ひずみ曲線と限界圧縮ひずみ

新示方書におけるコンクリートの応力 σ_c とひずみ ε_c との関係は、図 1 のようにモデル化され、次式のような算定式にて算定される（式番号は、新示方書[2]に対応し、例えば、式(1)は式(10.4.1)に、式(2)は式(10.4.2)に対応する）。

$$\sigma_c = E_s \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) : \text{応力上昇域}$$

$$\sigma_c = \sigma_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccl}) : \text{応力下降域} \quad (1)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - \sigma_{cc}} \quad (2)$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8 \alpha \rho_s \sigma_{sy} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \quad (4)$$

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.5 \sigma_{cc}}{E_{des}} \quad (6)$$

$$\rho_s = \frac{4A_h}{sd} \leq 0.018 \quad (7)$$

ここに、

- σ_c : コンクリートの応力度 (N/mm^2)
 - σ_{cc} : 横拘束筋で拘束されたコンクリートの最大圧縮応力度 (N/mm^2)
 - σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2)
 - ϵ_c : コンクリートのひずみ
 - ϵ_{cc} : コンクリートが最大圧縮応力度に達する時のひずみ
 - ϵ_{ccl} : 横拘束筋で拘束されたコンクリートの限界圧縮ひずみ
 - E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm^2)
 - E_{des} : 下降勾配 (N/mm^2)
 - ρ_s : 横拘束筋の体積比
 慣性力の作用方向に配置された横拘束筋によって分割されたコンクリート部分の中で最も小さい値
 - A_h : 横拘束鉄筋 1 本あたりの断面積 (mm^2)
 - s : 横拘束鉄筋の間隔 (mm)
 - d : 横拘束鉄筋の有効長 (mm)
 - σ_{sy} : 横拘束鉄筋の降伏点 (N/mm^2), 上限を 345N/mm^2 とする.
 - α, β : 断面補正係数: 円形断面の場合 $\alpha=1.0, \beta=1.0$, 矩形断面の場合 $\alpha=0.2, \beta=0.4$
 - n : 式(2)で定義する定数
- (上記の横拘束筋は、横補強筋(lateral reinforcement)と同義語と考えていただきたい).

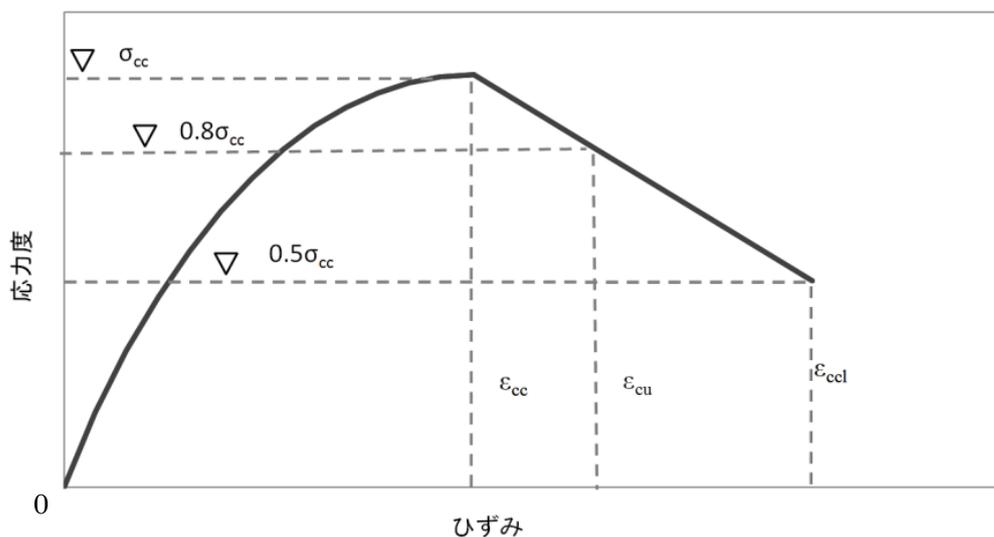


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

上記のコンクリート応力-ひずみ曲線 (新示方書[2]) は、やや難解な算定式となっているが、整理すると下記のような特徴を持つ：

1. 応力-ひずみ曲線は、式(1)のように応力上昇域 (非線形) と下降域 (線形) に分け

られる。応力上昇域の曲線形状は、定数 n の関数となり、定数 n は最大応力点（ピーク時）の座標（ ϵ_{cc} , σ_{cc} ）とヤング係数 E_c によって決定する（式(2)）。

2. 最大応力点座標（ ϵ_{cc} , σ_{cc} ），および下降勾配 E_{des} は、横拘束筋（帯鉄筋）の降伏強度 σ_{sy} と体積比 ρ_s との積に依存し、 $\rho_s \sigma_{sy} \Rightarrow$ 増加に従って、 $\epsilon_{cc} \Rightarrow$ 増加、 $\sigma_{cc} \Rightarrow$ 増加、 $E_{des} \Rightarrow$ 減少のようになる（ $\rho_s \sigma_{sy} = 0$ の場合（プレーンコンクリート）、 $\sigma_{cc} = \sigma_{ck}$, $\epsilon_{cc} = 0.002$ となることを確認されたい）。なお、体積比 ρ_s は、式(8)にて算定されるが、中間帯鉄筋（矩形断面）と多段配筋（円形断面）により、細則があり、詳しくは新示方書を参照されたい。
3. 上記の力学性状は、断面形状によって異なり、断面補正係数 α, β によって区別される。断面補正係数 α, β から、矩形断面より円形断面の方が、横拘束鉄筋の効果が大きいことが分かる。
4. 横拘束筋で拘束されたコンクリートの限界圧縮ひずみ ϵ_{ccl} が、式(7)によって再定義された。これは、応力下降域において、コンクリート応力 $\sigma_c = 0.5\sigma_{cc}$ におけるひずみとするものである。限界状態ひずみ ϵ_{ccl} は、耐震性能に応じた限界状態に相当する水平変位を算出する方法や塑性ヒンジ長の算出式を見直したことに伴い、応力下降域において最大圧縮応力の 50% まで応力が低下した点としている（なお、旧示方書では、コンクリートの終局ひずみ ϵ_{cc} が、コンクリート応力 $\sigma_c = 0.8\sigma_{cc}$ におけるひずみにて定義されていたことを、図 1 に付記している）。
5. 横拘束筋の体積比は 1.8% を上限としている（繰返しの塑性変形を受ける場合、コンクリートの横拘束を過度に高めると塑性ヒンジ領域が小さくなり、軸方向鉄筋の破断により終局状態に至るため）。また、新たに SD390 と SD490 の鉄筋の使用が認められたが、横拘束筋として使用する場合、上限を 345N/mm^2 としている。

3. パラメトリックシミュレーション

ここで、種々のパラメーターを設定したコンクリートの応力-ひずみ曲線をシミュレートし、図 2 に順次示した。すなわち、

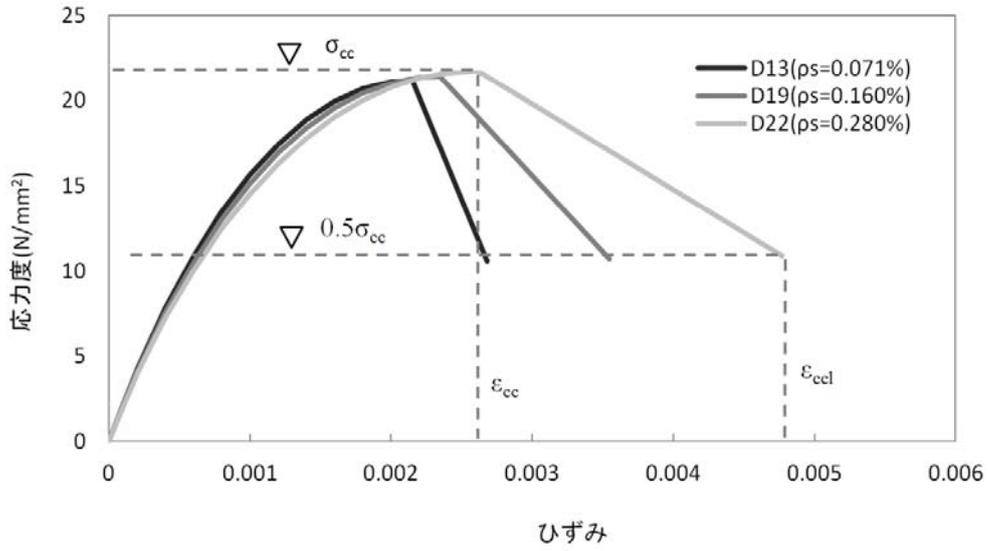
図(a)：横拘束筋の鉄筋径

図(b)：横拘束鉄筋の降伏点

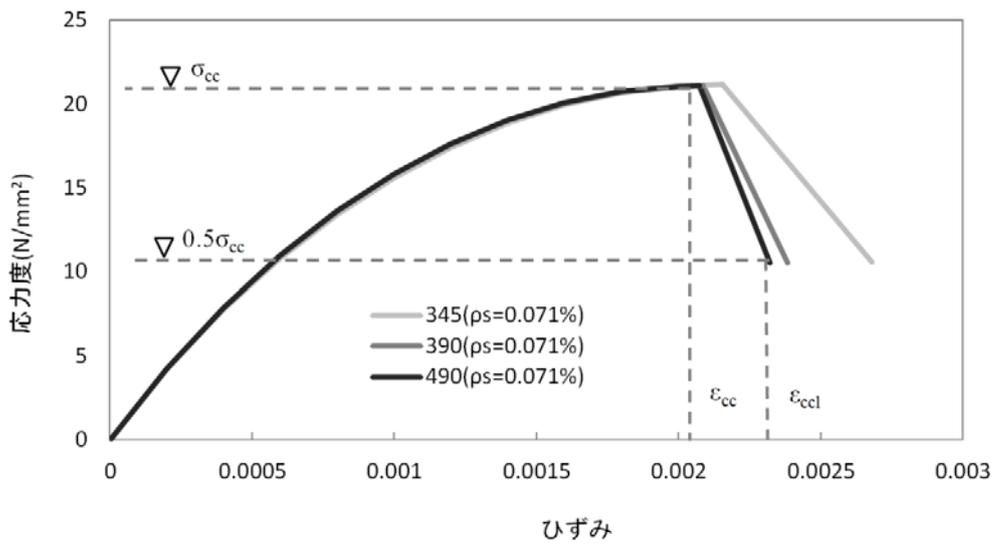
図(c)：コンクリートの圧縮強度

図(d)：横拘束筋の間隔

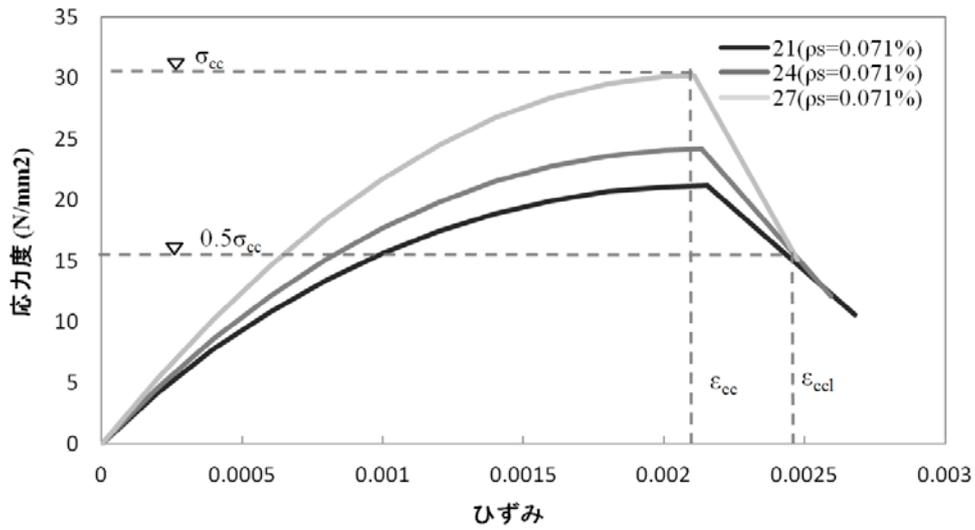
を設定して、図化/比較している（SD390, SD490 では、其々の降伏強度をそのまま使用している）。読者は、各パラメーターの増減が、コンクリートの応力-ひずみ曲線にどのような影響を与えているか考察されたい。コンクリートの応力上昇域、応力ピーク点、下降域、限界圧縮ひずみ、の 4 点がポイントになる。



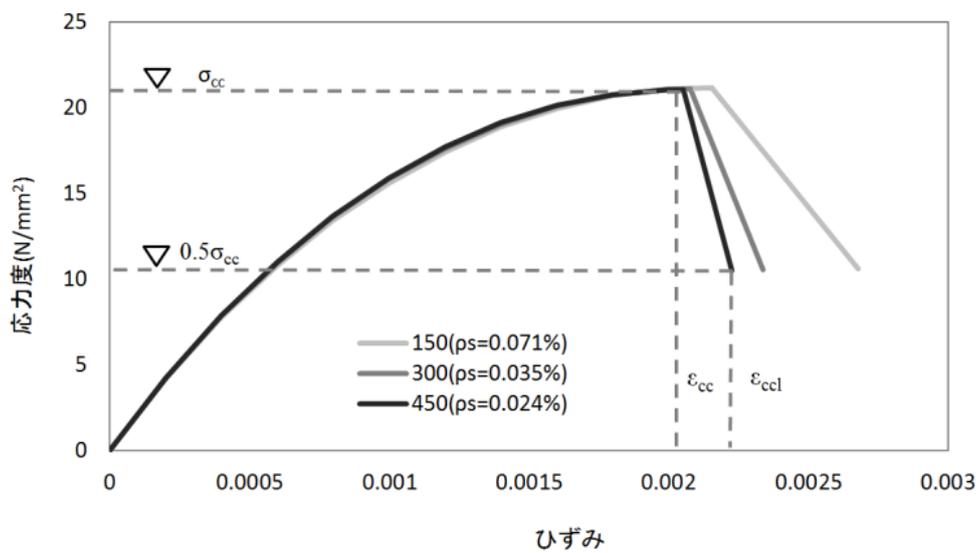
(a) 横拘束筋の鉄筋径 ($\sigma_{cc}=21\text{N/mm}^2$)



(b) 横拘束筋の降伏点 ($\sigma_{cc}=21\text{N/mm}^2$)



(c) コンクリート圧縮強度



(d) 横拘束筋間隔 ($\sigma_{cc}=21\text{N/mm}^2$)

図-2 4例のパラメトリックシミュレーション結果

4. 柱部材における応力-ひずみ曲線

ここで、柱部材における鉄筋コンクリート断面の静的非線形解析を実行して、断面各所におけるコンクリートの応力-ひずみ関係を観察したい（これにより、実現象に近い非線形挙動と拘束効果を読み解くことができる）。

図3は、解析対象とした鉄筋コンクリート断面（矩形断面、圧縮鉄筋/引張鉄筋2段配筋、側方鉄筋配置）、および得られた応力-ひずみ曲線（包絡線とヒステリシス）を示している。

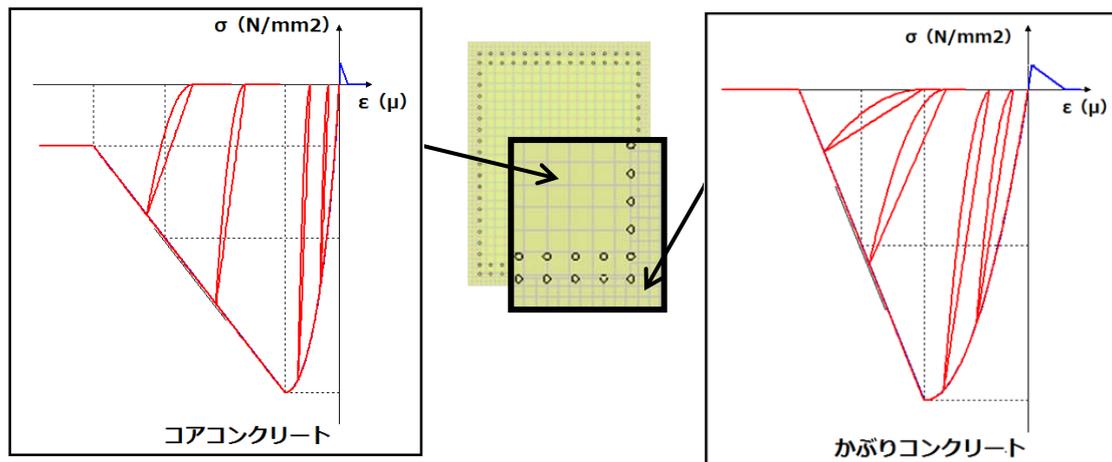


図-3 コンクリートの応力-ひずみ曲線（鉄筋コンクリートの矩形断面）

道路橋示方書における応力-ひずみ曲線は、Hoshikuma モデルとも呼ばれ[4]、横拘束効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ曲線（骨格曲線とヒステリシス（载荷/除荷/再载荷特性））を適確に表すものである。ここでは、コアコンクリート（横拘束筋内側のコンクリート）とかぶりコンクリートの両者を示したもので、前者のコアコンクリートの方が、上昇域にて剛性が高く、かつ、（応力ピーク以降の）応力下降域にて勾配が小さい（すなわち靱性が増加している）ことを読取ることができる。

コアコンクリートは、横拘束筋に囲まれ正しく‘Confined Concrete’として機能していることが分かる。靱性（粘り強さ）の要であり、例えば、強震時において、コアコンクリートのひずみが限界状態ひずみに達することは、そのまま柱部材の崩壊に繋がる。

参考文献

- [1] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）平成 14 年 3 月
- [2] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）平成 24 年 3 月
- [3] 鉄筋コンクリート構造物の耐震設計講座：第 2 講：鉄筋コンクリートの基本特性：非線形挙動と耐荷機構, 1 章 単軸挙動と拘束コンクリートの力学挙動, pp.6-13
http://www.engineering-eye.com/rpt/w012_yoshikawa/index.html
- [4] 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.520/ V-28, 1-11 (1995)