

鋼繊維補強コンクリートトンネル覆工体の ひび割れ幅に関する考察

Study on crack width of SFRC tunnel lining

川口 博行

Hiroyuki Kawaguchi

清水建設株式会社, 土木東京支店 首都高大桥建設所 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目 2-3)

In late years, the number of tunnels adopting SFRC lining has increased to improve their quality and long-term durability. It is necessary to examine the crack width caused by design resultant force acting on the tunnel lining in order to discuss the quality and the long-term durability of the tunnels. A design method using tensile strength due to bending obtained in consideration of the crack width-crack depth relation and the influence of material size is proposed as one of the design methods of the SFRC tunnel lining. According to this proposed design method, a calculation method of the crack width and distribution of the crack width in areas surrounded by the M-N curves are examined from a standpoint of the tunnel lining design.

Key Words: steel fiber reinforced concrete, tunnel lining, crack width

キーワード: 鋼繊維補強コンクリート, トンネル覆工体, ひび割れ幅

1. まえがき

鋼繊維補強コンクリート (以下SFRCと略す) では, 無筋コンクリートに比べて曲げ強度, 引張強度, せん断強度などの強度特性が改善される. 特に曲げタフネスが大きく向上する. 一方, 地中の環状構造物であるトンネル覆工体は, その一部にひび割れが生じて, 地山がトンネル覆工体の変形を十分に拘束する状況であるならば, トンネル覆工体全体が破壊することはない. そこでSFRCの曲げタフネスに着目し, ひび割れを許容するトンネル覆工体の設計がなされてきている¹⁾.

道路トンネルにおいては, 支保効果を期待し規定の曲げタフネス性能を確保したSFRCを吹付け^{2,3)}たり, 剥離・剥落対策として打ち込みSFRC⁴⁾が覆工体に用いられている. また, 鉄道トンネルにおいては場所打ちライニング工法として設計断面力に対するSFRCの耐力評価方法⁵⁾が確立されている. さらにSFRCのもつ特性を有効にトンネル覆工体設計に反映させることを目的に, 覆工部材に生ずるひび割れ幅を3段階に規定し, 各段階で永久覆工体, 永久覆工体の一部, 仮設部材としてSFRCを用いる考え方⁶⁾も提案されている.

この提案では, 最大荷重時の曲げ強度あるいは曲げタフネスに代わり, 規定されたひび割れ幅とひび割れ深さの関係および部材寸法効果を考慮したSFRCの引張強度を用いた設計を採用している. また, 覆工体の長期耐久性を

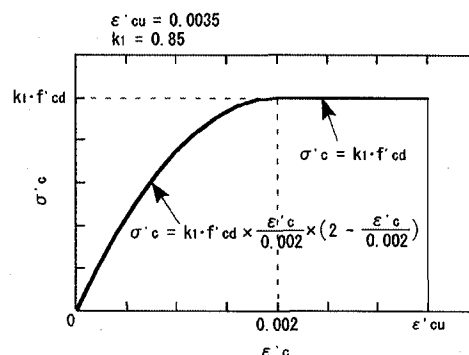


図-1 圧縮応力-ひずみ曲線

確保する観点から限界ひび割れ幅を定め, その限界ひび割れ幅以内であれば永久覆工体としての採用が可能としている. このためトンネル覆工体に曲げモーメントと軸力が作用したときに覆工体にどの程度のひび割れが生ずるかを把握することが重要となる.

本研究は上記の文献6)に規定されている, ひび割れ幅についての基本的な考え方および曲げ引張強度 (以降, 特に断らない限り引張強度という) による設計法に基づき, 曲げモーメントと軸力によりトンネル覆工体に生ずるひび割れ幅の算定方法の誘導, M-N曲線上およびその内部でのひび割れ幅の分布状況, さらに計算値と実験値の比較などについて, トンネル覆工体設計の立場から研究を行ったものである.

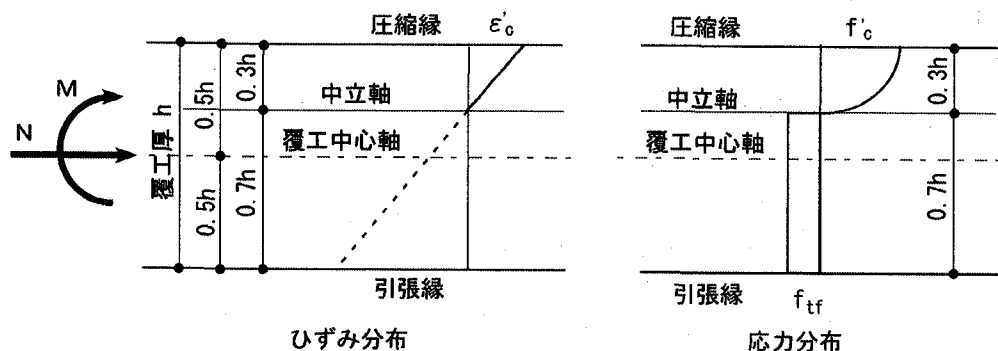


図-2 ひずみ分布と応力分布

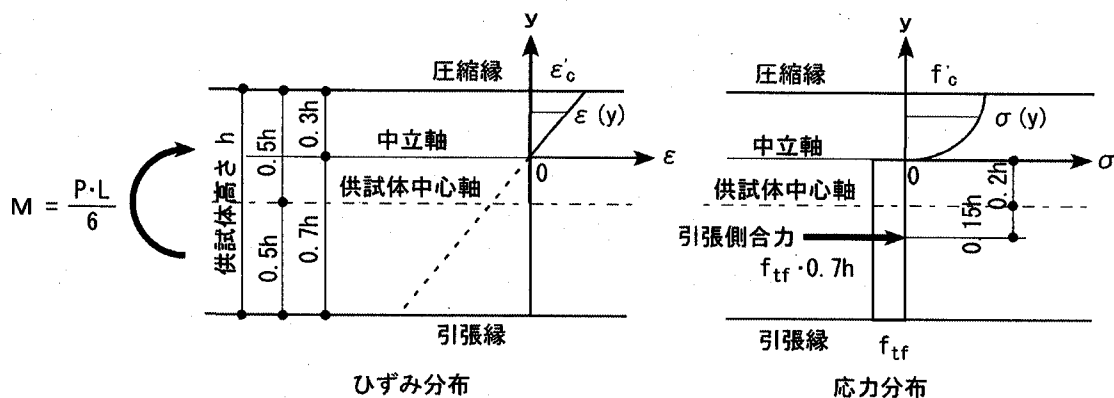


図-3 引張強度算出時のひずみ分布と応力分布

2. 引張強度およびM-N性能曲線の算定における仮定

引張強度およびM-N性能曲線の算定は以下の仮定^{5,6)}に基づいて行う。

- ① 圧縮側の維ひずみは断面の中立軸からの距離に比例する。
- ② SFRCの圧縮応力-ひずみ曲線は、普通コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線と同じものとし、図-1に示す「コンクリート標準示方書」の二次曲線タイプによる。
- ③ ひび割れ面で鋼繊維が受け持つ引張応力は、設計上の簡便さを考慮し、ひび割れ深さに対し一様に分布するものとする。したがって断面の応力分布は図-2に示すものとする。
- ④ 中立軸はひび割れ先端の位置とし、ひび割れ深さは部材厚の7割までとする。引張強度および限界ひび割れ幅 W_{ef} の算出においては中立軸の位置を部材厚の7割(部材厚の3割が圧縮断面, 7割が引張断面)とする。
- ⑤ 鋼繊維が受け持つ引張強度の想定されるひび割れ面について、限界ひび割れ幅を考慮する。限界ひび割れ幅 W_{ef} は次式により表される。

$$W_{ef} = 0.7h \times \varepsilon'_{cu} \times \frac{0.7}{0.3} \quad (1)$$

ここに、 h : 覆工厚、 ε'_{cu} : 圧縮縁の限界ひずみで0.0035

である。15×15×53cmの曲げ試験供試体の場合は $W_{ef}=0.86\text{mm}$ となる。

3. 引張強度の算出方法

SFRCの引張強度の計算式は文献6)にも結果が示されているが、ここでは算出方法から述べることにする。

SFRCの引張強度は、図-3に示すひずみ分布と応力分布を仮定し、曲げ試験結果から得られる曲げモーメント $M (=PL/6)$ および軸圧縮力 $N (=0)$ のつり合いの式(2)、(3)から求める。

$$M = \frac{PL}{6} = f_y \cdot 0.7h \cdot 0.15h \cdot b + b \int_0^{0.3h} \sigma(y)(y+0.2h)dy \quad (2)$$

$$N = f_y \cdot 0.7h \cdot b - b \int_0^{0.3h} \sigma(y)dy = 0 \quad (3)$$

ここに、

$$\sigma(y) = k_1 \cdot f'_c \cdot \frac{\varepsilon(y)}{0.002} \cdot \left(2 - \frac{\varepsilon(y)}{0.002}\right) \quad (4)$$

$$\varepsilon(y) = \frac{\varepsilon'_c}{0.3h} \cdot y \quad (5)$$

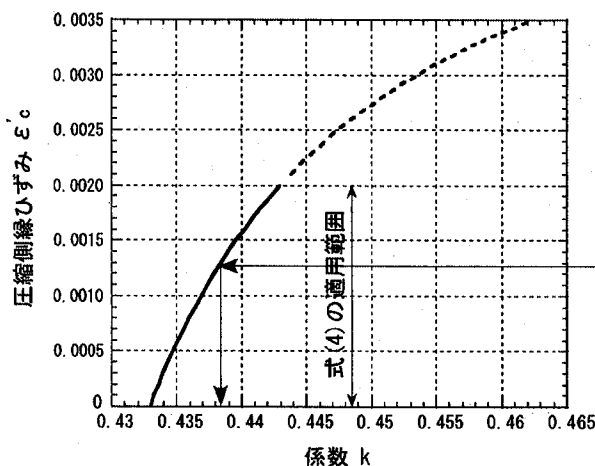


図-4 圧縮側縁ひずみと係数k

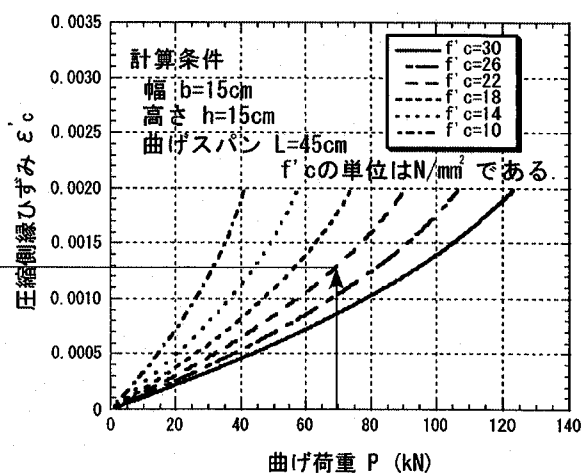


図-5 曲げ荷重と圧縮側縁ひずみ

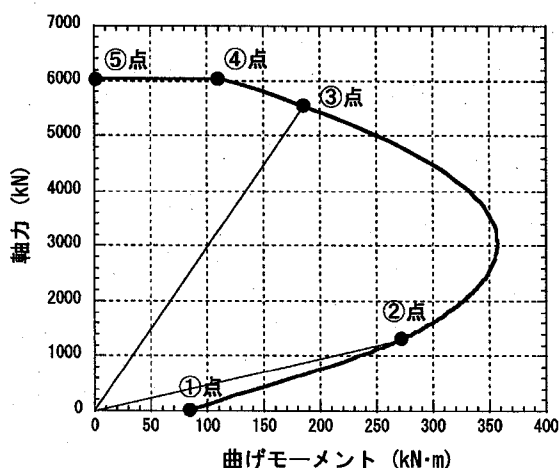


図-6 M-N性能曲線の例

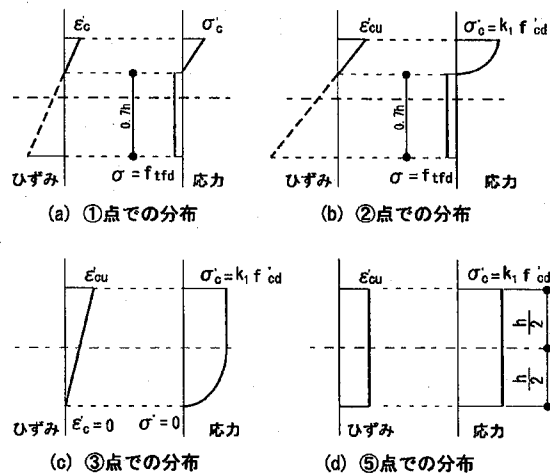


図-7 M-N性能曲線の各点の応力分布とひずみ分布

P: 曲げ荷重, L: 曲げ試験の供試体スパン長, h: 供試体高さ, b: 供試体幅, f_{ft} : 引張強度, ε'_c : 圧縮縁におけるひずみ, f_c : 圧縮縁における応力, y: 中立軸からの距離, $\sigma(y)$: 距離 y における応力, $\varepsilon(y)$: 距離 y におけるひずみである。また、式(4)の適用範囲は $\varepsilon(y) \leq 0.002$ である。

式(2)および式(3)には ε'_c , f_{ft} および f_c の3つの変数があるが、条件式は2つであるので解析的に f_{ft} を求めることはできない。そこでまず式(3)を f_c について解くと(6)式になる。

$$f_c = \frac{f_{ft}}{\varepsilon'_c (182.143 - 30357.1 \varepsilon'_c)} \quad (6)$$

式(6)を式(2)に代入して f_{ft} について解くと(7)式が求められる。

$$f_{ft} = \frac{-0.166667 \times (0.006 - \varepsilon'_c)}{-0.00231 + 0.4025 \varepsilon'_c} \cdot \frac{PL}{bh^2}$$

$$= k \cdot \frac{PL}{bh^2} \quad (7)$$

$$\text{ここに、} k = \frac{-0.166667 \times (0.006 - \varepsilon'_c)}{-0.00231 + 0.4025 \varepsilon'_c}$$

k と ε'_c の関係をグラフ化したものを図-4 に示す。

一方、一般の曲げ試験では $h=15\text{cm}$, $b=15\text{cm}$, $L=45\text{cm}$ であるので、式(6)を変形した式

$$f_{ft} = (182.143 - 30357.1 \varepsilon'_c) \varepsilon'_c \cdot f_c \quad (8)$$

を式(2)に代入し、また SFRC の圧縮強度を仮定し、曲げ荷重 P と ε'_c の関係を求めると図-5 が得られる。

具体的な引張強度の求め方は次の手順となる。

- ① $15 \times 15 \times 53\text{cm}$ の供試体の曲げ試験により限界ひび割れ幅 $W_a=0.86\text{mm}$ に対応する曲げ荷重 P を求める。
- ② 図-5 から SFRC の圧縮強度 f_c に相当する曲線を選び、曲げ荷重 P に対応する圧縮縁におけるひずみ ε'_c を求め

る。

③図-4 から圧縮縁におけるひずみ ε'_c に対応する係数 k を求める。

④式(7)により引張強度 f_t を求める。

なお、覆工厚が 15cm と異なる場合には寸法効果の影響を考慮した補正^{5),6)}が必要である。

4. 覆工耐力の評価方法

SFRC の設計断面耐力は M-N 性能曲線で表される。M-N 性能曲線については文献 4) および 5) に詳しく述べられているので、ここでは後述するひび割れ幅との関係を明確にするために M-N 性能曲線の例をあげ、その概要について記述する。

図-6 は、覆工幅 100cm、覆工厚 40cm、設計基準強度 30.0N/mm²、設計圧縮強度 23.1N/mm²、設計引張強度 1.5N/mm²、曲げ部材係数 1.15、圧縮部材係数 1.3 の条件で M-N 性能曲線を計算したものである。また、点①、②、③および⑤におけるひずみ分布と応力分布を図-7 に示す。

図-6 における各範囲の意味は次の通りである。

①点-②点の曲線：引張破壊の範囲で圧縮側縁ひずみが限界圧縮ひずみ 0.0035 以下である

②点-③点-④点-⑤点の曲線：圧縮破壊の範囲で圧縮側縁ひずみが限界圧縮ひずみ 0.0035 である

③点-④点-⑤点の曲線：全断面圧縮範囲

④点-⑤点の曲線：設計圧縮力の上限值で決まる範囲 (圧縮部材係数を採用)

①点-②点-③点-④点の曲線：曲げ部材係数を採用する範囲

5. 耐久性の評価基準

文献 6) によると SFRC 覆工体に対する長期耐久性を確保する観点からの限界ひび割れ幅として 0.25mm と定められている。この限界ひび割れ幅は、構造物の機能・重要度・使用目的などの他、構造物がおかれる環境条件を考慮して定める必要があるが耐久性に関する資料が十分でない現在、設計の便宜を図るために、暫定的に定められた値である。

SFRC 覆工体を永久覆工体として設計する場合には、覆工体に生ずるひび割れ幅をこの限界ひび割れ幅以下に抑える必要がある。

現状では SFRC 覆工体に対する具体的なひび割れ幅の基準が他にないことから、本研究においてもこの限界ひび割れ幅を基準とする。

6. ひび割れ幅の算出方法

つぎに設計断面力が作用した場合に SFRC 覆工体に生ずるひび割れ幅の算定方法を示す。

覆工体内のひずみ分布と応力分布の状況は圧縮縁ひずみ ε'_c の値によって二つに分けられ図-8 のように表され

る。図-8 において、 X_1 ：中立軸の位置、 X_2 ：圧縮ひずみが 0.002 になる位置 (応力-ひずみ曲線が放物線から直線に変化する位置)、 α ：ひずみ直線の勾配、 β ：ひずみ直線が覆工中心軸を横切る位置、 h ：覆工厚、 f_{cd} ：SFRC の設計圧縮応力度、 f_{td} ：SFRC の設計引張応力度、 k_1 ：0.85 である。

b ：覆工幅、 γ_b ：部材係数、 ε'_{cu} ：限界圧縮ひずみ 0.0035 とし、圧縮ひずみ $\varepsilon(y)$ が式(9)で表されるものとする。

$$\varepsilon(y) = \alpha y + \beta \quad (9)$$

圧縮応力部は圧縮ひずみの状況により放物線部と直線部に分かれるので、圧縮側では曲げモーメントと軸力を放物線部と直線部に分けて計算する。

圧縮側放物線部において圧縮応力は次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma'_c(y) &= k_1 \cdot f'_{cd} \cdot \frac{\varepsilon(y)}{0.002} \cdot \left(2 - \frac{\varepsilon(y)}{0.002} \right) \\ &= \frac{k_1 \cdot f'_{cd}}{0.002^2} \cdot \left\{ 2 \times 0.002 \times (\alpha y + \beta) - \alpha^2 y^2 \right. \\ &\quad \left. - 2\alpha\beta y - \beta^2 \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

放物線部の圧縮応力による曲げモーメント M_p ：

$$\begin{aligned} M_p &= \frac{1}{\gamma_b} \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma'_c(y) \cdot b \cdot y \cdot dy \\ &= \frac{b}{\gamma_b} \int_{x_1}^{x_2} \sigma'_c(y) \cdot y \cdot dy \\ &= \frac{b}{\gamma_b} \cdot \frac{k_1 \cdot f'_{cd}}{0.002^2} \int_{x_1}^{x_2} \left\{ 2 \times 0.002 \times (\alpha y^2 + \beta y) \right. \\ &\quad \left. - \alpha^2 y^3 - 2\alpha\beta y^2 - \beta^2 y \right\} dy \end{aligned}$$

ここで、

$$C_0 = \frac{b}{\gamma_b} \cdot \frac{k_1 \cdot f'_{cd}}{0.002^2}$$

$$C_{m1} = 2 \times 0.002 \times \frac{\alpha}{3}$$

$$C_{m2} = 2 \times 0.002 \times \frac{\beta}{2}$$

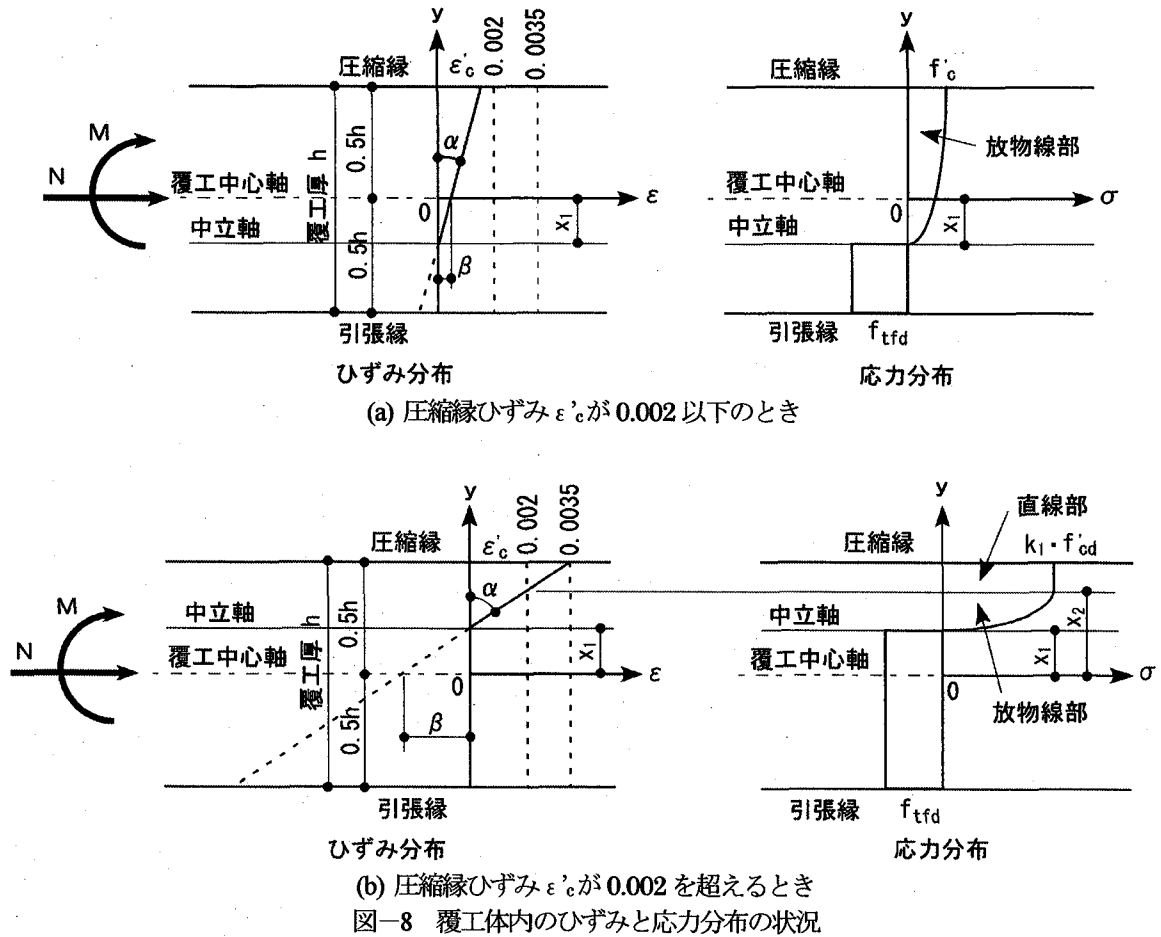
$$C_{m3} = -\frac{\alpha^2}{4}$$

$$C_{m4} = -\frac{2}{3} \alpha \beta$$

$$C_{m5} = -\frac{\beta^2}{2}$$

とおくと、

$$M_p = C_0 \{ C_{m1} (X_2^3 - X_1^3) + C_{m2} (X_2^2 - X_1^2) \}$$



$$\begin{aligned}
 &+C_{m3}(X_2^4-X_1^4)+C_{m4}(X_2^3-X_1^3) \\
 &+C_{m5}(X_2^2-X_1^2)\}
 \end{aligned}
 \quad (11)$$

放物線部の圧縮応力による軸力 N_p :

$$\begin{aligned}
 N_p &= \frac{1}{\gamma_b} \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma'_c(y) \cdot b \cdot dy \\
 &= \frac{b}{\gamma_b} \int_{x_1}^{x_2} \sigma'_c(y) dy \\
 &= \frac{b}{\gamma_b} \cdot \frac{k_1 \cdot f'_{cd}}{0.002^2} \int_{x_1}^{x_2} \{2 \times 0.002 \times (\alpha y + \beta) \\
 &\quad - \alpha^2 y^2 - 2\alpha\beta y - \beta^2\} dy
 \end{aligned}$$

ここで,

$$C_{m1} = 0.002\alpha$$

$$C_{m2} = 2 \times 0.002\beta$$

$$C_{m3} = -\frac{\alpha^2}{3}$$

$$C_{m4} = -\alpha\beta$$

$$C_{m5} = -\beta^2$$

とおくと,

$$\begin{aligned}
 N_p &= C_0 \{C_{m1}(X_2^2-X_1^2)+C_{m2}(X_2-X_1) \\
 &\quad +C_{m3}(X_2^3-X_1^3)+C_{m4}(X_2^2-X_1^2) \\
 &\quad +C_{m5}(X_2-X_1)\}
 \end{aligned}
 \quad (12)$$

圧縮側直線部において圧縮応力は次式で表される.

$$\sigma'_c(y) = k_1 \cdot f'_{cd}$$

直線部の圧縮応力による曲げモーメント M_l :

$$\begin{aligned}
 M_l &= \frac{1}{\gamma_b} \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma'_c(y) \cdot b \cdot y \cdot dy \\
 &= \frac{b}{\gamma_b} \cdot k_1 \cdot f'_{cd} \int_{x_2}^{0.5h} y \cdot dy \\
 &= \frac{b}{\gamma_b} \cdot k_1 \cdot f'_{cd} \cdot \frac{1}{2} \{(0.5h)^2 - X_2^2\}
 \end{aligned}
 \quad (13)$$

直線部の圧縮応力による軸力 N_l :

$$\begin{aligned}
N_t &= \frac{1}{\gamma_b} \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma_c'(y) \cdot b \cdot dy \\
&= \frac{b}{\gamma_b} \cdot k_1 \cdot f_{cd}' \int_{x_2}^{0.5h} dy \\
&= \frac{b}{\gamma_b} \cdot k_1 \cdot f_{cd}' \cdot (0.5h - X_2) \quad (14)
\end{aligned}$$

引張応力は直線部のみであるので次のように引張応力による曲げモーメントと軸力を求めることができる。

引張応力による曲げモーメント M_t :

$$\begin{aligned}
M_t &= -\frac{1}{\gamma_b} \int_{-0.5h}^{0.5h} f_{yd} \cdot b \cdot y \cdot dy \\
&= -\frac{b}{\gamma_b} \cdot f_{yd} \int_{-0.5h}^{x_1} y \cdot dy \\
&= -\frac{b}{\gamma_b} \cdot f_{yd} \cdot \frac{1}{2} \{X_1^2 - (0.5h)^2\} \quad (15)
\end{aligned}$$

引張応力による軸力 N_t :

$$\begin{aligned}
N_t &= -\frac{1}{\gamma_b} \int_{-0.5h}^{0.5h} f_{yd} \cdot b \cdot dy \\
&= -\frac{b}{\gamma_b} \cdot f_{yd} \int_{-0.5h}^{x_1} dy \\
&= -\frac{b}{\gamma_b} \cdot f_{yd} \cdot (X_1 + 0.5h) \quad (16)
\end{aligned}$$

以上により外力による曲げモーメント M と軸力 N は次のように表される。

$$M = M_p + M_t + M_i \quad (17)$$

$$N = N_p + N_t + N_i \quad (18)$$

式(17), (18)において圧縮縁ひずみ ϵ'_c が 0.002 以下のときは $M_i=0$, $N_i=0$ とする (図-8 参照)。

式(17), (18)を満足する α と β を求めると中立軸の位置 X_1 は式(19)で、また、ひび割れ幅 W は中立軸からの距離に比例するものとする式(20)により求めることができる。

$$X_1 = -\frac{\beta}{\alpha} \quad (19)$$

$$W = (0.5h \cdot \alpha - \beta) \cdot (0.5h + X_1) \quad (20)$$

このようにして外力による曲げモーメント M と軸力 N が作用したときに SFR C 覆工体に生ずるひび割れ幅を求めることができる。ただし、このひび割れ幅は2章に示した仮定に基づくものであるから、覆工体に生ずる初期ひび割れ幅ではなく、図-2に示したひずみ分布と応力分布

状態におけるひび割れ幅であることに注意する必要がある。

図-9には計算例として4章に示した覆工体について、いくつかの点でひび割れ幅を計算したものを示している。

7. ひび割れ幅の分布状況

7.1 M-N性能曲線上でのひび割れ幅

6章で述べたひび割れ幅の計算式に基づき、4章に示した覆工体について、M-N性能曲線上の点でひび割れ幅を計算した結果を示す。

図-10は圧縮側縁ひずみ ϵ'_c の変化を示している。

図中の点番号は図-6のM-N性能曲線上における番号に対応している。圧縮側縁ひずみは軸力がゼロである①点で0.00038であり、②点の限界圧縮ひずみ0.0035まで増加し、その後一定となっている。

図-11は中立軸の位置の変化を示している。中立軸の位置は、覆工中心軸から中立軸までの距離を表し、符号は中立軸の位置が覆工中心軸より引張側にあるときに負、圧縮側にあるときに正としている。

①点-②点の範囲では中立軸の位置は0.2h (h: 覆工厚で、この場合0.2h=8.0cm) にあり、圧縮側縁ひずみが限界圧縮ひずみ0.0035となると中立軸の位置が引張側に移動し始めることがわかる。

図-12はひび割れ幅の変化を示している。①点でのひび割れ幅は0.25mm程度であり、曲げモーメントの増加とともにひび割れ幅は増加し、②点で最大ひび割れ幅2.29mm (これは覆工厚40cmの場合の限界ひび割れ幅 W_d である) まで達した後、減少に移り、③点でひび割れ幅がゼロとなることがわかる。

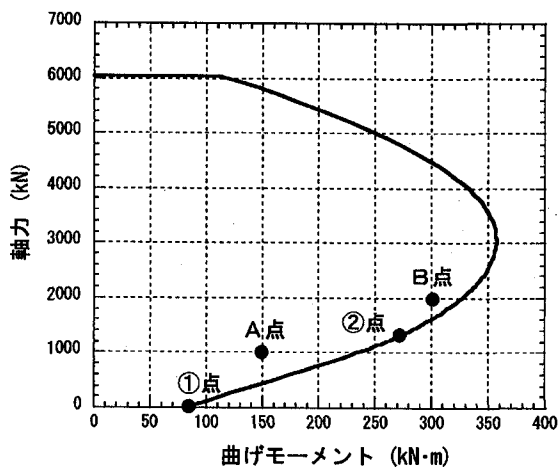
以上から次のことがわかる。

- ①M-N性能曲線上では、ひび割れ幅の最大値は式(1)で計算される限界ひび割れ幅 W_d である。
- ②N=0では、圧縮側縁ひずみが限界圧縮ひずみ0.0035に達せず、また、覆工内のひずみ直線の勾配が緩いため限界ひび割れ幅には達しない。

7.2 M-N性能曲線内部でのひび割れ幅

実際に設計されるSFR C覆工体の断面力はM-N性能曲線の内部に位置するのであるから、M-N性能曲線の内部におけるひび割れ幅の分布状態を知ることが意味がある。特に、覆工体に生ずるひび割れ幅が5章で述べた長期耐久性から定まる0.25mm以内か否かで永久覆工体として設計できるか否かが決まる。そこで、ここでは4章に示した覆工体について、設計断面力 M , N が作用したときのM-N性能曲線内部のひび割れ幅の分布を図-13に示した。

図-13でひび割れ幅0.25mmを表す破線より原点側に計算断面力があれば、発生ひび割れ幅は限界ひび割れ幅0.25mm以下となる。また、a点、b点は限界ひび割れ幅 $W=0.25\text{mm}$ を与えるM-N性能曲線上の点であり、M-N性能曲線内部の限界ひび割れ幅0.25mmを超えるひび



点	①点	②点
M (kN·m)	80.1	270.8
N (kN)	0.0	1293.4
α	0.00003171	0.00029160
β	-0.0002536	-0.0023335
圧縮縁ひずみ ε'_c	0.00038	0.00350
中立軸の位置 X_1 (cm)	8.00	8.00
ひび割れ幅 W (mm)	0.249	2.287

点	A点	B点
M (kN·m)	150.0	300.0
N (kN)	1000.0	2000.0
α	0.00002109	0.00008264
β	0.0001436	0.0000993
圧縮縁ひずみ ε'_c	0.00057	0.00178
中立軸の位置 X_1 (cm)	-6.81	-1.20
ひび割れ幅 W (mm)	0.037	0.292

図-9 ひび割れ幅の計算例

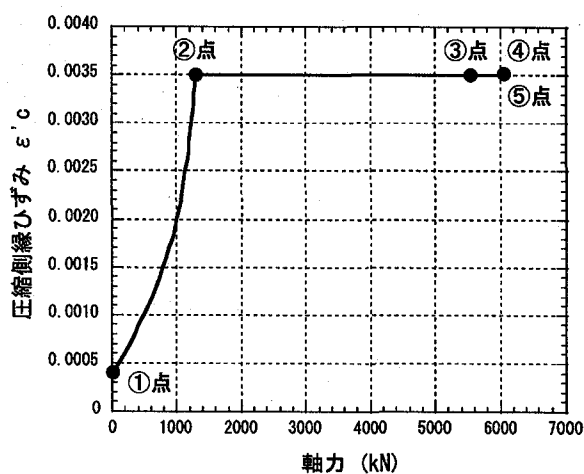
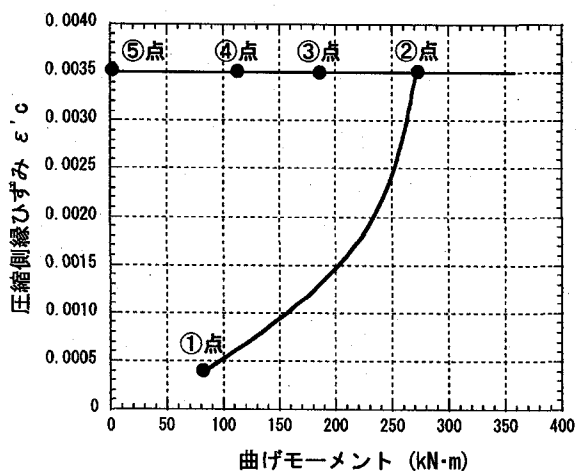


図-10 M-N性能曲線上の圧縮側縁ひずみの変化例

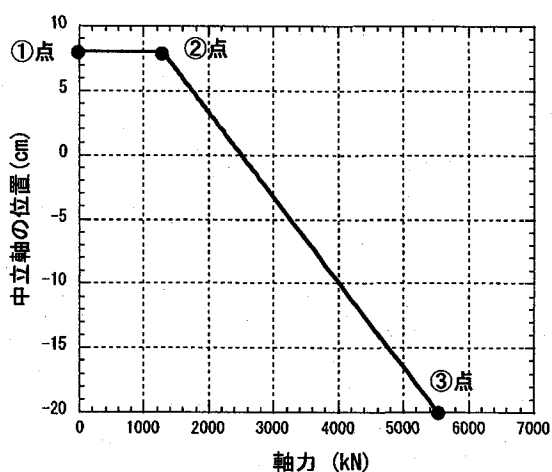
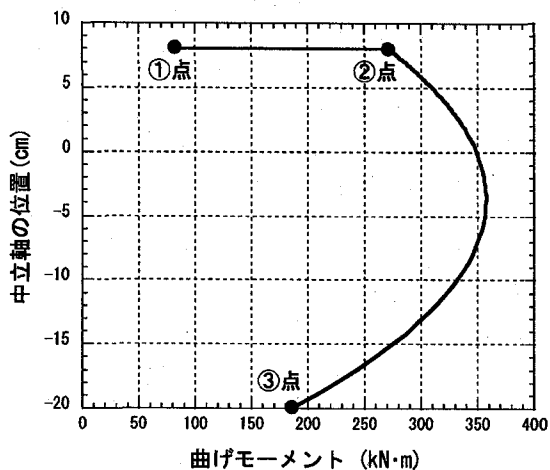


図-11 M-N性能曲線上の中立軸位置の変化例

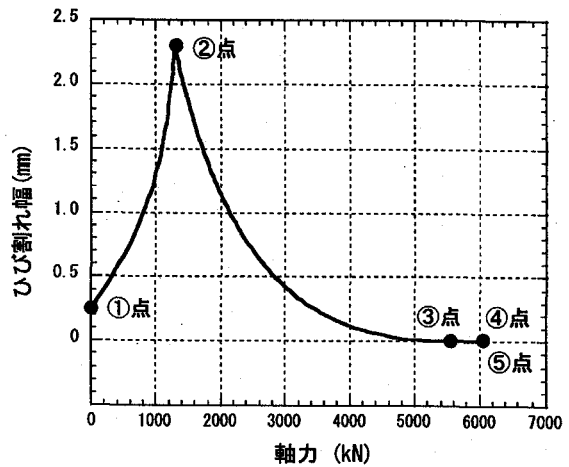
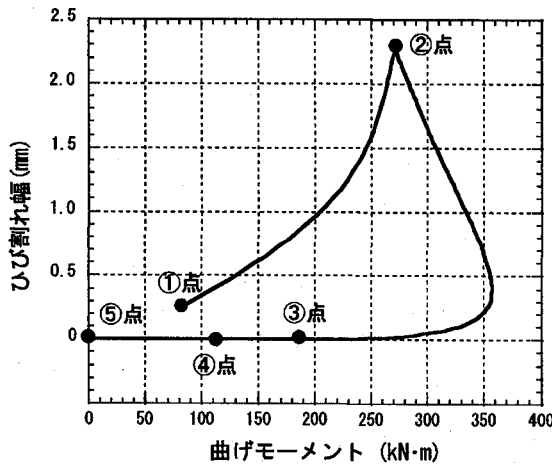


図-12 M-N性能曲線上のひび割れ幅の変化例

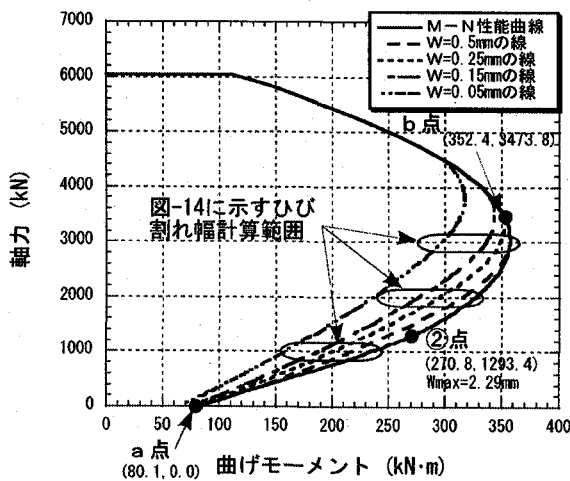


図-13 M-N性能曲線内部のひび割れ幅の分布例

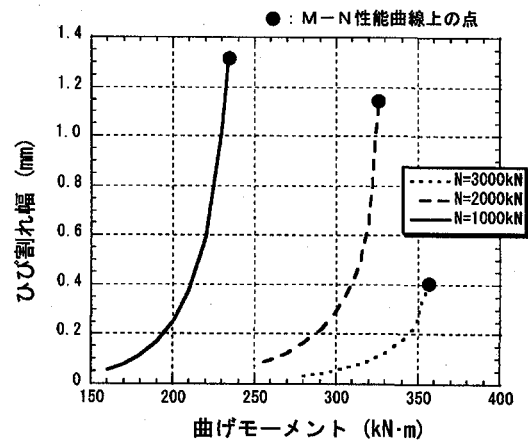


図-14 軸力を一定としたときのひび割れ幅の変化例

割れ幅の領域の境界点となっている。

図-14 には、図-13 の一部の範囲において軸力を一定としたときの曲げモーメントとひび割れ幅の関係を示した。この図から次のことがわかる。

- ①曲げモーメントが大きくなりM-N性能曲線に近づくにつれてひび割れ幅が急激に増大する。
- ②軸力が小さくなるに従い曲げモーメントの変化に伴うひび割れ幅の変化が増大する。

図-15 は、覆工幅 100cm、覆工厚 30cm、設計基準強度 22.0, 30.0N/mm²、設計圧縮強度 16.9, 23.1N/mm²、設計引張強度 1.0, 2.0N/mm²、曲げ部材係数 1.15、圧縮部材係数 1.3 の条件で、M-N性能曲線および限界ひび割れ幅 0.25mm を与える曲線を示している。破線と実線に挟まれる部分が限界ひび割れ幅 0.25mm を超える領域である。

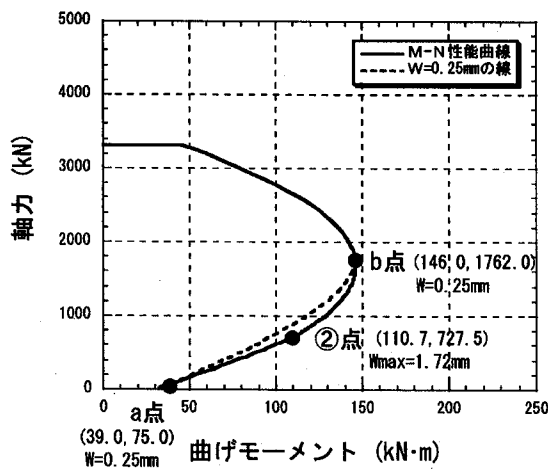
この図からM-N性能曲線の内部における限界ひび割れ幅 0.25mm を超える領域について次のことがいえる。

- ①限界ひび割れ幅 0.25mm を超える範囲は比較的少なく、M-N性能曲線のほぼ下半分（軸力が小さい部分）で、M-N性能曲線に沿った帯状となっている。
- ②設計基準強度が大きくなると a 点、b 点および W_{max} を与える②点の曲げモーメントと軸力はやや増加する。
- ③設計引張強度が大きくなると a 点、b 点および②点の曲げモーメントはやや増加するが軸力はやや減少する。

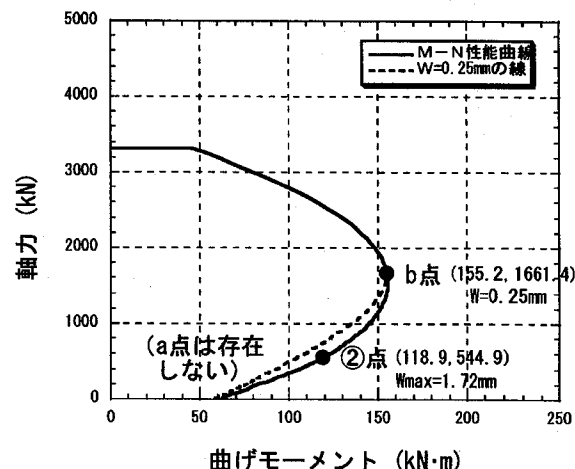
なお、ひび割れ幅は中立軸からの距離に比例すると仮定しているので、覆工厚が厚くなれば限界ひび割れ幅 0.25mm を超える割合は増加する。

8. 実験値と計算値の比較

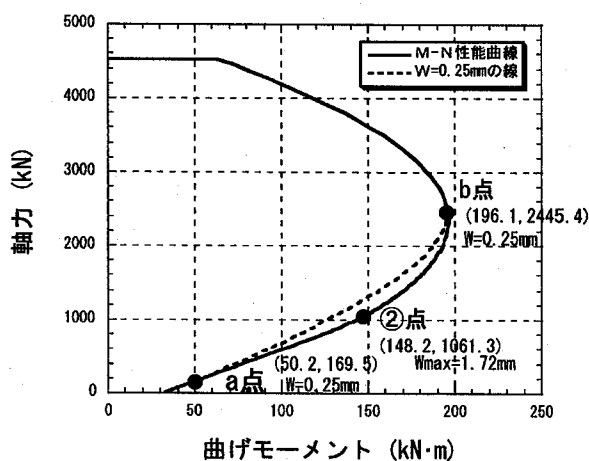
8.1 軸力が作用する場合



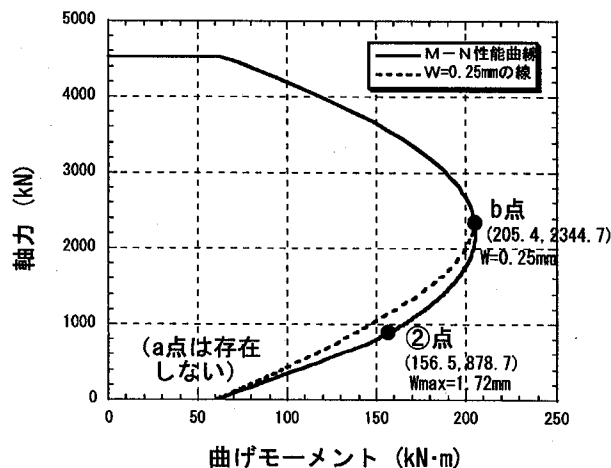
(a) $f_{cd}=16.9 \text{ N/mm}^2$, $f_{tfi}=1.0 \text{ N/mm}^2$



(b) $f_{cd}=16.9 \text{ N/mm}^2$, $f_{tfi}=2.0 \text{ N/mm}^2$



(c) $f_{cd}=23.1 \text{ N/mm}^2$, $f_{tfi}=1.0 \text{ N/mm}^2$



(d) $f_{cd}=23.1 \text{ N/mm}^2$, $f_{tfi}=2.0 \text{ N/mm}^2$

図-15 覆工厚 30cm のときの 0.25mm を超えるひび割れ幅の分布例

(1) 試験体と実験方法

試験体は、高流動コンクリートに 30mm の長さの鋼繊維を 1% (体積比) 入れたものである。圧縮強度は 64.1 N/mm^2 、 $15 \times 15 \times 53 \text{ cm}$ の曲げ試験供試体の引張強度は 2.8 N/mm^2 である。試験体は平板であり寸法を図-16 に示す。この試験体を用い、軸圧縮力を 3 水準 3.6 MN (9 N/mm^2)、 2.0 MN (5 N/mm^2)、 400 kN (1 N/mm^2) に設定して軸圧縮曲げ試験⁹⁾を行った。軸圧縮応力は試験体外側に対称配置した 4 本の PC 鋼棒 $\phi 40 \text{ mm}$ にセンターホール型ジャッキによって与え、曲げモーメント荷重は 3 等分点荷重でせん断スパン比 2.0 で作用させた。図-17 に荷重装置を示す。

(2) 実験結果と計算値

図-18 は、等曲げ区間内における最大ひび割れ幅と曲げモーメントの関係の実験値と計算値を示したものである。試験体の厚さが 40cm であるので、引

張強度は寸法効果を表す試験修正係数は「コンクリート標準示方書」⁷⁾に基づき 0.81 を採用し、引張強度を 2.3 N/mm^2 として計算している。なお、圧縮強度は 64.1 N/mm^2 である。最大曲げモーメント付近までは実験値と計算値は比較的近似しているといえよう。最大曲げモーメント付近以降、実験値はひび割れ幅の増加と共に曲げモーメントが低下しているが、計算値は低下していない。この理由は次のように考えられる。

曲げ荷重の増加と共にひび割れ深さは徐々に増加し、引張強度の算出において 2 章で仮定した部材厚の 70% を超え、部材厚の 80% 付近までで最大曲げモーメントとなり、それ以降ひび割れ深さは増加するが曲げモーメントは減少した。中央部鉛直変位約 30mm で荷重を打ち切ったときのひび割れ深さは部材厚の 81% ($N=3.6 \text{ MN}$ のとき)、85% ($N=2.0 \text{ MN}$) および 98% ($N=400 \text{ kN}$) であった。計算値は 2 章

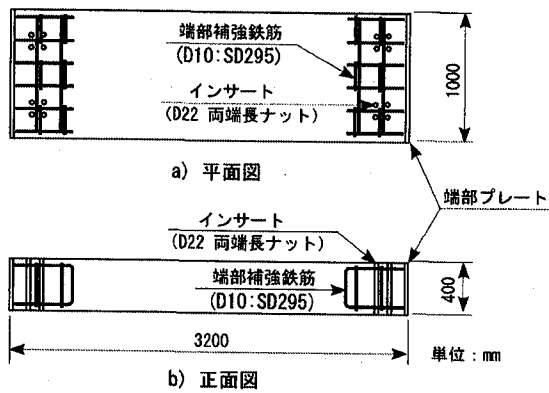


図-16 軸圧縮曲げ試験体寸法

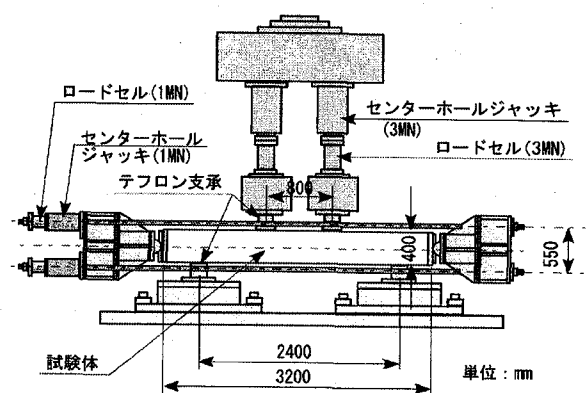


図-17 軸圧縮曲げ載荷装置

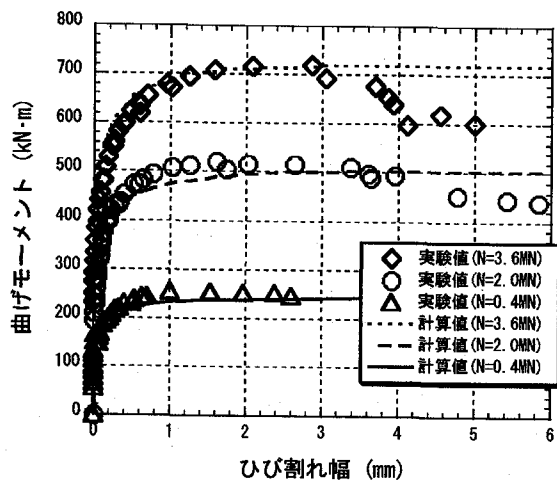


図-18 ひび割れ幅と曲げモーメントの関係
(軸力が作用する場合)

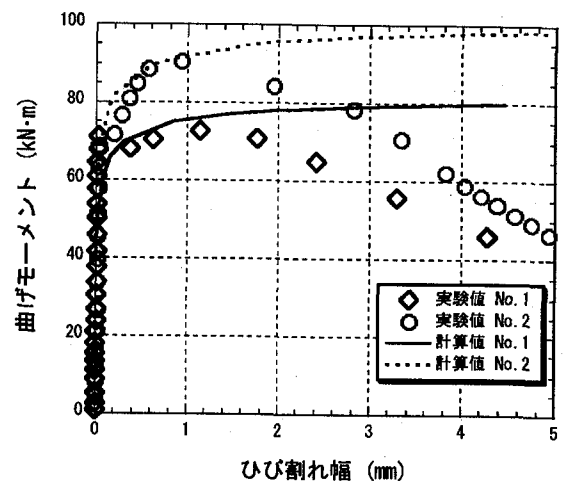


図-19 ひび割れ幅と曲げモーメントの関係
(軸力が作用しない場合)

で述べたように、ひび割れ面で鋼繊維が受け持つ引張応力はひび割れ深さに一様に分布するもの（ひび割れ幅にかかわらず一定）とし、ひび割れ深さ 70% のときの引張強度に基づき算出したものである。このためひび割れ幅の増加とともに曲げモーメントは増加するのみで低減しない結果となる。一方、実際にはひび割れ幅の増加とともに引張応力が低減するため、曲げモーメントも低下することになる。このことからひび割れ幅の大きい範囲では実験値と計算値の差異が増大しているものと考えられる。

8.2 軸力が作用しない場合

(1) 試験体と実験方法

軸力が作用しない場合は、上記試験体と同様な材料により $40 \times 40 \times 150 \text{cm}$ の試験体を作成し、通常の曲げ試験を行った。試験体の圧縮強度は 64.3N/mm^2 である。計算に用いる引張強度は、厚さ 40cm のときの限界ひび割れ幅 $W_{cf} = 2.29 \text{mm}$ のときの曲げ荷重に基いて算出し、試験体 No.1 で 2.7N/mm^2 、試験体 No.2 で 3.3N/mm^2 である。

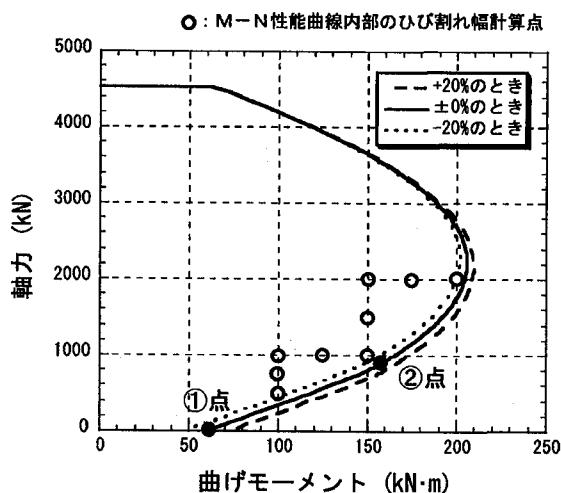
(2) 実験結果と計算値

図-19 は、等曲げ区間内における最大ひび割れ幅

と曲げモーメントの関係の実験値と計算値を示したものである。実験値 No.1 と No.2 は同一条件での実験結果であるが、曲げモーメントの最大値、ピークの現れ方など、かなりばらついている。試験体は同一配合・打設方法・養生方法で同時に作製されたものであるが、このように引張強度、曲げタフネス曲線はかなり変化することがある。これは試験体内の鋼繊維の分散性・配向性などに起因するものと考えられる。一方、軸力が作用しない場合の計算値は試験体の高さ・幅・圧縮強度および引張強度が定めれば決定される。

実験値と計算値を比較すると、計算値は実験値を必ずしも説明しきれていないが、大局的に見れば実験値の最大曲げモーメント付近より小さいひび割れ幅の範囲では、実験値と計算値には大差がないといえよう。実験値と計算値の差の理由は先に述べた試験体内の鋼繊維の分散性・配向性などに起因するものと考えられる。ひび割れ幅が大きい範囲では、軸力が作用する場合のところで述べたような理由で実験値と計算値に差が生じている。

軸力が作用しない場合の実験値と計算値の整合性については今後研究していく必要がある。

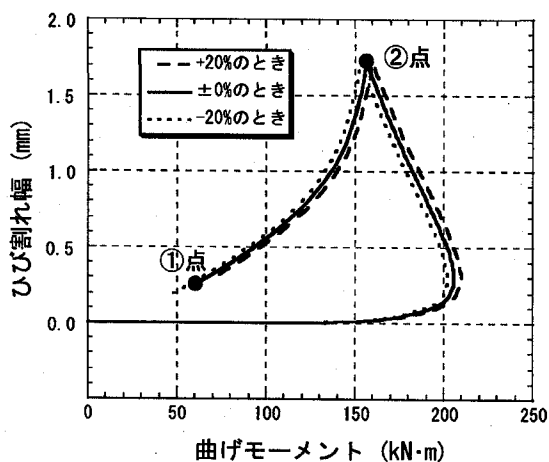


(a) M-N性能曲線の変化

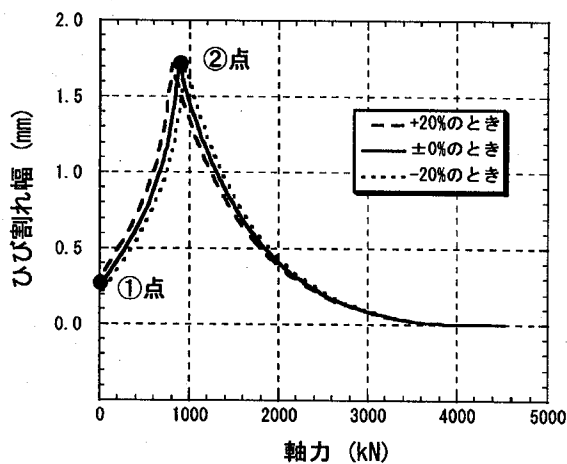
設計引張強度の変動	①点				
	ひび割れ幅		M		N
	mm	比率	kN·m	比率	kN
+20%	0.313	1.23	71.9	1.20	0
+10%	0.284	1.11	66.0	1.10	0
±0%	0.255	1.00	60.0	1.00	0
-10%	0.227	0.89	54.0	0.90	0
-20%	0.200	0.78	48.0	0.80	0

設計引張強度の変動	②点				
	ひび割れ幅		M		N
	mm	比率	kN·m	比率	kN
+20%	1.715	159.7	1.02	805.7	0.92
+10%	1.715	158.1	1.01	842.2	0.96
±0%	1.715	156.5	1.00	878.7	1.00
-10%	1.715	154.8	0.99	915.3	1.04
-20%	1.715	153.2	0.98	951.8	1.08

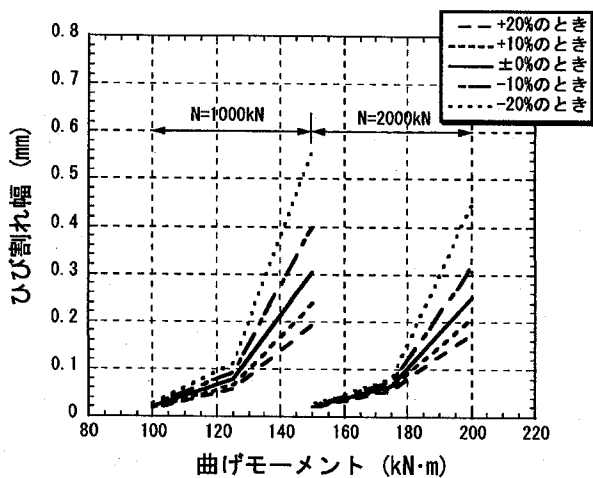
注, 比率は設計引張強度の変動±0%を基準としている。



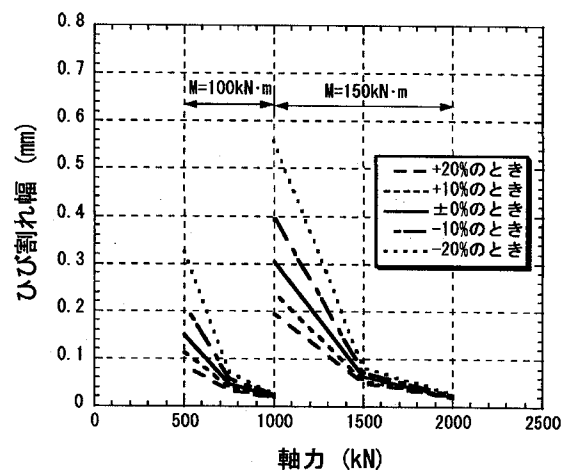
(b) 曲げモーメントとひび割れ幅の変化 (M-N性能曲線上)



(c) 軸力とひび割れ幅の変化 (M-N性能曲線上)



(d) 軸力とひび割れ幅の変化 (M-N性能曲線内部)



(e) 軸力とひび割れ幅の変化 (M-N性能曲線内部)

図-20 設計引張強度のばらつきに伴うひび割れ幅の変化

9. 引張強度のばらつきの影響

実験ではSFRC試験体内の鋼繊維の分散性・配向性などにより引張強度がかなりばらつくことが多い。そこで引張強度のばらつきが覆工体のひび割れ幅に与える影響をみるために、引張強度のばらつきに伴うM-N性能曲線上および曲線内部のひび割れ幅の変化について例をあげて述べる。

覆工幅 100cm, 覆工厚 30cm, 設計基準強度 30.0N/mm^2 , 設計圧縮強度 23.1N/mm^2 とし、設計引張強度を 2.0N/mm^2 を中心に $\pm 20\%$ の範囲にばらつくものとして計算したときのひび割れ幅の変化の状況を図-20に示す。なお、曲げ部材係数 1.15, 圧縮部材係数 1.3 である。

図-20 (b), (c)より、設計引張強度が大きくなると曲げモーメント-ひび割れ幅曲線は曲げモーメントが増加する方向に移動し、同一のひび割れ幅を与える曲げモーメントは大きくなること、また、軸力-ひび割れ幅曲線は軸力が小さくなる方向に移動し、同一のひび割れ幅を与える軸力は小さくなることがわかる。さらに次のことがいえる。

①点（軸力ゼロの点）について

- ・ひび割れ幅の変動は比較的大きく設計引張強度の $\pm 10\%$ の変動につき 11% 程度増減している。
- ・曲げモーメントの変動は比較的大きく設計引張強度の $\pm 10\%$ の変動につき 10% 程度増減している。

②点（最大ひび割れ幅を与える点）について

- ・ひび割れ幅は変化しない。
- ・曲げモーメントの変動は小さく設計引張強度の $\pm 10\%$ の変動につき 1% 程度増減している。
- ・軸力の変動は比較的小さく設計引張強度の $\pm 10\%$ の変動につき 4% 程度増減している。

図-20 (d), (e)より次のことがわかる。

- ①設計引張強度のばらつきがひび割れ幅に与える影響は、軸力を一定とすると曲げモーメントが大きくなるほど増大する。また、曲げモーメントを一定とすると軸力が小さくなるほど増大する。
- ②ひび割れ幅の増加率は設計引張強度の値が小さくなるほど増大する。

10. ま と め

基本的な仮定のもとにSFRC覆工体に曲げモーメントと軸力が作用したときに生ずるひび割れ幅について、トンネル覆工体設計という立場から研究した結果、次の事項が把握できた。

- ①曲げ試験時の曲げ荷重に対応した圧縮縁におけるひずみと、そのひずみに対応した係数をグラフより求めることにより、SFRC覆工体の限界ひび割れ時における引張強度を算出できる。
- ②覆工体に曲げモーメントと軸力が作用したときに生ずるひび割れ幅の算定方法が明確になった。これにより算定したひび割れ幅と長期耐久性から定まる限界ひび割

れ幅 0.25mm を比較することにより、SFRC覆工体の永久覆工体としての使用の可否を決定することができる。

- ③M-N性能曲線上のひび割れ幅の分布状況が明らかになった。最大ひび割れ幅は式(1)で求まる限界ひび割れ幅である。
- ④M-N性能曲線内部で限界ひび割れ幅 0.25mm を超えるひび割れ幅の領域は、M-N性能曲線のほぼ下半分で曲線に沿って帯状に分布している。また、軸力を一定としたとき、曲げモーメントがM-N性能曲線に近づくにつれてひび割れ幅が急激に増大する。
- ⑤ひび割れ幅の計算値は軸力が作用する場合はほぼ実験値を説明できるが、軸力が作用しない場合については実験値のばらつきが大きく、実験値と計算値の整合性について今後研究していく必要がある。
- ⑥設計引張強度のばらつきがひび割れ幅に与える影響は、軸力を一定にすると曲げモーメントが大きくなるほど、曲げモーメントを一定にすると軸力が小さくなるほど増大する。

なお、本研究の成果は文献6)の改訂版である文献1)に反映されている。

謝辞: 本研究をまとめるにあたり「鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル (トンネル編)」改訂委員会委員長 小泉淳早稲田大学教授および木村定雄金沢工業大学助教授より多大なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社) 日本鉄鋼連盟, SFRC構造設計施工研究会: 鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル トンネル編 [第2版], 技報堂出版, pp.240-243, pp.253-258, 2002.
- 2) 日本道路公団: 設計要領 第三集 トンネル本体工建設備 (第二東名・名神高速道路), pp.51-52, 2001.
- 3) 三谷浩二, 武内淳: 繊維補強吹付けコンクリートの使用と設計手法に関する検討, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.35, pp.56-63, 1998.
- 4) 日本道路公団: 鋼繊維補強覆工コンクリートトンネル施工管理基準 (案), pp.1-7, 1999.
- 5) 併進工法設計施工研究委員会: 併進工法設計施工法 (都市トンネル編), 吉井書店, pp.31-88, 1992.
- 6) (社) 鋼材倶楽部, SFRC構造設計施工研究会: 鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル (トンネル編), 技報堂出版, pp.22-49, 1995.
- 7) 土木学会: [平成8年制定] コンクリート標準示方書 設計編, p.90, 1996.
- 8) 川口博行, 長澤保紀, 栗田守朗, 渡辺真帆: ECLトンネルに用いる鋼繊維補強コンクリート, コンクリート工学, Vol.38, No.4, pp.16-21, 2000.

(2002年9月13日受付)