

# 直打ちコンクリートライニングの耐力算定法

STUDY ON COMPUTATION FOR CAPACITY OF EXTRUDED CONCRETE LINING

鬼頭誠<sup>\*</sup>・坂井五郎<sup>\*</sup>・末永充弘<sup>\*</sup>・梶原雄三<sup>\*</sup>

Makoto KITO, Goro SAKAI, Mituhiro SUENAGA, Yuzo KAJIWARA

To apply a steel fiber reinforced concrete (SFRC) to the extruded concrete lining, it is necessary to study the estimation of its capacity of member cross section.

As a result of carrying out the loading experiment of SFRC, the fundamental datum for design was obtained, such as the relation between tensile strength and width of crack opening.

This paper mentions study on computation for capacity of extruded concrete lining by limit states design method.

keywords: extruded concrete lining method, limit states design method,  
steel fiber reinforced concrete.

## 1. はじめに

近年、都市における交通問題は深刻化してきており、大量・高速アクセスが可能な地下鉄道網の整備促進が急務となっている。そのトンネル建設にあたっては安全に、速く、品質の良い覆工体を経済的に構築する施工法が要求されている。これらの要求を満たすものとして、新しいシールド工法の一つである直打ちコンクリートライニング工法(以下併進工法という)を開発研究してきた。これは、掘削に従来の密閉型シールドを用い、覆工には生コンクリートをシールド後部より連続圧入し、地盤に密着した覆工体が構築できることから、周辺地盤を緩めることが少ない等の特長を持っており、都市環境上からも有効な工法である。

この新しい覆工には、新材料として注目されている鋼繊維補強コンクリートなどを用いるが、併進工法の特色である地盤に密着した密実な覆工が構築できること等を勘案し、安全で合理的な設計手法を確立するために、円環供試体載荷実験、直方供試体曲げ実験など各種実験を行ってきた。これらの結果をもとに直打ちコンクリートライニングの耐力算定法を限界状態設計法としてまとめたので以下にその概要を述べる。

## 2. 覆工の耐荷力

一般に、土中構造物は軸圧縮力が主体となり、一部部材にひびわれが生じても構造体としての耐荷力は、

---

\* 正会員 日本鉄道建設公団設計室

まだ十分保持されているものと考えられる。こうした関係を求め、構造体としての耐荷力を推定するため、覆工の部材には応力-ひずみ曲線を用い、周辺地盤はバネとして図-1に示すようなモデルでFEM解析を行った。解析の結果、作用荷重の増加に伴い、まず初めにクラウン部覆工内面にひびわれが発生し、次にスプリング部覆工外面にひびわれが発生する。クラウン部やスプリング部にひびわれが生じても円環構造としては安定状態を保っている。引続き荷重が大きくなると、ついに圧縮破壊応力に達し、構造的な破壊状態となった。

これは、トンネルの覆工が不静定構造物であること、覆工と周辺地盤が一体となって働くことなどから、荷重作用により覆工の一部が曲げ破壊モーメントに達しても断面力の再配分が生じて、ただちに覆工構造全体の破壊状態にはつながらないためであり、構造耐力は部材断面耐力に比べて大きいものと推察される。このことから、覆工に働く断面力に対して、覆工の一部が最初に破壊状態に達した場合についての照査を行っておけば、安全側の設計となるものと考えられる。

これらの破壊に至るまでの挙動の変化は、ひびわれの発生状態により異なるものと考えられ、次に示す点を明らかにすることを目的に、円環モデル載荷実験および直方供試体曲げ実験を行うこととした。

- ①構造としての破壊状態
- ②部材としての破壊状態
- ③引張強度-ひびわれ開口幅の関係
- ④実部材寸法の引張強度と曲げ試験から求める引張強度との関係

3. 実験概要

3. 1 円環供試体載荷実験

(a) 供試体および載荷方法

供試体の寸法は、図-2に示すように外径2500mm、覆工厚350mm、高さ1000mmとし、鋼繊維の長さ30mm、混入率が0.0%、0.5%、1.0%の3供試体を作成した(表-1、表-2)。載荷方法は、0.1mm/minの変位制御によりPa方向から水平載荷を行った。なお、Pa方向を載荷側、Pr方向を反力側と呼ぶことにする。

(b) 測定結果

図-3に3供試体の荷重-変位関係、図-4に荷重-ひびわれ開口幅の関係を示す。鋼繊維を1.0%混入した供試体では、載荷荷重約43tfでひびわれが載荷側に生じ、ひびわれ開口幅は0.3mm程度を示した。さらに載荷を継続すると約65tfから受け側付近と受け側から45度付近の外面にひびわれが数本発生したが、変位に対し荷重は滑らかに増加している。実験終了時点の載荷荷重約100tfでは、ひびわれ開口幅が2.5mmで、ひびわれ長は覆工厚の8割程度となった。

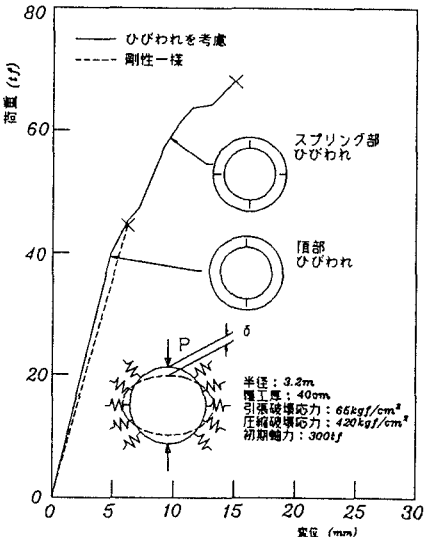


図-1 地中円環構造物の耐荷力

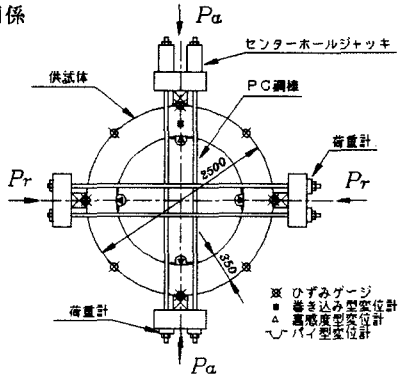


図-2 円環供試体載荷装置平面図

表-1 供試体一覧表

| 供試体   | 混入率0% | 混入率0.5% | 混入率1.0% | 混入率1.5% | 合計 |
|-------|-------|---------|---------|---------|----|
| 円環    | 1     | 1       | 1       | —       | 3  |
| 15cm角 | 1     | 1       | 1       | 1       | 7  |
| 40cm角 | —     | 1       | 1       | —       | 2  |

表-2 コンクリートの配合(混入率1.0%の例)

| 粗骨材の最大寸法 | スランパの範囲 | 水セメント比w/c | 細骨材率s/a | 単位量 (kg/m³) |     |      |     |     | 混和剤   |        |
|----------|---------|-----------|---------|-------------|-----|------|-----|-----|-------|--------|
|          |         |           |         | 鋼繊維         | 水   | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | AE減水剤 | 空気量調整剤 |
| mm       | cm      | %         | %       | SF          | W   | C    | S   | G   | kg/m³ | cc/m³  |
| 20       | 18±2    | 50.3      | 60.9    | 78.5        | 196 | 390  | 998 | 640 | 2.44  | 23.4   |

1) 空気量調整剤: ポソリスNo. 303Aを1%に希釈して使用する。

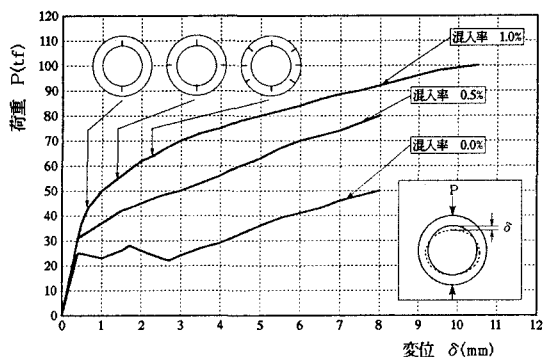


図-3 荷重－変位の関係

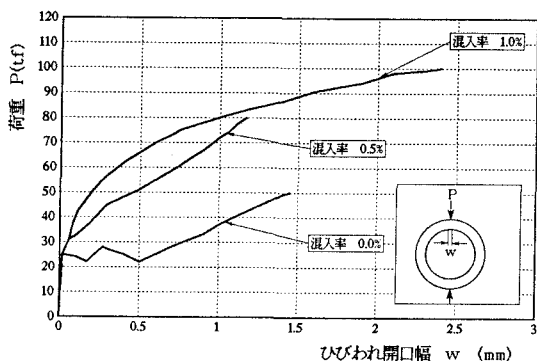


図-4 荷重－ひびわれ開口幅の関係

### (c) 実験結果と解析結果の比較および考察

覆工部材にひびわれが発生した状態となっても、その後の載荷荷重は滑らかに増加していることから、円環構造物の構造耐力は部材耐力に比べて極めて大きいことが判った。

そして、ひびわれ面での鋼繊維によって伝達される引張応力を、図-5に示すような引張応力とひびわれ開口幅の関係で直線近似し、FEM解析を行った結果、図-6に示すように解析値は実験値とよく一致した。このことから円環構造物の構造耐力は、引張強度－ひびわれ開口幅の関係をjいて算定が可能であると推察される。

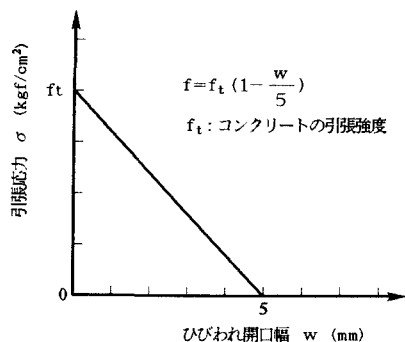


図-5 引張強度－ひびわれ開口幅の関係

## 3. 2 直方供試体曲げ実験

### (a) 供試体および載荷方法

供試体の種類は、一般の曲げ試験で行われる15cm×15cm×53cmと、実際のトンネル覆工とほぼ同一の部材厚を想定した40cm×40cm×150cmの供試体を作成した。鋼繊維の長さおよび混入率は円環供試体と同じものとした。載荷方法は0.1mm/minの変位制御により行い、ひびわれ開口幅が8mm以上になるまで載荷を継続した。

### (b) 測定結果

15cm角および40cm角供試体の測定結果は次のとおりであった。

①15cm角供試体の荷重－たわみ関係を図-7に示す。最大荷重を示した後の各供試体の耐力は、たわみ量の増加に応じて滑らかに漸減しており、急激な挙動の変化を示すことはなかった。次に、同供試体の荷重－ひびわれ開口幅の関係を図-8に示す。各混入率とも最大荷重を示した後は、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%のひびわれ開口幅が1.0mmの場合で、約4.0tfの断面耐力を保持していた。

②ひびわれ発生状況の1例を図-9に示す。最大荷重を示した後のひびわれ長は、断面高さの7割を超え、試験終了時点で8割程度となり、ひびわれが貫通することはなかった。

③40cm角供試体の混入率1.0%の実験結果を図-10に示す。15cm角の試験結果と同様に、最大荷重を示した後、たわみ量の増加に伴い断面耐力は滑らかに漸減していた。次に、同供試体の荷重－ひびわれ開口幅の関係を

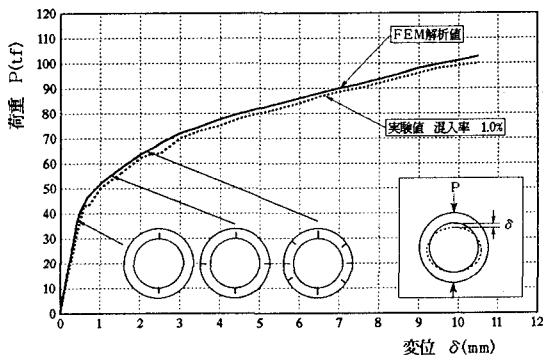


図-6 円環供試体の解析結果

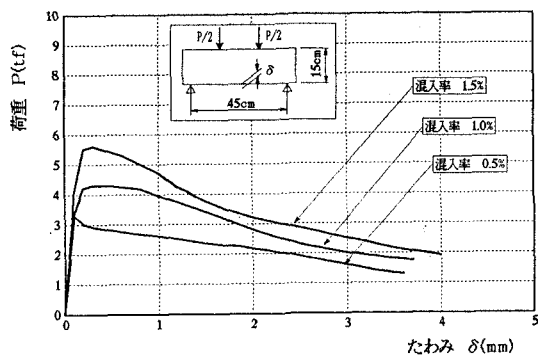


図-7 15cm角供試体の荷重-たわみ関係

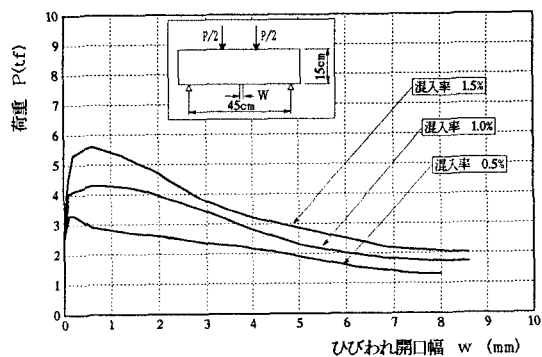


図-8 15cm角供試体の荷重-ひびわれ開口幅関係

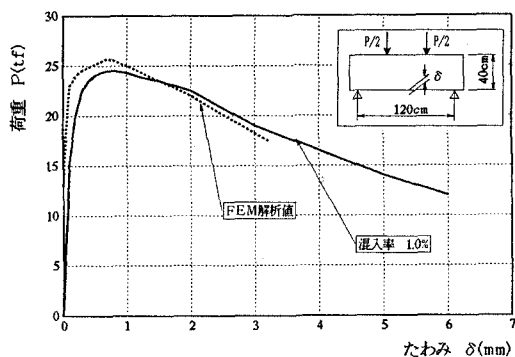


図-10 40cm角供試体の荷重-たわみ関係

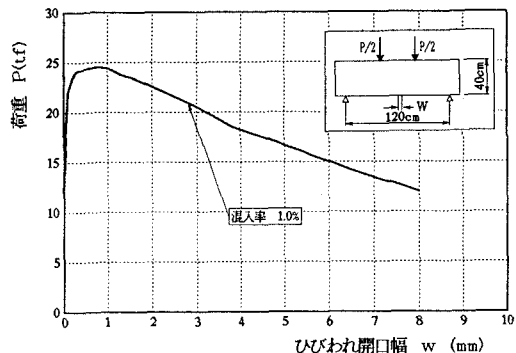


図-11 40cm角供試体の荷重-ひびわれ開口幅関係

図-11に示す。最大荷重を示した後は、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。ひびわれ開口幅が2.0mmの場合で約22tfの断面耐力を保持していた。

④ひびわれ箇所近傍の引張ひずみは、図-12に示すように、ひびわれ発生後、変位が元に戻る傾向を示した。また、このひびわれ箇所を挟む2点間のひずみは、図-13に示すように離間距離が150mm、300mm、400mmの3計測点ともほぼ同様な傾向を示し、引張ひずみがひびわれ開口幅に集約されることを示した。

#### (c) 実験結果と解析結果の比較および考察

直方供試体の曲げ破壊過程は、ひびわれ発生後も荷重は増加し、最大断面耐力を示した後、ひびわれ開口幅の広がりに応じて断面耐力が漸減する。これは、ひびわれ面で鋼繊維に引張力が伝達されて力の釣合いが保たれるためであり、その伝達応力はひびわれ開口幅に依存するものと考えられる。そして円環モデル載荷実験と同様に、限界開口幅を5mmとしてFEM解析を行った。この結果、最大断面耐力およびひびわれ発生後の断面耐力の漸減傾向は図-10に示したようによく近似される。このことから、ひびわれ後も引張強度が残留するものと考えられ、鋼繊維補強コンクリート部材の断面耐力は、鋼繊維の受け持つ引張強度-ひびわれ開口幅の関係をを用いて算定が可能であると推察される。

また、ひびわれ発生後は、部材の引張ひずみがひびわれ開口幅の増加に吸収され、その影響範囲は30cm程度であり、これらの実験結果などから最大圧縮ひずみに対して、引張側に生ずるひずみ量をひびわれ開口幅に置き換えて、鋼繊維によって残留する引張強度を想定し、断面耐力を算定できるものと考えられる。

次に、たわみ-ひびわれの関係を整理すると図-14のような直線的な関係にあり、15cm角、40cm角供試体と

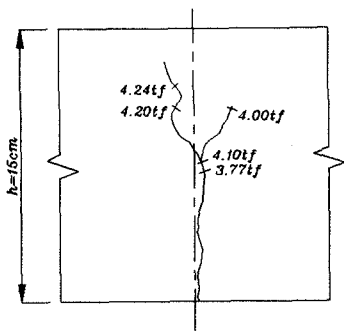


図-9 ひびわれ状態の一例

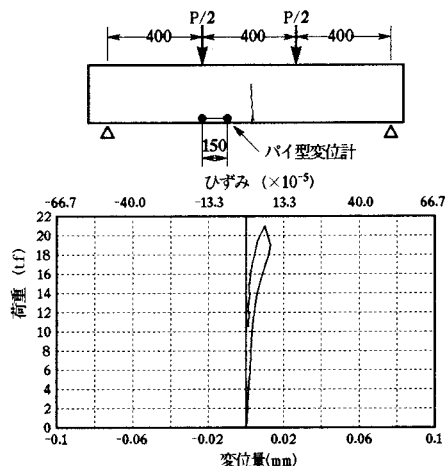


図-12 ひびわれ近傍の荷重－変位関係

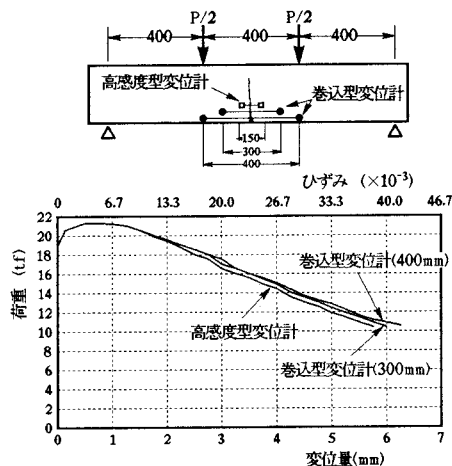


図-13 ひびわれを挟む箇所の荷重－変位関係

もよく一致していた。これらから式(1)が求められ、ひびわれ開口幅  $W_t$  は供試体の寸法および載荷位置が図-14に示す関係にある場合に、供試体中央部たわみ量  $\delta$  と支承点からひびわれ発生位置までの距離  $L_w$  を用いて推定できるものと考えられる。

$$w_t = (2h / L_w) \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (1)$$

なお、15cm角と40cm角供試体の引張応力度を比較すると、40cm角の方が低下する傾向にあり、設計においては部材寸法に応じた引張耐力を推定する必要があることが判明した。

#### 4. 鋼繊維補強コンクリート部材の耐力算定方法

以上のような各種実験を行った結果、次のように部材の耐力を算定することとした。

##### 4. 1 耐力算定に用いる鋼繊維の受け持つ引張強度の算定方法

###### (a) 算定条件

###### ① 鋼繊維補強コンクリートの応力分布

鋼繊維補強コンクリートを用いたひびわれ発生後の部材耐力算定には、ひびわれ面での伝達応力とひびわれ幅の関係が必要となる。これらは実験結果等から、図-15(a)に示すように開口変位が大きくなるとして伝達応力が小さくなる関係になるものと考えられる。これらの応力分布形状は、文献<sup>5)8)</sup>から図-15(b)のように想定されているが、ここでは設計実務上の簡便さを考慮し、図-15(c)のようにひびわれ面での鋼繊維が受け持つ引張強度  $f_{tf}$  は、開口変位  $w$  に対し一様に分布するものとして耐力算定を行うこととした。

###### ② ひびわれ長

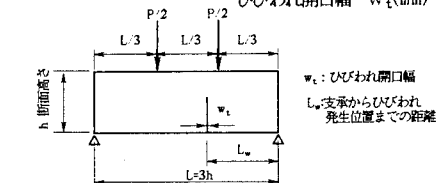
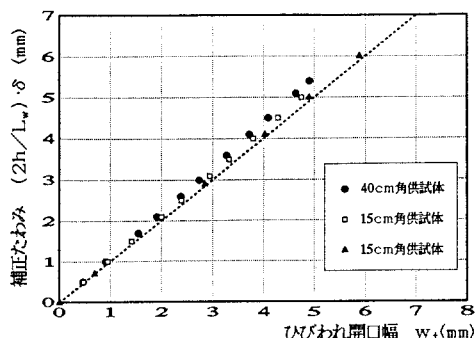


図-14 たわみ－ひびわれ開口幅の関係

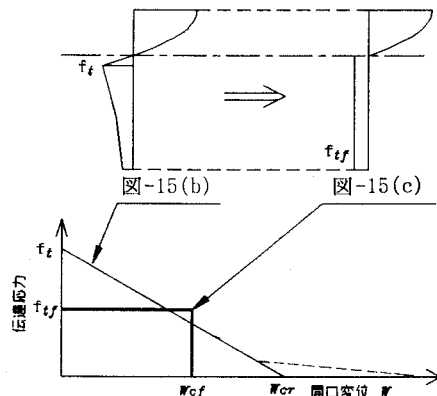


図-15(a) 伝達応力－ひびわれ開口幅の関係

想定するひびわれ長が長いほど圧縮領域は少なくなるが、圧縮応力度の合力と断面中心との距離が長くなるので、図-16に示すようにその計算上の耐力は増大する。ここでは、これまでの実験結果および無筋コンクリートの限界圧縮領域を参考に、急激な破壊状態への移行防止かつ安全側という観点から30%の圧縮領域を残すこととした。したがって、 $a/h=0.7$ までの耐力曲線を用いる。

### ③ひびわれ開口幅

ひびわれ開口幅については前述の実験結果より、巻込型変位計30cm間の変位量とひびわれ部分の変位量がほぼ同値となること、また、ひびわれ部分近傍の変位はひびわれ発生後、変位が元に戻る傾向となっていることから、引張ひずみはひびわれ開口幅に吸収されるものと考えられる。この影響範囲については、支点位置および寸法形状にもよるが、これまでの実験結果では20cm程度とされていること、また本実験での供試体高さ40cmにおける影響範囲は30cm程度となっていたこと等から、部材高さの70%と仮定した。したがって、図-17に示すように設計部材寸法が40cmで、圧縮領域を30%以上残した場合、圧縮縁の終局ひずみを $\epsilon'_{ou}=0.0035$ として、

$$w_{of} = \epsilon'_{ou} \cdot \epsilon_{tu} = 0.7h \cdot \epsilon'_{ou} \cdot (0.7/0.3) = 2.3\text{mm}$$

と限界開口幅 $w_{of}$ を設定した。

#### (b)算定手順

実際の設計部材寸法での試験から部材耐力を求めることが好ましいが、大規模な部材曲げ試験となるので、一般に用いられている15cm角供試体の曲げ試験をもとに、設計部材寸法の強度特性を推定することとした。具体的には、次のようにして求めることができる。

①15cmの曲げ試験による場合、図-17に示した関係から限界開口幅は、

$$\begin{aligned} w_{of(15)} &= 0.7h \cdot \epsilon'_{ou} \cdot (0.7/0.3) \\ &= 0.7 \times 150 \times 0.0035 \times (0.7/0.3) \\ &= 0.86\text{mm} \quad [(15/40) \times w_{of} = 0.86\text{mm}] \end{aligned}$$

となる。

②15cmの荷重－開口幅の関係を求め、図-18に示すように開口幅 $w_{of(15)}=0.86\text{mm}$ に対応する載荷荷重 $P_f$ を求める。なお、開口幅が測定困難な場合には、実験により求めた式(1)によってもよい。

③15cm角供試体の曲げモーメント $m_{(15)}$ を求める。

④圧縮応力－ひずみの関係はコンクリート標準示方書（土木学会）によるものとして、また、曲げモーメント、軸力の関係は図-19によるものとして鋼繊維の受け持つ引張強度 $f_{tf(15)}$ を求める。

⑤鋼繊維の受け持つ引張強度に寸法効果等による低減を行う。鋼繊維補強コンクリートの部材寸法の影響については明確なものはないが、これまでの実験などから鋼繊維補強コンクリートの引張強度はコンクリート

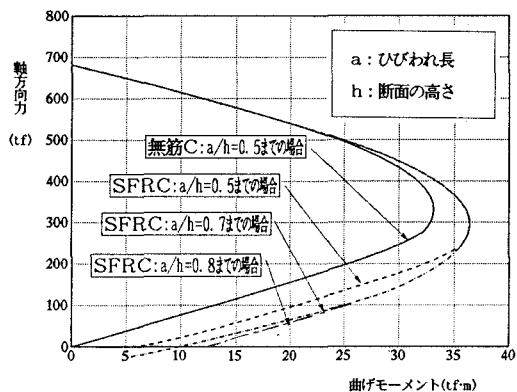


図-16 ひびわれ長による断面耐力の変化

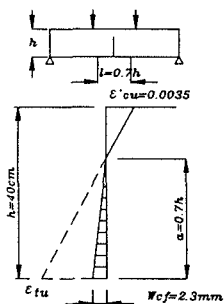


図-17 限界開口幅の算定

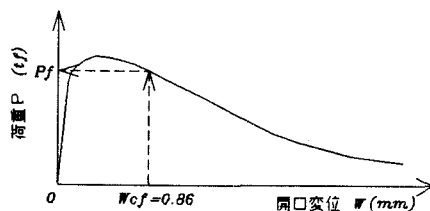


図-18 載荷荷重の求め方

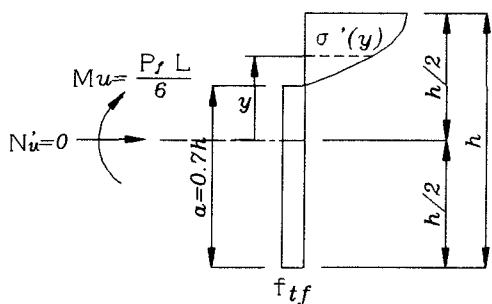


図-19 鋼繊維の受け持つ引張強度 $f_{tf}$ の算定法

表-3 部材寸法等の影響に関する検討

| ①設計引張強度に乘じる係数（無筋コンクリート）<br>$k_t = 0.5 / (h^{1/3})$ （ $h$ ：部材の断面高さ(m)）   |                                         |                      |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------|
| 部材の断面高さ<br>(m)                                                          | 設計引張強度に<br>乘じる係数                        | 0.15mの場合を<br>1.0とした率 |
| 0.15                                                                    | $k_t = 1.13$                            | $k_t = 1.00$         |
| 0.40                                                                    | $k_t = 0.81$                            | $k_t = 0.72$         |
| ②設計曲げ強度に乘じる係数（無筋コンクリート）<br>$k_b = 0.5 / (h/2)^{1/3}$ （ $h$ ：部材の断面高さ(m)） |                                         |                      |
| 部材の断面高さ<br>(m)                                                          | 設計曲げ強度に<br>乘じる係数                        | 0.15mの場合を<br>1.0とした率 |
| 0.15                                                                    | $k_b = 1.19$                            | $k_b = 1.00$         |
| 0.40                                                                    | $k_b = 0.85$                            | $k_b = 0.72$         |
| ③文献「コンクリートの曲げ強度の推定に関する破壊力学的検討」<br>（岐阜大学：小柳ほか）より                         |                                         |                      |
| 一辺の長さ<br>(cm)                                                           | 正方形断面曲げ強度<br>推定値 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 15cmの場合を<br>1.0とした率  |
| 10                                                                      | 41.7                                    | 1.06                 |
| (15)                                                                    | (39.2)                                  | 1.00                 |
| 20                                                                      | 36.7                                    | 0.94                 |
| 40                                                                      | 33.2                                    | 0.85                 |

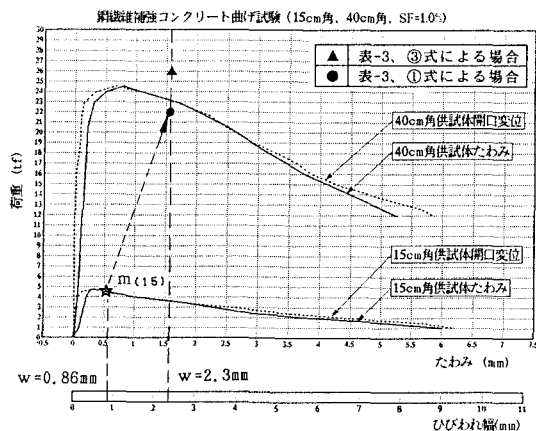


図-20 部材寸法等の影響を考慮した断面耐力の算定結果

ト強度に大きく依存しており、表-3に示した既往の研究を参考として①式による係数を用いた場合、図-20に示すように比較的实验値と一致し、安全側であることなどから、①式を  $h=0.15m$  を基準として変換した(2)式により部材寸法等の影響を考慮するものとした。

$$k_t = 0.53 / h^{1/3} \quad (h: \text{部材断面の高さ(m)}) \dots (2)$$

設計断面寸法が  $h=0.40m$  の場合に用いる引張強度  $f_{tf(40)}$  は、15cm角供試体から算定した鋼繊維の受け持つ引張強度  $f_{tf(15)}$  に、 $k_t=0.72$  を乗じることにより求められる。

#### 4. 2 部材断面の耐力算定方法

(a)設計断面耐力の算定は図-21に示した記号等に基づき、式(3)、(4)により求めるものとする。ここで、引張側の応力状態は、ひびわれ長さ  $a$  の領域に鋼繊維の受け持つ設計引張強度  $f_{tfd}$  が等分布になっている状態とする。

$$M_{ud} = \left( \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_o'(y) \cdot y \cdot b \, dy \right) / \gamma_b \dots (3)$$

$$N'_{ud} = \left( \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_o'(y) \cdot b \, dy \right) / \gamma_b \dots (4)$$

ここに、 $M_{ud}$  : 設計曲げ耐力

$N'_{ud}$  : 設計軸方向圧縮耐力

$h$  : 覆工の厚さ

$b$  : 単位幅

$\gamma_b$  : 部材係数

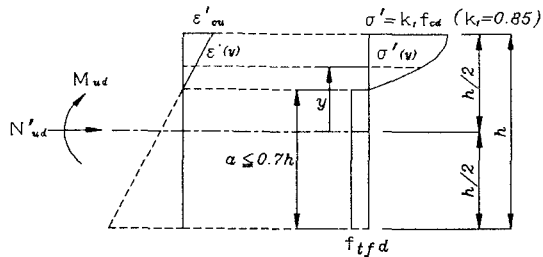


図-21 断面耐力の算定方法

(b)各種部材ひずみの状態を図-22のよように想定し、( $M_{ud}$ 、 $N'_{ud}$ )曲線を作成する。

(c)軸方向力および曲げモーメントに対する安全性の検討では、図-23のように設計断面力の点( $\gamma_1 M_d$ 、 $\gamma_1 N'_d$ )が、求めた( $M_{ud}$ 、 $N'_{ud}$ )曲線の内側、すなわち原点側に入ることが基本的条件となる。

以上のようにして耐荷力の検証ができる。

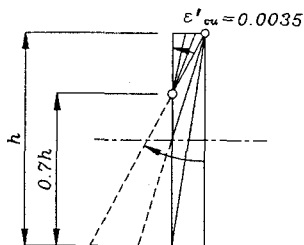


図-22 ひずみ状態の設定

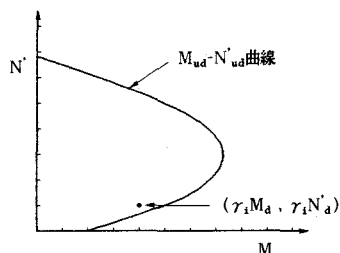


図-23 安全性の検討

## 5. まとめ

鋼繊維補強コンクリートの曲げ実験および円環載荷実験を実施し、これに解析を加え設計法の検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

### (a) 実験結果に関して

①円環構造では、ひびわれ発生により構造部材の一部が破壊状態となっても、その後の載荷荷重は滑らかに増加していることから、構造耐力は部材耐力に比較して大きいことが判った。

②鋼繊維の受け持つ引張強度は、ひびわれ開口幅に依存しており、引張強度－ひびわれ開口幅の関係をを用いて断面耐力を推定できる。

③ひずみはひびわれに集約され、ひびわれ開口幅は、支承点からひびわれ発生位置までの距離と供試体中央部のたわみ量から、式(1)により推定できる。したがって、ひびわれ開口幅が測定困難な場合等には式(1)を用いる。

### (b) 設計法検討に関して

①最大断面耐力に達した後において、ひびわれ長さは供試体高さの7～8割程度であったことなどから、断面耐力算定に用いるひびわれ長の最大値は、部材高さの70%までにしておけば断面耐力を少な目に算定することとなり、部材耐力で構造物の耐荷力を判断するような設計法では、安全側の設計となることが判った。

②部材寸法が40cmで圧縮領域を30%以上残した場合、限界開口幅は $w_{or}=2.3\text{mm}$ となり、これは実験の解析に用いた引張応力が零となる最大開口幅より小さい範囲を設計に用いることとなり、設計手法として適用できることが判った。

③耐力算定に用いる鋼繊維の受け持つ引張強度 $f_{tr}$ は、一般に行われている15cm角供試体の曲げ試験より求めた引張強度から推定可能であり、部材寸法等の影響を考慮した補正係数 $k_t$ により低減修正した値を用いてよいことが確認された。

## 6. おわりに

以上のような多くの実験と各種検討の結果、我が国で初めて鋼繊維補強コンクリートの材料特性を生かした限界状態設計法による耐力算定法を確立し、新工法である併進工法の設計指針としてまとめることができた。本研究の成果は、鉄道公団の併進工法設計施工指針・都市トンネル編としてまとめられており、本研究を進めるにあたっては、東京大学西松裕一名誉教授、岡村甫教授他各委員の方々に貴重な御指導を賜り、ここに深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)(コンクリートライブラリー第50号)
- 2) 鉄道総合技術研究所：コンクリート構造物設計標準に関する委員会報告書、1991
- 3) 岡村 甫：コンクリート構造物の限界状態設計法(共立出版)、1982
- 4) 松本嘉司、西岡 隆：トンネル設計理論(共立出版)、1992
- 5) 小林一輔、魚本健人、西村次男、古越仁：鋼繊維補強コンクリート部材の曲げ特性に関する研究、鋼繊維補強コンクリート論文集、1984
- 6) 石田智明、二宮康司、小泉 淳：鋼繊維補強コンクリートを用いたECL覆工体の耐荷機構について、トンネル工学研究発表会、論文・報告集第1巻、1991
- 7) 堀井秀之：フラグチャープ・ポスト・クッション問題とコンクリート・岩石・セラミックスに対する破壊力学の体系化、構造工学論文集、Vol.35A、1989
- 8) 六郷恵哲、内田裕市、加藤英徳、小柳治：コンクリートの曲げ強度の推定に関する破壊力学的検討、コンクリート工学論文集、第3巻第1号、1992