

電力技術整備(株) 正員・紅林 誠
電力中央研究所 正員 青柳征夫
防衛大学校 正員 佐藤良一

1. まえがき

最近 原子炉用コンクリート格納容器やLNG貯蔵用コンクリートタンクの設計・施工がまかんに行われるようである。この種のコンクリート構造物は 温度勾配による曲げモーメントを受けるが そのモーメントの大きさは 主に平均曲げ剛性に支配されると指摘されている。曲げモーメントのみが負荷された場合については すでに筆者らは一解析手法を述べた。¹⁾ 本報告は プレストレスあるいは凍結圧等を想定し 曲げモーメントおよび軸力と曲げモーメントを負荷した二つのケースについて 鉄筋とコンクリートの付着応力-相対すべり曲線を用いて解析した平均曲げ剛性を 実験値と比較することにより検討をしたものである。

2. 解析

2-1 仮定

- i) 鉄筋とコンクリートの $\tau_{xy}-\delta x$ 曲線は 参考文献¹⁾と同様 次式の曲線式に従う。 $\tau_{xy} = \alpha \sqrt{\sigma_u A \delta x^N}$ $\alpha: 1.15$ $A: 0.37(0.35)$ $N: 0.43$ (1)
- ii) 平面保持の仮定は 圧縮部コンクリートと鉄筋に対して成立する。
- iii) 引張部のコンクリートの面積は 位置には独立である。

2-2 考え方を式で誘導

軸力が導入された鉄筋コンクリート部材に曲げモーメントが負荷されると 応力分布は 図-1 のようになる。軸力が賦与された鉄筋コンクリート部材に引かれモーメント以上のモーメントが負荷された場合 外力と内力のつりあいを考えれば 引かれを生じてはいない断面の鉄筋の応力は その位置のコンクリートの応力より大きいと考えられ (図-1) さらに 引かれ係数が増加する段階では 引かれ間中央断面の引張鉄コンクリートの応力は 引かれの発生に対応して曲げ強度に達すると考えられる。それ故 図-1 に示すように 引かれ間中央断面の引張縁コンクリートの応力は 常に曲げ強度に達した状態にあると仮定する。これらの考えに従えば 釣り合い、適合条件から引かれ間中央断面下の鉄筋応力は 式(2), (3)より求められる。また曲げモーメントは 式(4)より求められる。

$$kd = \frac{F}{1-F} \left\{ \left[(1-nF) A_s / b h - P / \sigma_{ubh} - 1 \right] + \sqrt{\left[(1-nF) A_s / b h - P / \sigma_{ubh} - 1 \right]^2 + \frac{2(1-F)}{F} \cdot \frac{d}{h} \left\{ (nF-1) A_s / b h + k / z_d + P d / \sigma_{ubh} \right\}} \right\} h \quad (2)$$

$$E_{cs} = \{ d(1-k) / (h - kd) \} \cdot E_{bu} = F E_{ss} \quad (3)$$

$$M = \frac{1}{3} b \sigma_c^I (kd)^2 + (n/F - 1) \sigma_c^I A_s d (1-k) + \frac{1}{3} b \sigma_{bu} (h - kd)^2 + P d (k_0 - k) \quad (4)$$

引かれ断面下の鉄筋の応力は 既述の方法により求められるが この断面から引かれ間中央断面までの鉄筋およびその位置下のコンクリートの応力分布が明らかにされれば 部材の平均剛性が求むることができ。付着応力と位置の関係を Noakowski²⁾ に従えば 次式となる。

$$\tau_{xy} = R x^{\frac{2N}{1+N}} \quad (R: \text{定数}) \quad (5)$$

鉄筋およびコンクリートの任意の位置下の応力は 式(6)と引かれ面を境界条件とすることにより次式となる

$$\sigma_{sx} = E_{ss}^I + \frac{U_s}{A_s E_s} \int_0^x \tau_{xy} dx = E_{ss}^I \left\{ 1 + \frac{E_{ss}^I - E_{ss}^I}{E_{ss}^I} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\frac{1+N}{1-N}} \right\} \quad U_s: \text{鉄筋の母長}, A_s: \text{鉄筋の断面積} \quad (6)$$

$$\sigma_{cx} = E_{cs}^I - \frac{U_s}{K A_c E_c} \int_0^x \tau_{xy} dx = E_{cs}^I \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\frac{1+N}{1-N}} \right\} \quad (7)$$

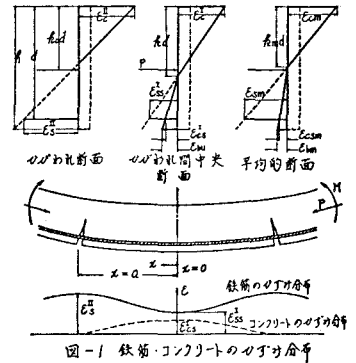


図-1 鉄筋・コンクリートの応力分布

平均ひびわれ間隔の1/2を意味する Q は 式(6), (7)を積分することから求めた相対すべりにより生じる付着 μ と式(11), (12)より以下のようになる。

$$Q = \left[\frac{1+N}{1-N} \cdot \frac{ds}{4} \cdot \frac{(E_s^I - E_{ss}^I)}{\alpha \bar{\sigma}_{cu} A (E_{cs}^I)^N \left\{ (1/F - 1) + (1-N)/2 \cdot (1/F \cdot E_s^I - E_{ss}^I / E_{ss}^I + 1) \right\}} \right]^{1/(1+N)} \quad ds: \text{鉄筋径} \quad (8)$$

また鉄筋の平均ひずみは 式(19)で与えられる。さらに ひびわれ間中央断面とひびわれ断面との平均的断面のひずみ分布を図-1に示すように仮定すれば 圧縮鉄コンクリートの平均ひずみおよび部材の平均曲率は 以下のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{sm} &= \frac{1}{a} \int_0^a \epsilon_{sx} dx = E_{ss}^I \left\{ 1 + (1-N)/2 \cdot (E_s^I - E_{ss}^I) / E_{ss}^I \right\} \\ k_{md} &= \frac{n}{1-F_m} \left\{ \left(\frac{F_m}{n} - 1 \right) \frac{A_s}{bh} - F_m/n - P/\bar{\sigma}_{sm}bh \right\} + \sqrt{\left(\frac{F_m}{n} - 1 \right) \frac{A_s}{bh} - F_m/n - P/\bar{\sigma}_{sm}bh}^2 + \frac{2(1-F_m)d}{n} \left\{ \left(\frac{F_m}{n} - 1 \right) \frac{A_s}{bh} + F_m/n + P/\bar{\sigma}_{sm}bh \right\} \\ M &= \frac{b \bar{\sigma}_{sm} (k_{md})^3}{3nd(k-k_m)} + (1-F_m/n) \bar{\sigma}_{sm} A_s d (k-k_m) + \frac{b \bar{\sigma}_{sm} F_m (k-k_{md})^3}{3nd(k-k_m)} + P d (k_0-k_m) \\ \epsilon_{cm} &= k_{md} \cdot \epsilon_{sm} / d (1-k_m) \quad 1/\rho = M/(EI)_m = (\epsilon_{sm} + \epsilon_{cm}) / d \end{aligned}$$

ただし $n = E_s/E_c$

3. 実験概要

使用した材料の試験成績は 表-1に示すとおりである。試験に供した部材の断面・形状寸法の一例および試験装置を図-2に示す。軸力は 4本のPC鋼棒を緊張することにより導入し 常に一定に保った。部材の平均曲率は 圧縮鉄より1cmの位置に10cm間隔で試験区間全域にわたって貼付したワイヤーストレインゲージと同間隔で鉄筋位置に貼付したコンタクトポイントの変形量を1/1000mmコンタクトゲージで測定することにより求めた。

4. 結果および考察

本解析結果を実験結果から求めた平均曲率と比較して図-3, 4に示す。計算値は とりわけ軸力を賦予した部材により一致をみており このことは軸力を与えた場合の方が 引張部コンクリートの寄与が著しいことを意味していると考えられる。本解析の問題点としてひびわれ発生以降においてひびわれ間中央断面の引張鉄コンクリートの応力を曲げ強度に置いておけるものと仮定していること、かぶりの影響を考慮していないこととがあるが 今後はこれらの点も検討してゆきたい。

5. 謝辞

本研究に際し協力していただいた金津、日下、伊藤氏をはじめ関係諸氏に感謝する。

参考文献

- 1) 佐藤, 青柳, 阿部 : 付着を考慮した鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性の評価について 第33回年講
- 2) Nowakowski, P : Bauingenieur 52 (1977)

表-1 材料の試験成績

	コンクリート					鉄筋 (SD35 JIS)	
	W/C (%)	$\bar{\sigma}_{cu}$ (kg/cm ²)	$\bar{\sigma}_{tu}$ (kg/cm ²)	$\bar{\sigma}_{tu}$ (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)	$\bar{\sigma}_{sy}$ (kg/mm ²)	E_s (kg/mm ²)
軸力+曲げ	43	464	68.7	34.3	3.30	39.0	19.7
曲げ	43	519	62.7	36.5	3.62		

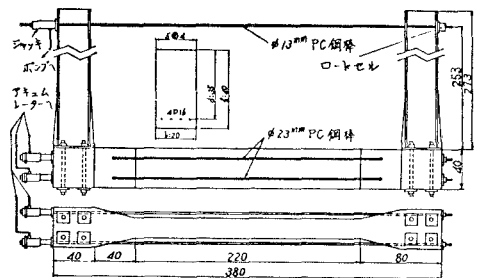


図-2 部材の断面・形状寸法および試験装置 (単位: cm)

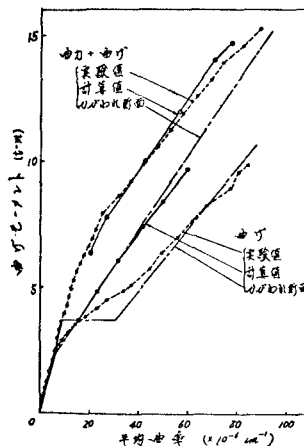


図-3 M-1/ρ 曲線

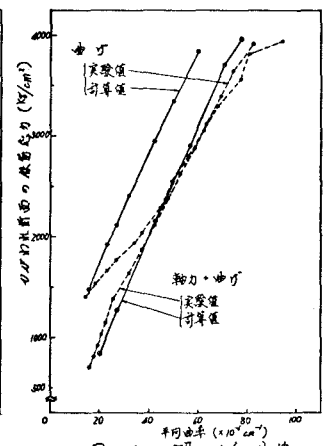


図-4 ϵ_s^I - 1/ρ 曲線