

鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工の耐力算定法

STUDY ON DESIGN SECTIONAL FORCE CAPACITY OF SFRC TUNNEL LININGS

鬼頭 誠*・峯本 守**・梶原 雄三*・松岡 茂***

Makoto KITO, Mamoru MINEMOTO, Yuzo KAJIWARA, Sigeru MATUOKA

With steel fiber reinforced concrete(SFRC), it was seen that the sectional force capacity becomes larger than that of plain concrete, and that the force capacity differs depending on factors such as the shape and content of steel fibers, because the tensile stress is transmitted through the steel fibers intersecting the crack surface even after cracking has developed.

However there are almost no methods to calculate the sectional force capacity, with consideration of the tensile stress transmitted through the steel fibers, and there are few examples of applying steel fiber reinforced concrete to structural members.

Therefore in this paper a method to calculate the sectional force capacity in steel fiber reinforced concrete is proposed based on fracture mechanics.

keywords : steel fiber reinforced concrete, sectional force capacity, fracture mechanics

1. はじめに

トンネルのような円環構造物は、土水圧などの外力により覆工の一部にひびわれが生じて、応力の再配分が行われるため直ちに構造全体の破壊状態には至らず、無筋コンクリートを用いた覆工でも構造的な耐力は部材耐力より大きい。そして、このような構造物の使用材料として、鋼繊維補強コンクリートを用いた場合には、ひびわれ面を横切っている鋼繊維により引張力が伝達され、ひびわれ面で力のつり合いが保たれているため、さらに大きな耐力を有する構造物となる。これらのことについて筆者らは円環モデル載荷実験により確認している¹⁾。こうしたことから、部材にひびわれが発生する断面破壊の状態までの耐力をもとに覆工の設計を行えば、十分安全側の設計を行えるものと考えられる。

そこで、断面の破壊状態と耐力の関係を求めるため、耐力と密接な関係があるひびわれ深さ、ひびわれ開口幅、そしてひびわれ発生に伴うひずみ状態の変化を考慮した影響範囲等について、各種の直方供試体曲げ実験を行った。これに解析を加え、断面耐力の算定法を求めたので以下にその結果を示す。

2. 曲げ実験概要

2. 1 供試体の作成および実験方法

作用荷重とひびわれの挙動を的確に計測できる実験方法として、コンクリート標準示方書(規準編)²⁾に準じて直方供試体

曲げ実験を採用した。供試体の種類は表-1に示すように、実際のトンネル覆工とほぼ同一の部材厚を想定した40cm角供試体(40cm×40cm×150cm)と、一般の曲げ試験で行われる15cm角供試体(15cm×15cm×53cm)を作成した。コンクリート配合は表-2に示すとおりであり、鋼繊維の長さは30mm、アスペクト比50、混入率は0.5、1.0、1.5%

表-1 作成供試体

供試体 寸 法	混入率 0%	混入率 0.5%	混入率 1.0%	混入率 1.5%	合計 (個)
15cm角	18	18	18	18	72
40cm角	—	12	12	—	24

* 正会員 日本鉄道建設公団 設計技術室

** 正会員 日本鉄道建設公団 理事

*** 正会員 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 技術研究所

の3種類で、円環モデル載荷実験で行ったものと同じである。そして載荷方法は、0.1mm/minの変位制御により行い、引張軟化曲線を十分に把握するため、下面のひびわれ開口幅が8mm以上になるまで載荷を続けた。

2. 2 実験結果

40cm角および15cm角供試体の実験結果は次のとおりであった。

(a) 40cm角供試体

載荷荷重－たわみ量の関係は、図-1に示した混入率1.0%の実験結果から、最大荷重を示した後の荷重変化は、たわみ量の増加に応じて滑らかに漸減しており、断面耐力も無筋コンクリートのように急激な変化を示すことはなかった。次に、同供試体の載荷荷重－ひびわれ開口幅の関係を図-2に示す。最大荷重を示した後、たわみ曲線と同じように、ひびわれ開口幅に応じて耐力は漸減する傾向となった。ひびわれ開口幅が2.0mmの場合で、約22.5tfの断面耐力を保持していた。

そして最大荷重を示した後のひびわれ深さは、図-3に示すように断面高さの70%を超えており、全供試体では80%前後の値を示すものが多かった。実験終了時点のひびわれ深さは、すべての供試体で80%以上であったが、ひびわれが貫通することはなかった。

(b) 15cm角供試体

載荷荷重－たわみ量の関係は、図-4に示すように40cm角供試体と同様な傾向となり、最大荷重を示した後の荷重変化は、たわみ量の増加に応じて滑らかに漸減しており、断面耐力も漸次減少している。次に、同供試体の荷重－ひびわれ開口幅の関係を図-5に示す。各混入率の供試体とも最大荷重を示した後、荷重－たわみ曲線と同じようにひびわれ開口幅に応じて耐力は漸減する傾向を示した。混入率1.0%の供試体では、ひびわれ開口幅が1.0mmの場合で約4.2tfの断面耐力を保持していた。

2. 3 たわみ量とひびわれ開口幅の関係

本実験では、図-6に示すように左右の載荷点位置のたわみ量を計測しており、ひびわれ発生位置により各載荷点のたわみ量は異なる値を示すが、図より

$$\delta_c = \frac{\delta_L + \delta_R}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{L - L_w}{L} \lambda \frac{L}{3} + \frac{L_w}{L} \lambda \frac{L}{3} \right) = \frac{L}{6} \lambda \tag{1}$$

となり、両載荷点の平均たわみ量 δ_c は、ひびわれ発生位置 L_w に依存しない。したがって、変形角 λ のひびわれが供試体中央に生じた場合と同等の計測をしていることとなる。また、 $W = \lambda h$ より、式(1)は次のようにひびわ

表-2 コンクリート配合（混入率1.0%）

粗骨材 の最大 寸法 mm	スラブ* の 範囲 cm	水たわみ 比 W/C %	細骨 材率 s/a %	単位量 (kg/m³)					混和剤	
				鋼繊維	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 kg/m³	空気量 調整剤 cc/m³
20	18±2	50.3	60.9	78.5	196	390	998	640	2.44	23.4

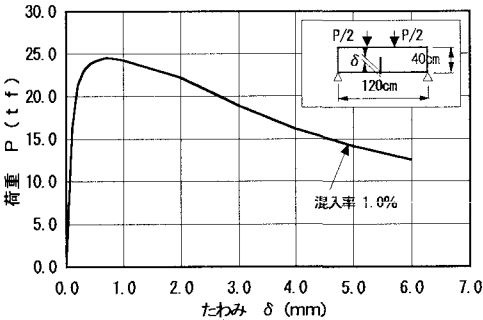


図-1 40cm角供試体の荷重－たわみ関係

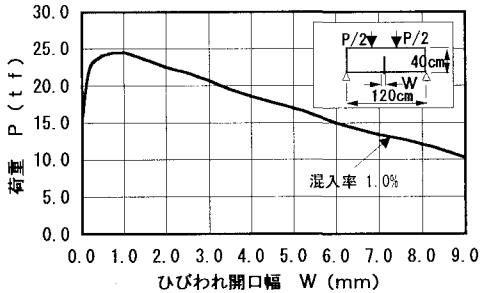


図-2 40cm角供試体の荷重－ひびわれ開口幅関係

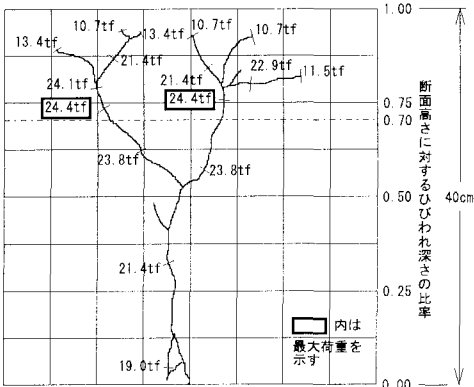


図-3 ひびわれ深さと荷重

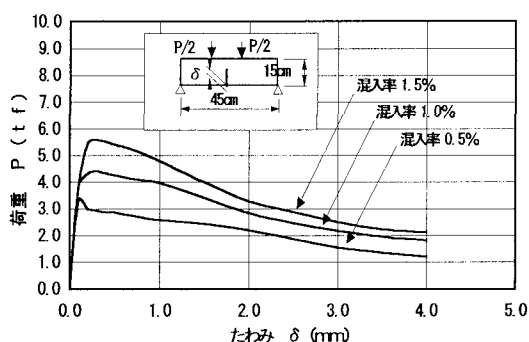


図-4 15cm角供試体の荷重－たわみ関係

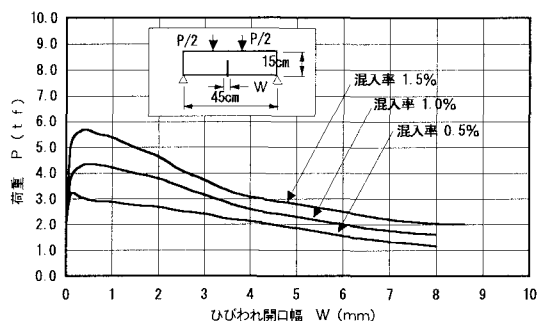


図-5 15cm角供試体の荷重－ひびわれ開口幅関係

れ開口幅 W で表せられる。

$$\delta_c = \frac{L}{6} \lambda = \frac{LW}{6h} = \frac{W}{2} \quad \text{-----}(1)'$$

計測結果による実測ひびわれ開口幅 W と実測平均たわみ量 δ_c の関係および式(1)'を図-7に示す。この図から、供試体寸法、鋼繊維混入率の違いによる差は少なく、ひびわれ開口幅と平均たわみ量はほぼ直線的な関係にあり、式(1)'と同じような傾向を示すことが明らかとなった。

以上のような実験から、ひびわれを横切って伝達される鋼繊維の引張力により力のつり合いが保たれ、最大荷重後においてもかなり断面耐力は保持されており、図-2、図-5に示したようにひびわれ開口幅に応じた荷重低下が計測されたことから、断面耐力はひびわれ幅と関係が深いことが判った。そして、的確に測定することが困難なひびわれ幅については、供試体のたわみ量から推定でき、設計実務においては、一般の曲げ試験によるたわみ測定を行えばよいことが判明した。

次に、鋼繊維の受け持つ引張強度とひびわれ周辺のひずみ状態の変化について以下の実験を行った。

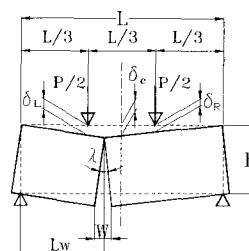


図-6 ひびわれ位置のたわみ－開口幅の関係

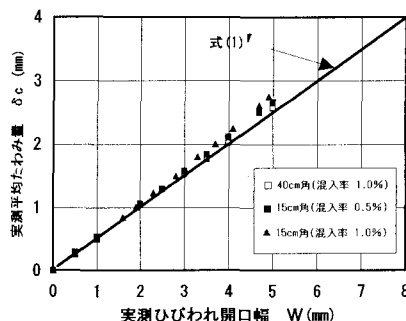


図-7 実測ひびわれ開口幅と実測平均たわみ量の関係

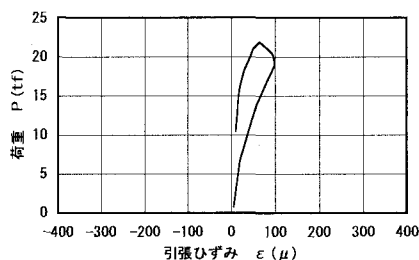
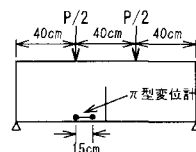


図-8 荷重－変位の関係（引張ひずみ）

3. ひびわれの影響範囲計測実験

ひびわれの影響範囲とは、図-11に示すように曲げを受けて、ひびわれが発生した影響を受ける部材の中立軸での範囲をいう。この影響範囲をもとに、規定するひびわれ深さでの発生ひびわれ幅を想定し、その伝達張力をもとに部材の耐力算定を行うものである。

3. 1 実験方法

ひびわれが発生するスパン中央部付近の供試体下面に、標点間距離15cmの π 型変位計を設置した。また、圧縮側である供試体中央部上面には、長さ5cmのひずみゲージを軸方向に5箇所貼り付けた。

3. 2 実験結果

π 型変位計で計測した荷重－変位の関係を図-8に示す。ひびわれが発生するまでの変位（引張ひずみ）は、荷重とともに増加するが、ひびわれが生じるとひびわれ近傍の変位（引張ひずみ）は減少する挙動を示す。このようにひびわれの発生により構造モデルが変化し、下縁での応力伝播が低下、制限されるため、近傍の引張ひずみは元に戻る傾向を示すものとなる。

また、供試体上面に貼り付けたひずみゲージで計測した圧縮縁ひずみ－荷重の関係を図-9に示す。G1～G5の圧縮縁ひずみは荷重の増加に伴って増加する。ひびわれが生じた後は、ひびわれ部分直上のG3は圧縮縁ひずみが増加しているが、G1～G2、G4～G5の圧縮縁ひずみは、ひびわれが伸展し荷重が低下するとともに減少している。すなわち、両側の載荷点に近いところでは、もとのひずみに戻る挙動を示しているが、ひびわれ直上付近ではそのまま増加しており、ひずみが局所化していることがうかがえる。

以上のように、ひびわれは周辺のひずみ分布に影響を与えているものと考えられる。

4. ひずみ分布の影響範囲の検討

曲げ実験のたわみ量は、ひびわれによるたわみ量と供試体の弾性たわみ量との和であると考えて、たわみ量と開口幅の関係について検討した。左右のたわみ量は、ひびわれ位置により異なるが、両者の和は $\lambda L/3$ で一定となり、どの位置にひびわれが生じても図-10のように中央部にひびわれが生じた場合として載荷点たわみ量を扱えばよい。そこで、堀井らの研究³⁾を参考にして、載荷点位置のたわみ量 δ_L は、ひびわれ面の変形角 λ とその他の部分の弾性たわみ量から式(2)のようになるものとした。

$$\delta_L = \frac{5P \cdot L^3}{324EI} + \frac{\lambda L}{6} \quad \text{-----(2)}$$

ここに、右辺第1項は弾性たわみ量、第2項はひびわれによるたわみ量を表わす。また、 $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{h^4}{12}$ である。

式(2)のひびわれ面での断面力と変形角 λ との関係を求めるために、これまでの実験結果等から次のように影響範囲を定義する。

- ①影響範囲 L^* でのたわみ角は、図-11に示すようにひびわれ開口により生じる変形角 λ に等しいものとする。
- ②圧縮側のひずみは直線分布する。
- ③引張応力が部材の純引張強度 σ_t に達すると、ひびわれが発生するものとし、その後はひびわれ開口幅の拡大に伴って、鋼繊維により伝達される引張応力は減少する。なお、ひびわれ発生前は引張応力とひずみが線形関係にあるものとする。
- ④開口幅は、ひびわれ先端から直線分布とする。

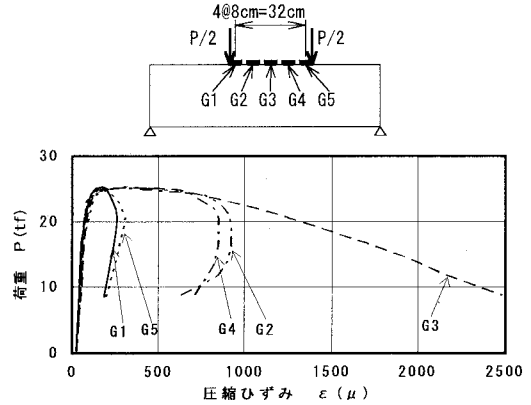


図-9 圧縮縁ひずみ－荷重の関係

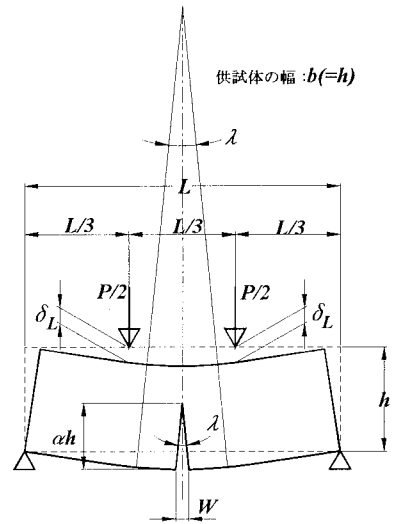


図-10 載荷点たわみ量と変形角

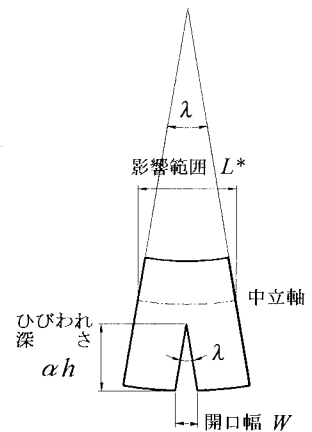


図-11 変形角と影響範囲

図-11に示した関係から、ひびわれ面における変形角 λ は、開口幅 W とひびわれ深さから式(3)の関係となる。

$$\lambda = \frac{W}{\alpha h} \quad \text{---(3)}$$

曲げ実験で測定された荷重点たわみ量と開口幅により、式

(2)と式(3)から、ひびわれ深さ αh が計算される。

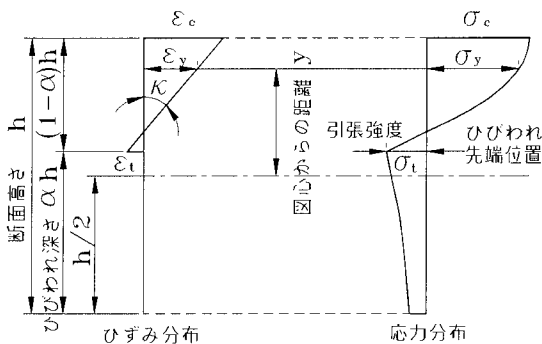


図-12 部材断面のひずみ分布と応力分布の関係

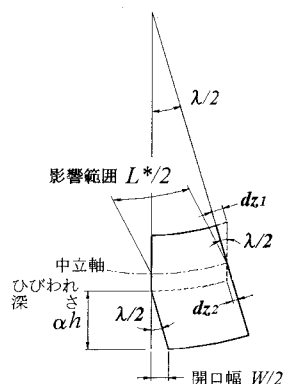


図-13 影響範囲の変形状況

一方、圧縮側に着目すると、ひびわれ面における応力分布とひずみ分布は、前の②および③の仮定から図-12のようになる。断面内の応力は、ひびわれ先端部で部材の純引張強度 σ_t に達しており、この引張強度のひずみを引張限界ひずみ ε_t とすると、圧縮領域のひずみ分布の傾き κ は式(4)のようになる。

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_t}{(1-\alpha)h} \quad \text{---(4)}$$

影響範囲端では、平面保持が成立しているので、図-13から影響範囲 $L^*/2$ のたわみ角は次のようになる。

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{dz_1 + dz_2}{(1-\alpha)h}$$

また、 $L^*/2$ 区間の縁変形量は、縁ひずみから次のようになる。

$$dz_1 = \varepsilon_c \cdot \frac{L^*}{2}, \quad dz_2 = \varepsilon_t \cdot \frac{L^*}{2}$$

したがって、

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{(\varepsilon_c + \varepsilon_t)}{(1-\alpha)h} \cdot \frac{L^*}{2}$$

よって、影響範囲 L^* におけるたわみ角 λ は式(5)のようになる

$$\lambda = \frac{(\varepsilon_c + \varepsilon_t)}{(1-\alpha)h} \cdot L^* = \kappa \cdot L^* \quad \text{---(5)}$$

したがって、式(3)と式(5)から影響範囲 L^* は、式(6)のように誘導される。

$$L^* = \frac{1-\alpha}{\alpha(\varepsilon_c + \varepsilon_t)} \cdot W \quad \text{---(6)}$$

この影響範囲は、開口幅 W とひびわれ深さの断面の高さ h に対する割合 α で決定される。

こうした諸関係のうち、ひびわれ開口幅 W とひびわれ深さの割合 α の関係について実測値から算出した。すなわち、実測した荷重 P 、平均たわみ量 δ_L をもとに、式(2)から変形角 λ を求め、この変形角 λ とひびわれ開口幅 W を式(3)に代入してひびわれ深さの割合 α を求めた。このようにして実測ひびわれ開口幅 W に対応するひびわれ深さの割合 α の関係が図-14の曲線として示される。この図より、ひびわれ発生後、開口幅の増加に伴ってひ

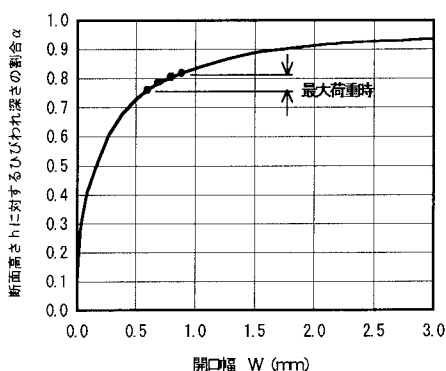


図-14 開口幅とひびわれ深さの割合の関係

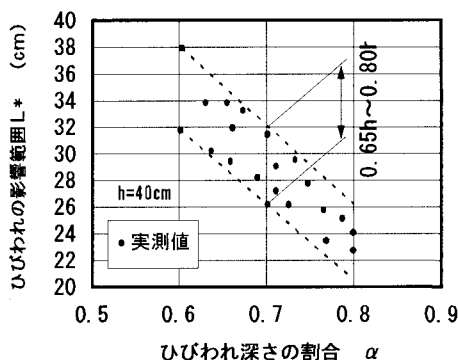


図-15 ひびわれ深さの割合とひびわれの影響範囲

びわれ深さも大きくなりながら最大荷重に達し、その後ひびわれの進展は鈍り、最終的にひびわれ深さはあまり変化せず開口幅だけが增加している。これは目視によるひびわれ進展計測結果ともよく一致した挙動を示している。また、最大荷重におけるひびわれ深さの割合 α は断面の80%前後を示しており、併進工法の断面耐力算定⁴⁾でひびわれ深さを断面高さの70%までとしているのは、最大荷重以前の値にとどめたことになり、安全側の範囲を使用したこととなっている。

そして、式(6)を用いて実測値から影響範囲 L^* を算定した。算定にあたっては、圧縮側の縁ひずみは供試体上面に張付けたひずみゲージの測定値とし、引張限界ひずみ ε_t は、一般的には $60\mu \sim 150\mu$ ⁵⁾とされているが、ここでは割裂引張実験から求めた純引張強度と圧縮実験結果による弾性係数を用いて 100μ とした。これらの条件によるひびわれ深さの割合 α と影響範囲 L^* との関係を図-15に示す。本図から、ひびわれ深さの割合 α が断面の70%となった時点の影響範囲は、 $0.65h \sim 0.80h$ となり平均で $0.7h$ となっている。

このことから、ひびわれ深さの割合を断面高さの70%までとした場合、そのひびわれの影響範囲 L^* は断面高さの70%としてよいことになる。

5. 影響範囲を用いた耐力力およびたわみ量の実測値との比較

ひびわれ深さの割合を $\alpha = 0.7$ と仮定した場合の妥当性を、荷重とたわみ量の実測値を基に検討を加えた。

影響範囲を断面高さの70%とした場合の曲げ実験時の供試体の耐力力およびたわみ量について、図-16に示す計算手順により、影響範囲を考慮した梁モデルで計算することとした。入力条件となる手順2の引張軟化曲線については、引張軟化特性に関する研究^{6), 7)}およびこれまでの実験結果から、図-17に示すように鋼繊維により伝達される引張応力が0となる開口幅（限界開口幅）を想定し、いくつか変えて解析し検討を加えた結果、図-18に示すように限界開口幅を5mmとしたケースが荷重—たわみ曲線をよく近似した。したがって、引張軟化曲線は限界開口幅を5mmとし、圧縮強度については圧縮実験結果の値を用いる強度特性を計算条件とした。

次に、断面力はひびわれ面の応力分布から、式(7)および式(8)で計算される。

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot y \cdot b \cdot dy = \frac{PL}{6} \quad \text{-----}(7)$$

$$N = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot b \cdot dy = 0 \quad \text{-----}(8)$$

また、圧縮側のひずみ分布の傾き κ は、式(5)から式(9)のように計算される。

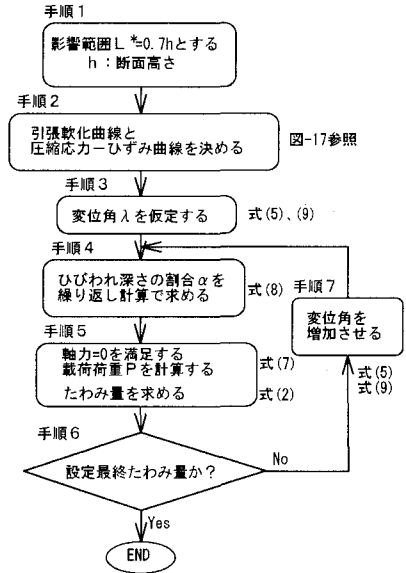


図-16 検討計算手順

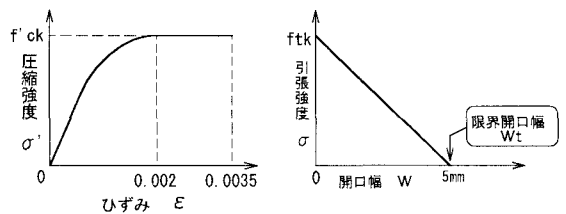


図-17 計算条件

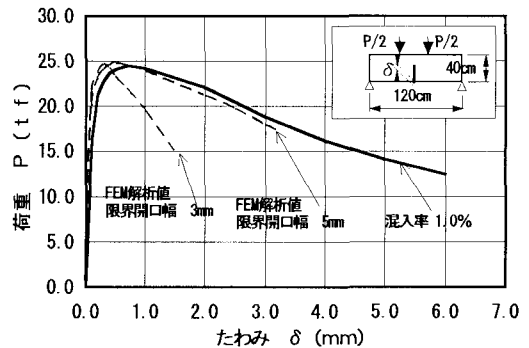


図-18 40cm角供試体の荷重—たわみ関係

$$\kappa = \frac{\lambda}{L^*} \quad \text{-----(9)}$$

影響範囲 L^* を $0.7h$ とした場合において、ひびわれ面の変形角 λ を仮定し、式(5)と式(9)を用いてその時の実験条件(軸力=0)から、圧縮力と引張力が等しい式(8)の状態としてひびわれ深さの割合 α を求める。次に、ひびわれ深さ αh における圧縮力と引張応力から、曲げモーメントを式(7)により求める。このモーメントから荷重 P を算定する。これらの変形角 λ と荷重 P を用いて式(2)からたわみ量が算定される。この結果と実測のたわみ量を比較したものが図-19である。

これらから、影響範囲を $0.7h$ とすると実験結果の最大値および荷重の漸減している状態をよく近似している。したがって、影響範囲を断面高さの70%とすれば断面耐力等を合理的に算定できる。また、これらの算定は梁モデルを用いて計算できる。

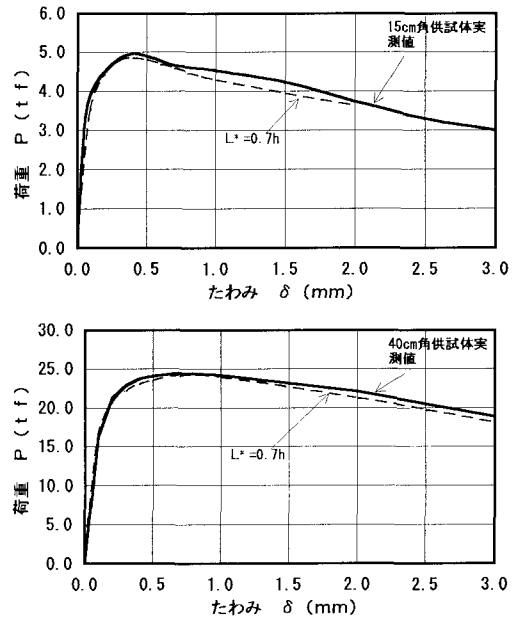


図-19 $\alpha=0.7$ を用いた計算値と実測値の比較

6. 鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工の

断面耐力算定法

以上のような実験結果から、ひびわれの影響範囲 L^* を $0.7h$ と仮定することが合理的であるとの結論が得られた。したがって、 $0.7h$ の影響範囲ということで、以下のような条件定義により鋼繊維補強コンクリートの引張強度 f_y を求め、これを用いて断面耐力を算定することとした。

- ①ひびわれ深さは断面高さの70%以下とする。
- ②ひびわれ先端と中立軸は一致しているものとして引張力を算定する。
- ③維ひずみは中立軸からの距離に比例し直線分布する。

6. 1 鋼繊維補強コンクリートの引張強度算定

ひびわれ深さと限界ひびわれ開口幅の関係、また、ひびわれの影響範囲の関係について、設計部材寸法が40cmの場合を図-20に示す。ひびわれ深さの割合を70%とすると、圧縮縁の終局ひずみが $\epsilon'_{cu} = 0.0035$ であることから、

$$\begin{aligned} W_{cf} &= L^* \cdot \epsilon_{tu} = L^* \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \epsilon'_{cu} = 0.7h \cdot \frac{0.7}{1-0.7} \times 0.0035 \\ &= 0.7 \times 400 \times \frac{0.7}{0.3} \times 0.0035 = 2.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

と限界ひびわれ開口幅 W_{cf} を設定できる。そして、この開口幅に相当する荷重を図-21に示すように、曲げ試験の荷重-たわみ曲線から求め、式(7)および式(8)の関係から、鋼繊維補強コンクリートの引張強度 f_y を求める。

実際の引張側の応力状態は、図-22(b)のようにコンクリートの引張強度 f_t とひびわれ面で鋼繊維により伝達されている引張力となっているが、ここでは設計実務の簡便さを考慮して、図-22(c)に示すように、ひびわれ深さ αh の領域に鋼繊維の受け持つ引張強度 f_y が、中立軸まで等分布になっている状態として算定することとした。なお、MN 相互関係図を作成するにあたって、ひびわれ深さの割合 α が 0.7未満となる場合には、開口幅が小さくなるため f_y は大きくなるが、断面耐力算定には限界開口幅から求めた

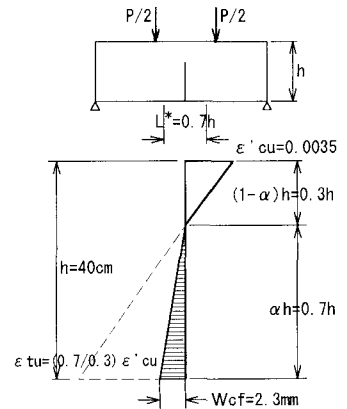


図-20 ひびわれ深さと限界開口幅

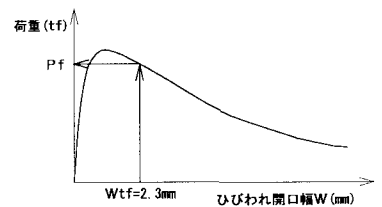


図-21限界開口幅からの荷重の求め方

- 116 -