

併進工法による鋼繊維補強コンクリート ライニングの限界状態設計法に関する研究

鬼頭 誠¹・梶原 雄三¹・峯本 守²

¹正会員 日本鉄道建設公団 設計室 (〒100 東京都千代田区永田町2-14-2)

²正会員 日本鉄道建設公団 理事

地下鉄建設にあたり、沈下や漏水が少なく、経済的で耐久性の良好な覆工体を構築するため、鋼繊維補強コンクリートを用いた新しい直打ちコンクリートライニング工法の研究開発を行ってきた。このライニングの設計については、これまでの許容応力度的な設計方法では充分にその材料特性を評価・活用できない。そこで、円環や直方供試体等の実験を行い、土中円環状構造物の特性や、鋼繊維のひびわれが生じた後も引張力が伝達される状態等を加味した合理的な耐力算定法を研究してきた。その結果、鋼繊維補強コンクリートの引張力を規定したひびわれの状態に応じて考慮した新しい限界状態設計法を策定した。

Key Words : *steel fiber reinforced concrete, tension softening curve, crack mouth opening displacement, limit states design method*

1. 序 論

我が国の大都市における交通問題は深刻化してきており、これを解決するため地下鉄道網の整備促進が急がれている。この地下鉄トンネルの建設にあたっては、安全に、速く、品質の良い覆工体を経済的に構築するとともに、沈下や漏水が少なく、環境にも影響が少ない工法が求められている。

こうした状況のなか、新しいシールド工法の一つである直打ち無筋コンクリートライニング工法(以下併進工法という)を、我が国の軟弱地盤や水圧の高い大深度など厳しい条件に適合するよう開発研究してきた。これは、掘削に従来の密閉型シールドを用い、覆工には流動性の良好なコンクリートをシールドテール部の妻枠部より連続加圧注入し、地盤に密着した高品質の覆工体を構築するもので、周辺地盤を緩めず沈下も少ない等の特長を有し、環境上も有効な工法である。

この新しい工法には、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、これまでの許容応力度的な設計法では十分にその材料特性を活用した設計ができない。そこで、鋼繊維補強コンクリートのひびわれが生じて、張力が伝達され

る特性や土中の円環状覆工には軸力が作用すること、さらには、併進工法の特徴である周辺地盤に密着した覆工が可能であることなどを勘案した安全で合理的な新しい設計手法を確立する必要があった。

こうした状況のもと、土中構造物の構造系の耐力と破壊の関連等を解明する円環供試体載荷実験、また部材の限界耐力算定と密接な関係のあるひびわれ状態を考慮した鋼繊維補強コンクリートの引張力等を解明する直方供試体曲げ実験など各種実験を行ってきた¹⁾。これら多くの実験結果をもとに、限界状態設計法として破壊状態を考慮した直打ち鋼繊維補強コンクリートライニングの耐力算定法を日本鉄道建設公団設計指針²⁾としてまとめることができた。これに至る一連の各種研究成果等について終局限界状態を主体に以下に述べる。

2. 覆工の耐力検討

一般に、土中円環構造物は軸圧縮力が主体であり、覆工の一部がひびわれ状態となっても構造体としての耐力は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、構造体としての耐力を推定するため、覆工の部材にはひびわれ状態を考慮できる応力-ひずみ曲線を用い、周辺地盤はバネと

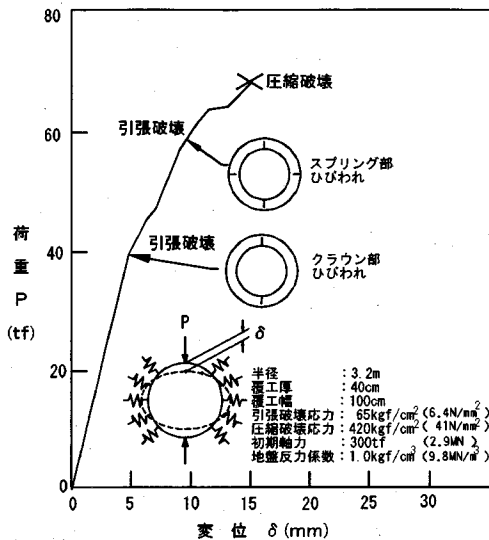


図-1 円環地中構造物の耐荷力

し、そして模型実験が行い易い集中荷重とした図-1に示すようなモデルで平面応力条件下の面要素を用いた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にひびわれが生じるような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、ひびわれ発生前の覆工に働く断面力に対して、覆工の一部に顕著なひびわれが生じる状態に達した場合についての照査を行っておけば、安全側の設計になるものと考えられる。

3. 実験概要

前述のような考え方を検討し、合理的な耐力算定法を求めるため、主として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、実際のトンネル覆工厚を想定した40cm角供試体と一般の曲げ試験で行う15cm角供試体の直方供試体曲げ実験を行った。

表-1 コンクリート配合 (混入率1.0%)

粗骨材の最大寸法 mm	スランプの範囲 cm	水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	単位置量 (kg/m ³)				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/m ³	空気量調整剤 cc/m ³
20	18±2	50.3	60.9	78.5	196	390	998	640	2.44	23.4

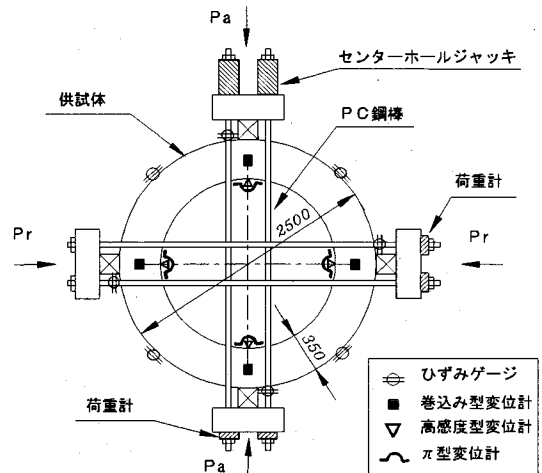


図-2 円環供試体載荷装置平面図

- ①円環構造としての破壊状態
- ②部材としての破壊状態
- ③ひびわれ開口幅-引張強度の関係 (引張軟化曲線)³⁻⁵
- ④ひびわれ深さ
- ⑤ひびわれの影響範囲
- ⑥部材厚の影響

(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、覆工幅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。このうち、通常の覆工に使用する混入率1.0%のコンクリート配合を表-1に示す。

計測にあたっては、以下のような目的で各種計測機器を取付けて測定した。なお、ひびわれ深さについては、目視等により調べた。

- ①載荷荷重と反力荷重 : 荷重計
- ②供試体のひびわれ幅 : π型変位計
- ③供試体の変位量 : 高感度型変位計

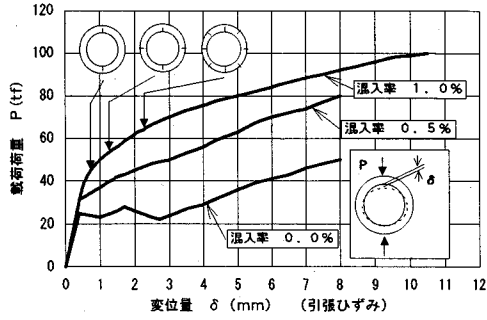


図-3 載荷荷重-変位の関係

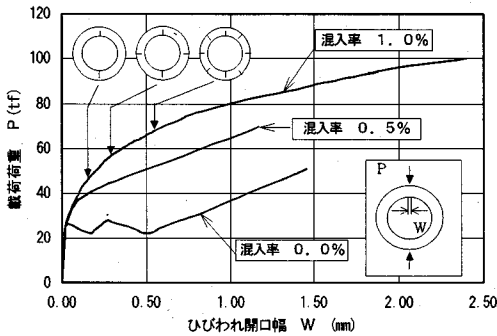


図-4 載荷荷重-ひびわれ開口幅の関係

④載荷方向の直径変位量：巻込み型変位計

⑤供試体側面のひずみ状態：ひずみゲージ

載荷方法は、0.1mm/minの変位制御により P_a 方向から水平載荷を行った。ここで、 P_a 方向は載荷側、 P_r 方向は反力側である。

b) 測定結果

図-3に3供試体の荷重-変位関係を示す。無筋コンクリートの供試体では、載荷荷重約25tf(245kN)でひびわれが発生し、その後、この前後の載荷荷重を保ちながら変位が進み、さらに載荷を続けていくと再び載荷荷重は増加する傾向を示した。混入率1.0%の供試体では、約43tf(421kN)で最初にひびわれが発生しているが、その後の荷重は変位とともに滑らかに増加しており、変位量8mmでは無筋コンクリートに対して、約1.8倍程度の載荷荷重を示した。

図-4に荷重-ひびわれ開口幅の関係を示す。各混入率の供試体とも、荷重-変位の結果と同様に載荷荷重の増加につれ、ひびわれも進行する特性曲線を示した。このことは、変位とひびわれ開口幅が円環構造の耐荷力に影響を与えているものと考えられる。通常の覆工に用いる鋼繊維混入率1.0%の供試体では、載荷荷重約43tf(421kN)で目視できるひびわれ

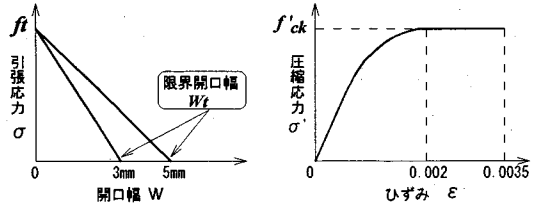


図-5 引張軟化曲線および圧縮応力-ひずみ曲線

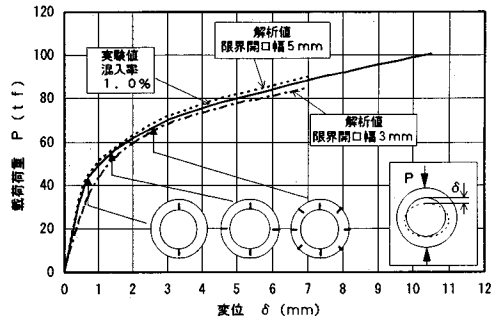


図-6 円環供試体の解析結果

が載荷側に生じ、ひびわれ開口幅は0.2mm程度を示した。さらに載荷を継続すると約65tf(637kN)から反力側付近と反力側から45度付近の外面にひびわれが数本発生したが、ひびわれ開口幅に対し荷重はその後滑らかに増加した。実験終了時点の載荷荷重約100tf(980kN)では、ひびわれ開口幅が2.4mmで、ひびわれ深さは覆工厚の8割程度となり、ひびわれが貫通することはなかった。

(2) 円環供試体載荷実験の解析

無筋コンクリートの供試体では、ひびわれが発生するとひびわれ開口幅だけが拡大する傾向を示したが、混入率1.0%の供試体では、ひびわれ発生後においても載荷荷重は滑らかに増加しており、円環構造物の構造耐力は部材断面耐力に比べて、きわめて大きいことが明らかとなった。このことは、鋼繊維により伝達される引張応力がひびわれ面に作用しているためと考えられる。

このようなひびわれ状態と耐荷力の関係を解明するため、ひびわれ面での鋼繊維によって伝達される引張応力を、これまでの実験等から、図-5に示すような引張応力とひびわれ開口幅の単純な引張軟化曲線で表すものとした。そして、引張応力が0となる開口幅を限界開口幅 W_l として、ひびわれ発生後は

表-2 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

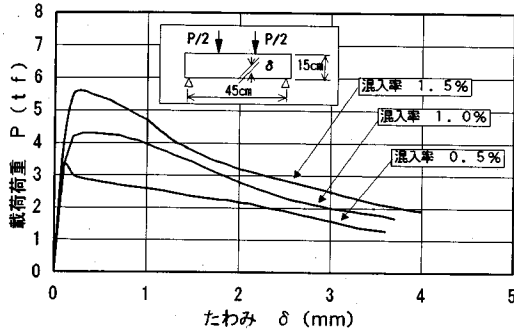


図-7 15cm角供試体の荷重-たわみ関係

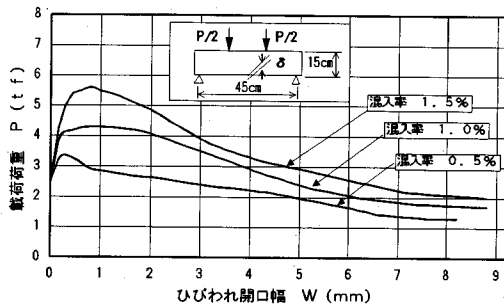


図-8 15cm角供試体の荷重-ひびわれ開口幅関係

この引張軟化曲線を用い、圧縮側にはコンクリート標準示方書(土木学会)⁶⁾に示されている応力-ひずみ曲線を用いてFEM解析を行った。Wtをいくつか変えて解析を行った結果、図-6に示すような載荷荷重-変位量の関係において、Wt=5.0mmとした場合の解析値が実験値をよく近似した。

以上のような解析結果から、耐荷力はひびわれ開口幅と引張応力の関係を用いて算定が可能であると推察され、そして軸力の作用する円環構造では、ひびわれが生じても直ちに構造的な破壊状態には至らず、ひびわれ後も耐荷力があることが明らかとなった。

このようなことから、トンネル覆工の断面破壊に対する安全性照査において、円環構造物の一部に最初のひびわれが発生する状態となる断面耐力を設計に用いれば、安全側の設計となることが確認された。

なお、断面力の算定については、最初にひびわれ

表-3 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)
40cm角	6	12	24	12	54

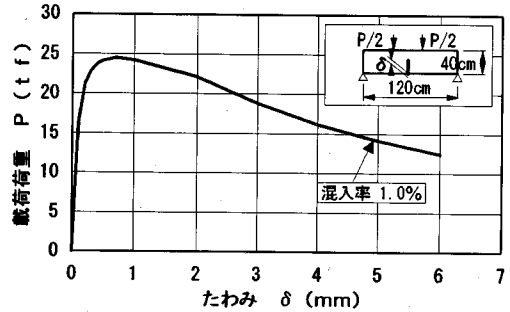


図-9 40cm角供試体の荷重-たわみ関係

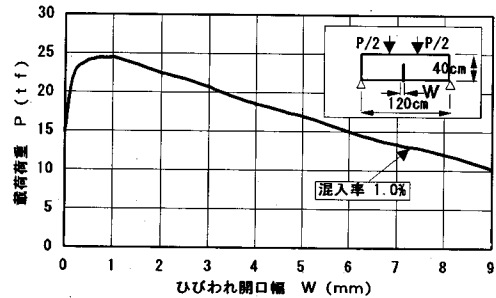


図-10 40cm角供試体の荷重-ひびわれ開口幅関係

状態となるまでの荷重-変位量の関係がほぼ直線的であり、断面の剛性は保たれているものと考えられることから、剛性-様リングとして取扱えばよいものとした。

(3) 直方供試体曲げ実験

a) 15cm角供試体の作成および載荷方法

供試体は、一般の曲げ試験で行われるものと同じ15cm×15cm×53cmの供試体形状とし、鋼繊維の長さ30mm、混入率は、0.0%、0.5%、1.0%、1.5%の72供試体を作成した(表-2)。コンクリート配合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、10mm程度になるまで載荷を継続した。

b) 15cm角供試体の測定結果

15cm角供試体の測定結果は次のとおりであった。鋼繊維補強コンクリートの載荷荷重-たわみ量の関係を図-7に示す。最大荷重を示した後の荷重変化

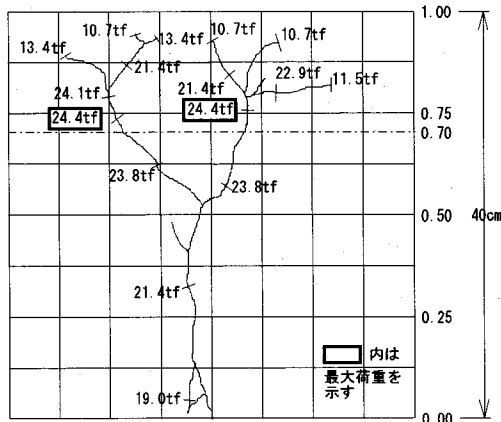


図-11 ひびわれ深さと荷重

は、たわみ量の増加に応じて滑らかに漸減しており、無筋コンクリートのように急激な破壊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-8に示す。ひびわれ発生後最大荷重を示し、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となっており、実験終了時点のひびわれ開口幅8mmとなっても、まだ断面耐力は保持されていた。通常のトンネル覆工に用いる混入率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(41.2kN)の断面耐力を保持していた。そして目視によるひびわれ深さは、最大荷重時で断面高さの70%以上を示し、ひびわれ開口幅が8mm程度では80%を超えていたが、ひびわれが貫通することはなかった。

c) 40cm角供試体の作成および載荷方法

供試体は、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の供試体形状とし、鋼繊維の長さ30mm、混入率が、0.0%、0.5%、1.0%、1.5%の54供試体を作成した(表-3)。コンクリート配合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。

d) 40cm角供試体の測定結果

40cm角供試体の測定結果は次のとおりであった。載荷荷重－たわみ量の関係は、図-9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、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

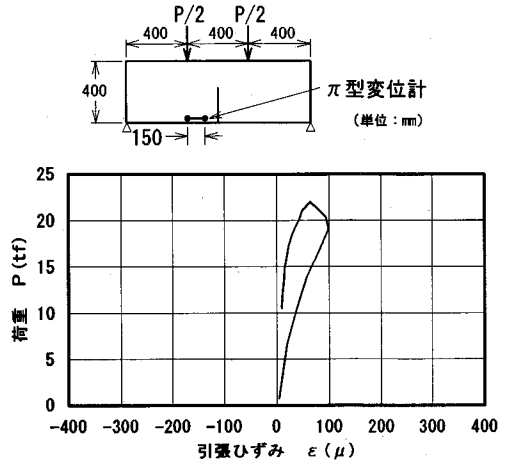


図-12 荷重－変位の関係(引張ひずみ)

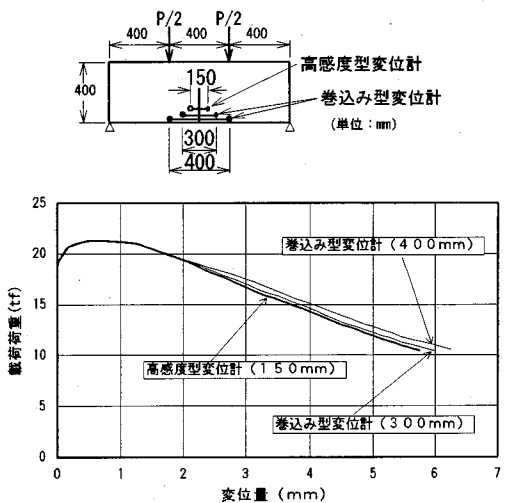


図-13 荷重－変位の関係(下面引張変位)

係を図-10に示す。ひびわれ発生後最大荷重を示し、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となった。ひびわれ開口幅が2.0mmの場合で、約22.5tf(221kN)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-11に示すように断面高さの70%を超えており、実験終了時点で80%以上であったが、ひびわれが貫通することはなかった。

次に、ひびわれ箇所近傍の引張ひずみを調べるため、図-12に示すように、スパン中央部付近の供試体下面に、標点間距離150mmのπ型変位計を設置した。ひびわれが発生するまでの変位(引張ひずみ)

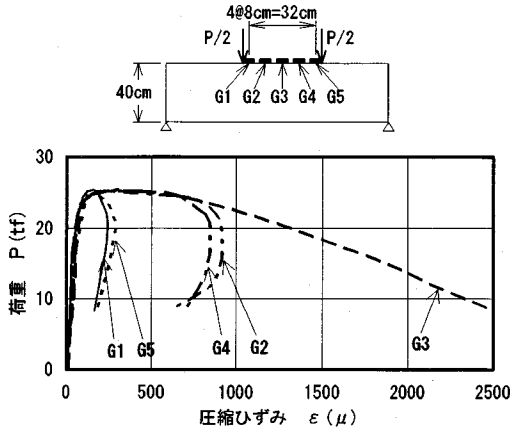


図-14 圧縮縁ひずみ-荷重の関係

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、ひびわれ部分に周辺の変位が集約するため、近傍の引張ひずみは除荷される傾向を示した。

また、ひびわれ箇所を挟むような2点間の変位を調べるため、図-13に示すように、ひびわれ開口幅測定として標点間距離150mmの高感度変位計と、ひびわれを挟む300mm、400mm間の変位測定として巻込み型変位計を設置した。荷重と2点間の変位量としてまとめると、150mm間の変位量と300mm間の変位量がほぼ一致しており、ひびわれの影響範囲（後述）は、ひびわれを含む30cm程度と考えられる。

以上の実験から、引張ひずみによる伸びがひびわれ開口幅に集約されることが示された。

一方、供試体上面に貼り付けたひずみゲージで計測した圧縮側縁ひずみ-荷重の関係を図-14に示す。G1~G5の圧縮側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は圧縮側縁ひずみが増加しているが、G1~2、G4~5の圧縮側縁ひずみは、ひびわれが進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、除荷され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。

このことから、G1~G5間の約30cm程度がひびわれの影響範囲と推察される。

(4) 直方供試体曲げ実験の解析

15cm角および40cm角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

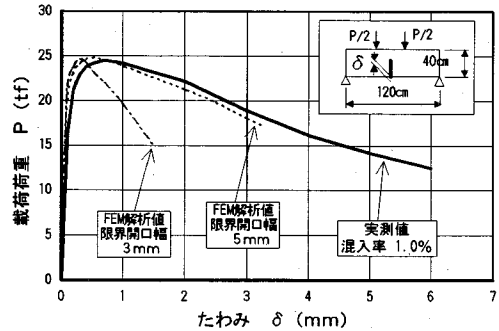


図-15 40cm角供試体の荷重-たわみ関係

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、ひびわれ面に鋼繊維に引張応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、引張軟化曲線の限界開口幅 W_t をいくつか変えてFEM解析を行った。この結果、図-15に示したように、 $W_t=5.0\text{mm}$ の場合が実験値の最大荷重やひびわれ発生後の載荷荷重の漸減傾向をよく近似した。また、15cm角供試体でも同様であった。したがって、鋼繊維補強コンクリート部材の断面耐力は、ひびわれ開口幅と鋼繊維の受け持つ引張強度の関係をを用いて算定が可能であると推察される。

ひびわれに伴う引張ひずみ状態の変化については、実験結果と同様に、ひびわれ近傍の下面引張ひずみは除荷される傾向を示し、ひずみによる伸びがひびわれに集約されることが判った。そして、その影響範囲は、40cm角の供試体で30cm程度と推察された。反対に圧縮側では、両側の載荷点に近いところでは、除荷される挙動を示しているが、ひびわれ直上付近ではさらに増加する傾向を示し、ひずみが局所化していることがうかがえた。したがって、ひびわれに伴うひずみ変化は、ひびわれに吸収されるような傾向を示し、後述する影響範囲を考慮して耐力算定を行う必要があるものと推察された。

この断面算定に用いるひびわれ幅を直接測ることは困難なので、比較的測定が容易なたわみ量をもって想定し、設計実務に用いることとした。このため、以下のようにたわみ量からひびわれ開口幅を求めることを検討した。

すなわち、図-16に示すように、ひびわれが進行し、弾性たわみ量が無視できる状態を想定して、たわみ量からひびわれ開口幅を求めることとした。

図-16に示した左右の載荷点位置のたわみ量は、

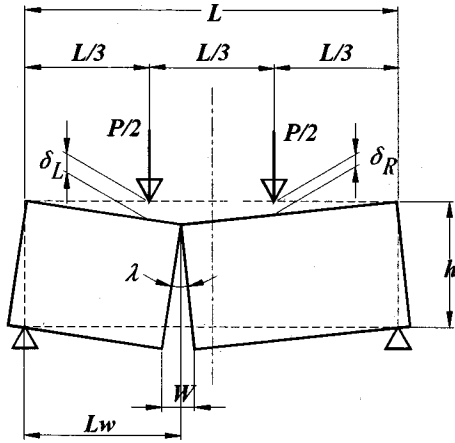


図-16 ひびわれ位置のたわみ-開口幅の関係

ひびわれ発生位置により異なる値を示すが、両載荷点の平均たわみ量 δ_c は、

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

となり、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様の平均たわみ量を示すこととなる。また、 $W = \lambda h$ より、式(1)は次のようにひびわれ開口幅 W で表せられる。

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

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(2)を図-17に示す。この図から、実験で用いた範囲での供試体寸法、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(2)と同じような傾向を示すことが明らかとなった。すなわち、載荷点での変位量を測定すれば、ひびわれ発生位置に無関係に開口幅を推定できる。

以上のように直方体の曲げ実験結果から、ひびわれ深さについては、最大荷重に達した時点で断面高さの70%以上を示したこと、最大開口幅8mmの時点では80%程度までに進展したが、ひびわれが貫通することはなく、ひびわれ面での引張応力が鋼繊維により保たれ耐荷力があったことから、設計断面耐力の算定にあたっては、ひびわれ深さを70%までにとどめておけば安全側の検討を行えることが判った。

そして、断面耐力算定に用いるひびわれ面での引張応力は、ひびわれ開口幅との関係で推定可能であるが、適確に測定することが困難なひびわれ開口幅

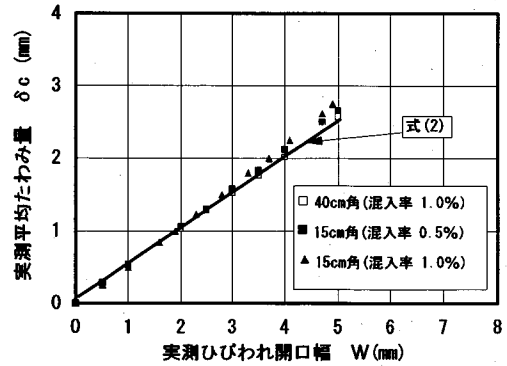


図-17 実測ひびわれ開口幅と実測平均たわみ量の関係

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⁷⁾を行えばよいことが判明した。

4. ひびわれの影響範囲の検討

ひびわれの影響範囲とは、図-18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、その引張応力をもとに部材の耐力算定を行うものであり、以下にその検討結果を示す。

(1) ひびわれ開口幅と影響範囲の関係

a) ひびわれの影響範囲の定義

曲げ実験のたわみ量は、ひびわれによる変位と供試体の弾性変位量との和⁸⁾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。載荷点各々のたわみ量はひびわれ位置により異なるが、式(1)からひびわれによるたわみ量の和は $\lambda L/3$ で一定となり、どの位置にひびわれが生じても図-19のように中央部にひびわれが生じた場合として載荷点変位量を扱えばよい。そこで、厳密には載荷点位置の変位量 δ_L は、ひびわれ面の変形角 λ とその他の部分の弾性変形量から式(3)のようになる。ここに、右辺第1項は弾性変位を、第2項はひびわれによる変位を表わしている。

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

ここに、 P は載荷荷重、 L は曲げ供試体スパン長、 λ は変形角、 I は断面2次モーメント($I = bh^3/12 = h^4/12$)である。

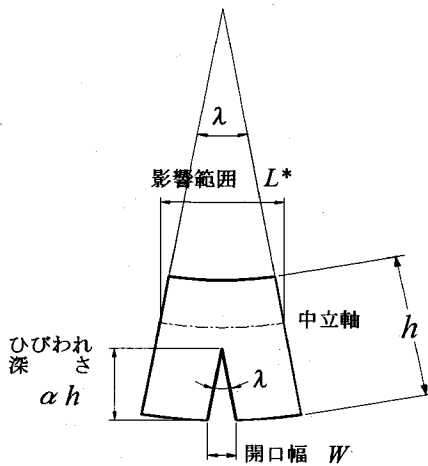


図-18 変形角と影響範囲

式(3)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-18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。

b) 開口幅とひびわれ深さ

図-18に示した関係から、ひびわれ面における変形角 λ は、ひびわれ開口幅 W とひびわれ深さから式(4)の関係となる。

$$\lambda = \frac{W}{\alpha h} \quad (4)$$

ここに、 α は断面高さに対するひびわれ深さの割合である。

したがって、曲げ実験で測定された荷重点変位量とひびわれ開口幅から、式(3)および式(4)により、ひびわれ深さ αh が計算される。

こうした諸関係により、実測値をもとにひびわれ開口幅 W とひびわれ深さの割合 α の関係を算定すると、図-20のようになる。ひびわれ発生後、開口幅の増加に伴ってひびわれ深さも大きくなりながら最大荷重に達し、その時のひびわれ深さは80%前後となり、その後、ひびわれ深さの進展は鈍り、最終的

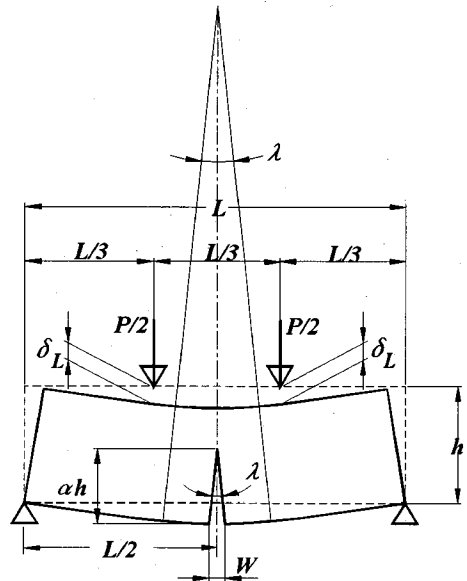


図-19 荷重点たわみ量と変形角

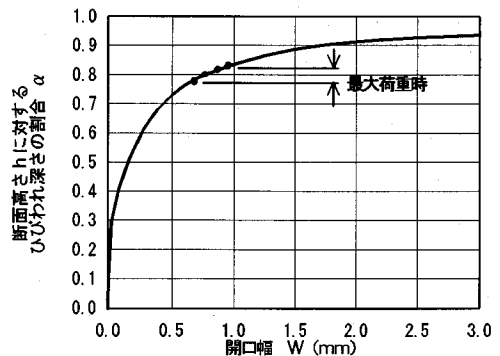


図-20 ひびわれ深さの割合と開口幅の関係

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。最大荷重におけるひびわれ深さの割合は、断面の80%前後であり、併進工法の断面耐力算定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止めたことになり、安全側の範囲を使用したこととなっている。

c) ひびわれ深さと影響範囲

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-21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(5)のようになる。

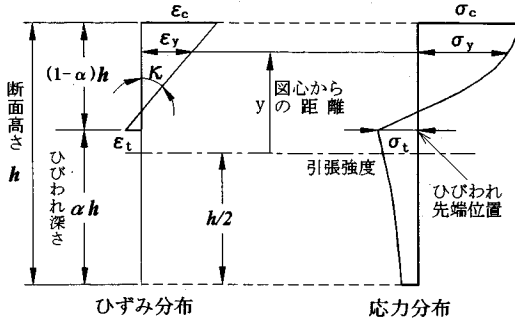


図-21 部材断面のひずみ分布と応力分布の関係

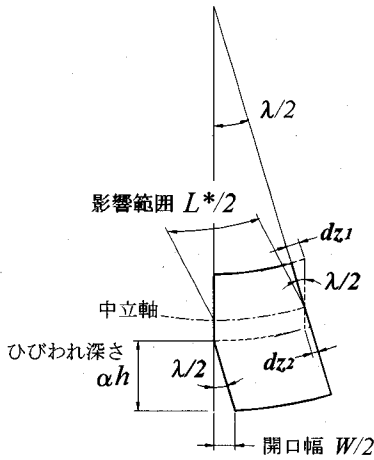


図-22 影響範囲の変形状況

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_t}{(1-\alpha)h} \quad (5)$$

影響範囲端では、平面保持が成立しているの、図-22から影響範囲 L^* のたわみ角は式(6)のようになる。

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{dz_1 + dz_2}{(1-\alpha)h} \quad (6)$$

また、 $L/2$ 区間の縁変形量は縁ひずみから、式(7)のようになる。

$$dz_1 = \varepsilon_c \cdot \frac{L^*}{2}, \quad dz_2 = \varepsilon_t \cdot \frac{L^*}{2} \quad (7)$$

したがって、

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{(\varepsilon_c + \varepsilon_t) \cdot L^*}{2(1-\alpha)h} \quad (8)$$

よって、影響範囲 L^* におけるたわみ角 λ は式(9)のようになる

$$\lambda = \frac{(\varepsilon_c + \varepsilon_t)}{(1-\alpha)h} \cdot L^* = \kappa \cdot L^* \quad (9)$$

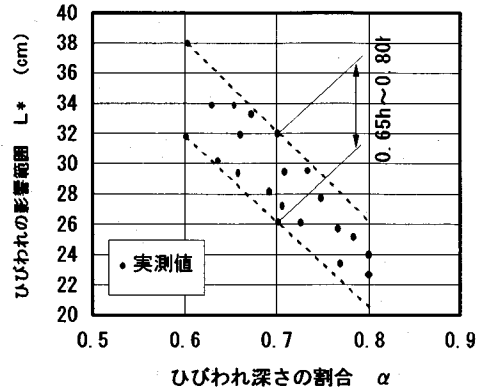


図-23 ひびわれ深さの割合と影響範囲

したがって、式(4)と式(9)から影響範囲 L^* は、式(10)のように誘導される。

$$L^* = \frac{1-\alpha}{\alpha(\varepsilon_c + \varepsilon_t)} \cdot W \quad (10)$$

この影響範囲は、ひびわれ開口幅 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。

式(10)により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 $60\mu \sim 150\mu$ ⁹⁾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。

影響範囲とひびわれ深さとの関係を図-23に示す。本図から、ひびわれ深さが断面の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は平均で断面高さの70%となる。

(2) ひびわれの影響範囲を用いた耐荷力の検討

a) 算定手順

ひびわれ深さの割合を $\alpha=0.7$ と仮定した場合の断面耐力算定の妥当性を確認するため、図-24に示す計算手順により断面耐力、すなわち載荷荷重相当値とたわみ量を算定し、曲げ実験時の載荷荷重と実測たわみ量との比較検討を行った。

たわみ量算定にあたっては、弾性梁モデルによるたわみ量とひびわれによる影響を考慮したたわみ量の合計値とした。なお、図の手順2に示した圧縮応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書に示されているモデルを用い、引張軟化曲線については、これまでの実験結果から限界開口幅を5mmとした場

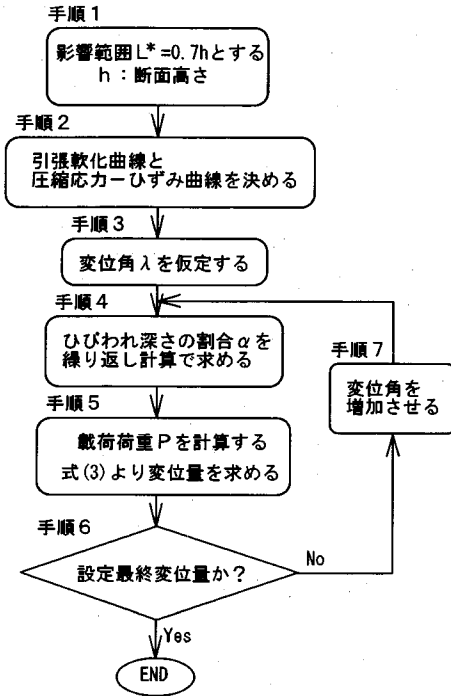


図-24 検討計算手順

合が比較的良好な結果を示していたのでこれを用いた入力条件とした。

これらの圧縮応力-ひずみ関係とひびわれ面の応力分布から断面力は、図-21に示した関係から、式(11)および式(12)で計算される。

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c(y) \cdot y \cdot b \, dy = \frac{PL}{6} \quad (11)$$

$$N' = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c(y) \cdot b \, dy = 0 \quad (12)$$

ここに、 M は曲げモーメント、 $\sigma_c(y)$ は図心から距離 y の応力、 y は図心からの距離、 b は供試体の幅($=h$)、 h は供試体の高さ、 P は載荷荷重、 L は供試体のスパン長、 N' は軸方向力である。

そして、圧縮側のひずみ分布の傾き κ は、式(9)から式(13)のように計算される。

$$\kappa = \frac{\lambda}{L} \quad (13)$$

b) 算定結果

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(13)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(12)の状態としてひびわれ深さの割合 α を求めた。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(11)により求め、

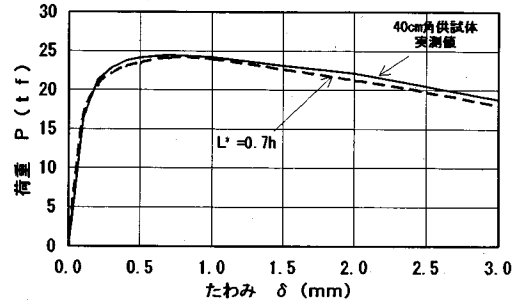


図-25 $\alpha=0.7$ を用いた計算値と実測値の比較

このモーメントから載荷荷重 P を逆算した。これらの変形角 λ と載荷荷重 P を用いて式(3)からたわみ量が算定される。この計算値と実測の変位量を比較したものが図-25である。

このように、ひびわれの影響範囲を $0.7h$ とすると実験結果の最大荷重値および荷重の漸減している状態をよく近似できた。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、これらの算定には梁モデルが適用できるとの結論が得られた。

5. 鋼繊維補強コンクリート部材の設計方法

以上のような解析結果から、次のように軸力の作用するトンネル覆工体の部材耐力を算定することとした。

(1) 鋼繊維の受け持つ引張強度の算定方法

a) 鋼繊維補強コンクリートの応力分布の簡便化

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開口幅の関係が必要であり、これらは実験結果等から、図-26(a)に示すように開口変位が大きくなるにしたがって伝達応力が小さくなる関係であることが判った。これらの応力分布形状は、図-26(b)のようであるが、ここでは設計実務上の簡便さを考慮し、図-26(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_y は、ひびわれ開口幅 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。

b) ひびわれ深さの制限値

ひびわれ深さは、以下に示すような理由から、ひびわれ深さの割合を $\alpha=0.7$ までとする耐力力曲線を用いるものとして安全側の設計となるようにした。

① 円環供試体の載荷実験から、構造的な耐力は断面耐力に比べてきわめて大きなものであり、その

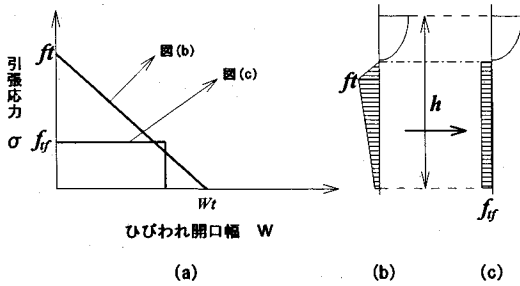


図-26 設計に用いる伝達応力-ひびわれ開口幅

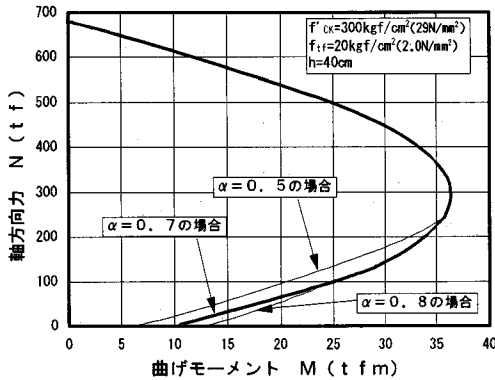


図-27 ひびわれ深さによる断面耐力の比較

ひびわれ深さは約80%までに達しても構造的な耐力は保持されているが、複数のひびわれ発生状態となるとたわみ量は大きくなっていることから、円環構造全体の剛性は低下しているものと考えられる。このような有効断面の減少など、メカニズムの終局限界状態に対する検討を行い構造系の耐力算定を行う方法も考えられるが、設計の簡便化などの観点から、ここでは、最初にひびわれが発生し、ひびわれ深さが70%までに制限した状態における断面耐力に対して、剛性一様リングとして算定した断面力との比較検討を行うことで、安全側の設計とすることとした。

- ② これまでの実験結果から、最大荷重を示す時点のひびわれ深さは、断面高さの70%を超えており、最大開口幅8mmを示した時点では80%に達し、ひびわれが貫通することはなく耐力余力があったことから、70%までにとどめておくことは安全側の範囲となる。
- ③ 圧縮による急激な破壊状態への移行防止やコンクリートの耐久性確保の観点から、30%の圧縮領域を残すこととした。

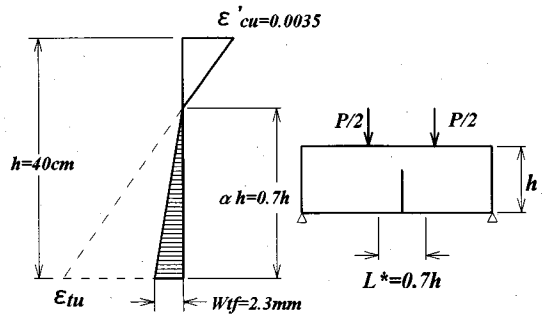


図-28 ひびわれ深さと設計限界開口幅

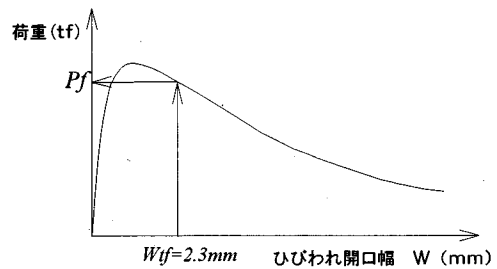


図-29 限界開口幅からの荷重の求め方

- ④ 想定するひびわれ深さが大きいほど圧縮領域は少なくなるものの、圧縮応力の合力と断面中心との距離が長くなるので、図-27に示すようにその計算上の耐力は増大する。しかしながら設計上、合理的・経済的な範囲として、 $\alpha=0.7$ とする耐荷力線にとどめた。

c) ひびわれの設計限界開口幅

ひびわれの影響範囲を $0.7h$ と仮定することが適切であるとの結論が得られた。したがって、設計に用いる部材のひびわれの設計限界開口幅は、図-28に示すように設計部材高さ40cmについて算定すると、ひびわれ深さの制限値が $\alpha=0.7$ であること、圧縮縁の終局ひずみが $\epsilon'_{cu} = 0.0035$ であることから、

$$\begin{aligned}
 W_{jf} &= L^* \cdot \epsilon_{tu} \\
 &= 0.7h \cdot \epsilon'_{cu} (0.7/0.3) \\
 &= 0.7 \times 400 \times 0.0035 \times (0.7/0.3) \\
 &= 2.3 \text{ mm} \quad (14)
 \end{aligned}$$

と、終局限界状態に対する引張応力を算定するひびわれの設計限界開口幅 W_{jf} を設定できる。

なお、終局限界状態の他に耐久性に関する使用限状態の検討を行うことも必要である。この場合、鋼繊維補強コンクリート覆工の耐久性については、

表-4 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） $k_t = 0.6 / (h^{1/3})$ (h: 部材の断面高さ(m)) 鉄道構造物等設計標準より		
部材の断面高さ (m)	設計引張強度に乘じる係数	0.15mの場合を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） $k_b = 0.5 / (h/2)^{1/3}$ (h: 部材の断面高さ(m)) 鉄道構造物等設計標準より		
部材の断面高さ (m)	設計曲げ強度に乘じる係数	0.15mの場合を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」 (岐阜大学: 小柳ほか)より		
一辺の長さ (cm)	正方形断面曲げ強度推定値 (kgf/cm ²)	15cmの場合を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

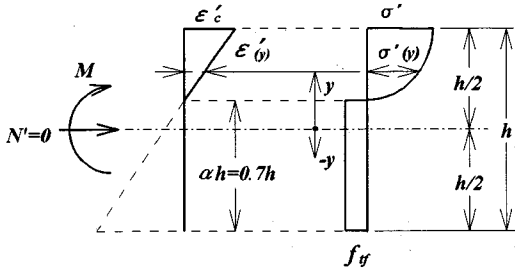


図-30 応力-ひずみ関係と断面耐力の算定

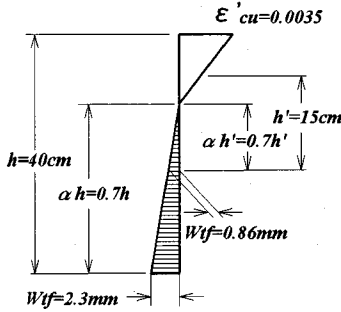


図-31 部材寸法と限界開口幅

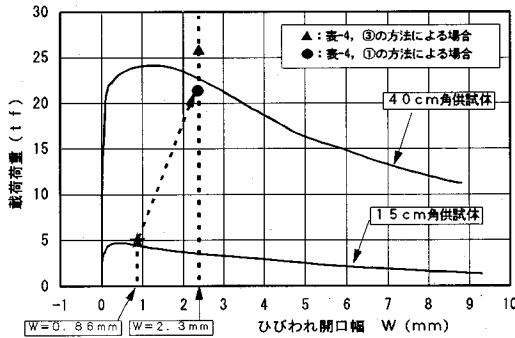


図-32 部材寸法等の影響を考慮した断面耐力の算定結果

未解明な点もあるが、ひびわれが耐久性に大きく寄与するものとして、これを制限する考え方で照査することとしている。日本鉄道建設公団²⁾では、使用限界状態においては通常作用する荷重を用い、安全係数等、基準とする1.0を用いてひびわれ開口幅を検討することとしているので、発生するひびわれ開口幅は一般には鉄筋コンクリートの土中環境でのひびわれ制限値以下となり、使用限界状態よりも終局限界状態の方が厳しい条件となるので、終局限界状態を基本として設計することとしている。

d) 引張強度の算定

前項で求めた設計限界開口幅に相当する荷重Pを

図-29に示すように、曲げ試験の荷重-たわみ曲線から求める。次に荷重と軸方向力=0の関係を満足するように、図-30に示した $\alpha=0.7$ とした場合の応力-ひずみ関係から、鋼繊維補強コンクリートの引張強度 $f_{t'}$ を求める。

(2) 部材厚を考慮した引張強度算定

引張強度の算定にあたっては、実際の設計部材寸法による試験結果から求めることが好ましいが、大規模な部材曲げ試験であり、設計実務の観点からは一般に用いられている15cm角供試体の曲げ試験から求められることが要求される。そこで、鋼繊維補強コンクリートの引張強度を低減補正して算定できるように検討を行った。この場合、図-31に示したようにこれまでの実験結果から、限界開口幅を部材寸法に応じて定めた引張力を用いて耐力算定を行うこととした。

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強度に大きく依存していること、また、実験結果と表-4に示した既往の研究を参考にして比較すると、図-32に示すように、コンクリート部材の係数¹⁰⁾を用いた①の方法による場合が比較的計算値と一致し、安全側の値を示したことなどから、式(15)に示すような補正式を用いて部材寸法等の影響を考慮するものとした。

$$k_t = \frac{0.53}{h^{1/3}} \quad (15)$$

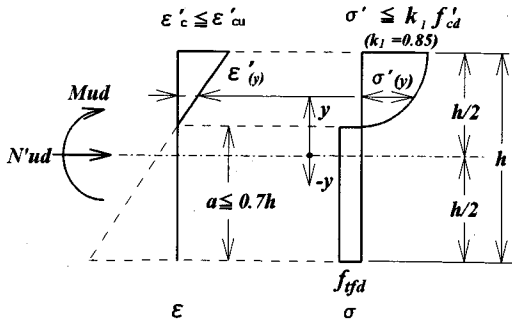


図-33 応力-ひずみ関係と断面耐力の算定

ここに、 h は部材断面の高さ(m)である。

したがって、設計断面寸法が $h=0.40$ m の場合に用いる引張強度 $f_{fd(0.40)}$ は、0.15m角供試体から算定した鋼繊維の受け持つ引張強度 $f_{fd(0.15)}$ に、 $k_1=0.72$ を乗じることにより求められる。

(3) 部材断面の耐力算定

a) 算定条件および算定式

鋼繊維補強コンクリート部材の断面破壊に対する検討において、その設計断面耐力を部材断面の単位幅について算定する場合、以下のような仮定条件のもとに設計を行うものとした。

- 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 鋼繊維補強コンクリート部材の圧縮応力-ひずみ曲線については、コンクリート標準示方書(土木学会)によることを原則とする。
- ③ 鋼繊維補強コンクリート部材の引張側の応力は、鋼繊維の受け持つ設計引張強度 f_{fd} を考慮する。
- ④ ひびわれ深さは、部材高さの70%までとする。
- ⑤ 鋼繊維の受け持つ引張強度 f_{fd} の想定されるひびわれ面において、設計限界開口幅 W_f を考慮する。

こうした条件から、設計断面耐力の算定は、図-33に示した記号等に基づき、式(16)、(17)により求めることができる。

$$M_{ud} = \left(\int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot y \cdot b \, dy \right) \cdot \frac{1}{\gamma_b} \quad (16)$$

$$N_{ud} = \left(\int_{-h/2}^{h/2} \sigma(y) \cdot b \, dy \right) \cdot \frac{1}{\gamma_b} \quad (17)$$

ここに、 M_{ud} は設計曲げ耐力、 N_{ud} は設計軸方向圧縮耐力、 h は覆工の厚さ、 b は単位幅、 γ_b は部材係数である。

b) 耐力曲線の算定

ひずみの状態は、終局圧縮ひずみおよびひびわれ深さの制限値を保ちながら、図-34のように移行す

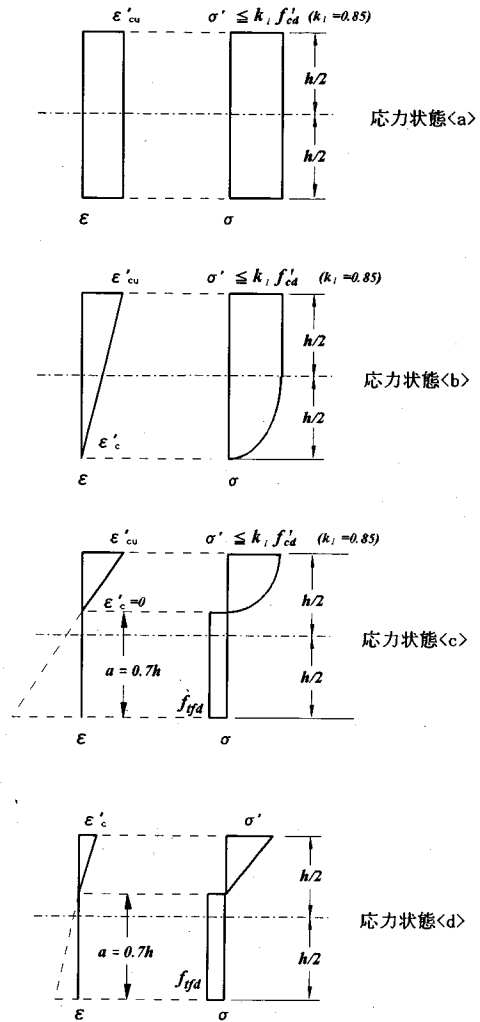


図-34 ひずみ状態の設定と応力分布状態

るものとして (M_{ud}, N_{ud}) 曲線を作成する。

- ① 全断面にわたって、コンクリートの終局圧縮ひずみ ϵ'_{cu} となる状態 (応力状態<a>)。
- ② 圧縮縁ひずみがコンクリートの終局圧縮ひずみ ϵ'_{cu} で、下側の縁ひずみが $\epsilon'_{cu} = 0$ となる状態 (応力状態)。
- ③ 圧縮縁ひずみがコンクリートの終局圧縮ひずみ ϵ'_{cu} で、ひびわれ深さが最大値となる状態。すなわち、 $\epsilon'_c = 0$ の点が制限値の $a = \alpha h$ まで進展した状態 (応力状態<c>)。
- ④ ひびわれ深さの制限値 $a = \alpha h$ を保ちながら、圧縮縁ひずみが減少し、設計軸方向力 $N'_{ud} = 0$ となる状態 (応力状態<d>)。

表-5 直打ちコンクリート覆工の安全係数（例）

安全係数		限界状態		終局限界状態		使用
				断面破壊に対する検討		限界状態
				脱型時	完成時	完成時
材料係数 γ_m	コンクリート γ_c	圧縮	1.3	1.3	1.0	
		引張	1.3	1.3	1.0	
荷重係数 γ_f	覆工自重		1.05	1.05	1.0	
	土圧	鉛直方向	1.0	1.1	1.0	
		水平方向	1.0	1.1	1.0	
	水圧	1.0	1.0	1.0		
	地盤反力		1.0	1.0	1.0	
構造解析係数	γ_a	1.0	1.0	1.0		
部材係数 γ_b	曲げ	1.15	1.15	1.0		
	圧縮	1.3	1.3	1.0		
構造物係数	γ_i	1.0	1.1	1.0		

c) 安全性照査

覆工の設計に用いる安全係数は、表-5に示すとおりであり、この安全係数の本覆工に用いる完成時の終局限界状態での採用値については以下のように考えた。

①材料係数 γ_m : コンクリート強度に対しては、コンクリートの打ち込み条件にもとづく変動、養生の相違による影響、現場練りによる品質管理の変動、打設されたコンクリートの不均一性などの変動要因があり、材料係数を用いて安全性を確保することになる。鋼繊維補強コンクリートは、無筋コンクリートに比べて圧縮タフネスにすぐれ、圧縮強度もいくぶん上まわることも考えられるが、無筋コンクリートと同じ安全係数 $\gamma_c=1.3$ とした。

そして、鋼繊維補強コンクリートの引張に対する安全係数については、引張力が圧縮と同様にコンクリートの強度に準拠していること、また、各種実験結果から安全側の算定手法を用いていることから、圧縮に対する安全係数と同じ係数 $\gamma_c=1.3$ とすることにした。

②荷重係数 γ_f : 設計荷重は、今までのトンネルの施工実績などから十分に安全側の荷重体系であるため、当面、「土木学会トンネル標準示方書（シールド編）」の荷重体系を採用するものとした。したがって、終局限界状態の検討において一般に用いる $\gamma_f=1.0\sim 1.1$ とした。

なお、覆工自重については自重の変動が、シールド掘削時の余堀により巻厚が増加することにより生ずるため、 $\gamma_f=1.05$ とした。

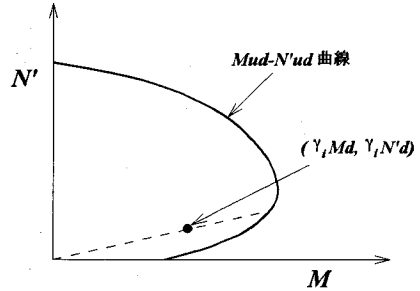


図-35 安全性の検討

③構造解析係数 γ_a : 本工法による覆工は剛性一様なリングであり、セグメントのようなボルト等の継手がなく、実構造と解析モデルとの差がほとんどないものと考えられる。また、フレームモデルにより円形断面を擬似的に解析することから、節点上の断面力は理論的な円形構造より大きめの値となる。したがって、この手法による設計は一般に安全側となるので $\gamma_a=1.0$ とした。

④部材係数 γ_b : トンネルのような不静定構造物は、最大曲げ応力点でひびわれが生じて、応力の再配分が行われ破壊に至らず、構造全体としての耐力は大きくきわめて安全性が高いこと。また、覆工厚は一般に設計寸法より大きくなることなどから、曲げと軸方向力を受ける部材としての安全性の検討はコンクリート標準示方書の値 $\gamma_b=1.15$ とした。

⑤構造物係数 γ_i : 完成時の構造物係数は、コンクリート標準と同じとし、 $\gamma_i=1.1$ とした。

以上の安全係数を用いて断面力および断面耐力の算定を行う。そして、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-35に示したように設計断面力の点 $(\gamma_f \cdot M_d, \gamma_i \cdot N'_d)$ 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。

以上のようにして安全性の検討ができる。

6. 結 論

鋼繊維補強コンクリートの円環供試体載荷実験および直方供試体曲げ実験を行い、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。

①トンネルの覆工における破壊、ひびわれ状態、耐荷力等、構造耐力の解明ができた。

- ②覆工の構造耐力を算定する場合、初めに顕著なひびわれが生じる状態までの耐荷力を用いれば安全側の耐力となる。したがって、一部部材の耐荷力をもって設計計算を行うことで対応できる。
- ③構造耐力や部材の断面耐力を算定する場合、比較的単純な引張軟化曲線でこれを適切に表現できる。
- ④断面耐力算定にあたり、部材の70%のひびわれ深さを規定して耐荷力を求めれば、適切な安全側の設計ができる。
- ⑤ひびわれ深さを70%に規定した場合、その影響範囲は、0.7hとして設計限界ひびわれ開口幅を求めれば、実用的な耐荷力範囲が求まる。
- ⑥耐力算定に用いる鋼繊維の受け持つ引張強度 f_{ff} は、一般に行われている15cm角供試体の曲げ試験に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_f により低減補正した値を用いてよいことが確認された。
- 以上のような結論が得られ、新しい直打ち鋼繊維コンクリートの限界状態設計法による我が国では初めての設計指針が制定された。

謝辞：以上の事項は、トンネル構造物としては全く初めての設計法であり、東京大学西松裕一名誉教授をはじめ、岡村甫教授、魚本健人教授ほか、多くの方々に貴重な御指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鬼頭誠, 峯本守, 梶原雄三, 松岡茂: 鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工の設計方法, 土木学会第4回トンネル工学研究発表会論文集, 1994, 11 (投稿中)
- 2) 日本鉄道建設公団: 掘削・覆工併進工法設計施工指針(案)都市トンネル編, 1992. 3. (追加資料, 1994. 5. を含む)
- 3) 六郷恵哲, 内田裕市, 小柳治, 岩佐正徳, 瀬古繁喜: 鋼繊維補強コンクリートの引張軟化特性, 土木学会第44回年次学術講演会, 1989. 10, pp. 290~291
- 4) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳治: コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集No. 442/V-16, pp. 101-107, 1992. 2
- 5) HORII Hideyuki and NANAKORN Pruatteha: Fracture Mechanics Based Design of SFRC Tunnel Lining, *JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures*, pp.347-358, 1993
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, 3. 2. 3応力-ひずみ曲線, pp. 21-22, 1991. 9
- 7) 土木学会鋼繊維補強コンクリート研究小委員会: 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, pp58-61, 1983. 3
- 8) 石井祐一, 堀井秀之: クラック進展によるRC梁の曲げ変形量, 土木学会第46回年次学術講演会, 1991. 9
- 9) CEB: *CEB-FIP MODEL CODE 1990*, Bulletin d'information No.203~207, 1991. 7
- 10) 運輸省鉄道局, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 丸善, コンクリート構造物 10. 4. 2曲げモーメントおよび軸方向に対する検討, pp155-156, 1992. 4

(1994. 6. 29 受付)

STUDY ON LIMIT STATE DESIGN METHOD APPLIED TO EXTRUDED CONCRETE LINING METHOD WITH STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

Makoto KITO, Yuzo KAJIWARA and Mamoru MINEMOTO

We have studied the Extruded Concrete Lining method using the steel fiber reinforced concrete (SFRC) applied to subway. The target of our study is to develop the economical and durable lining method without the settlement and leakage induced by tunnel construction. The allowable stress design method, which has been conventionally used out design tunnel lining, cannot sufficiently evaluate the characteristics of SFRC on its tensile strength. So we carried out the loading tests using ring specimens and beam ones to establish the rational design method to compute the capacity of member section of the characteristics of SFRC which can transmit the tension through a crack opening with steel fibers bridging it. This paper presents the new limit state design method by defining the tensile strength and stress distribution of SFRC after the initiation of crack.