

RCセグメントの水密性に関する評価について

Evaluation of water-tightness of reinforced concrete segments

中村敏一¹⁾・石村彰生²⁾・西尾誠高³⁾・湯浅康尊⁴⁾・増野正男⁵⁾

Toshikazu NAKAMURA, Akio ISHIMURA, Masataka NISHIO, Yasutaka YUASA, Masao MASUNO

When reinforced concrete segments are used in tunnels subject to action of internal water pressure, the axial tensile force acts on the lining, resulting in an increase in the number of cracks and in crack width that in turn directly affects the water-tightness of the segment proper. As regards the study on water-tightness of reinforced concrete segments, results of research are reported on the joint. Actually, however, not much study has been made on the segment proper. This report discusses the evaluation method for water-tightness of reinforced concrete segments. The method uses the relationship between the crack width and seepage rate based on existing studies of reinforced concrete members and actual measurements of crack spacing and width determined using the single reinforced concrete segment-bending test.

Key words: Underground river, reinforced concrete segment, water-tightness, crack spacing, crack width

1. まえがき

わが国の大都市では、急速な都市化の進展に伴い増大する洪水の流出に対処するため河川改修を進めているが、近年、トンネル方式による地下河川の建設が積極的に進められている。これらの地下河川は、大口径・大深度であることと、都市部の軟弱な地盤中に建設する必要があることなどから、多くがシールドトンネル方式を採用している。

内水圧が作用するシールドトンネルの場合には、外荷重としての土圧や水圧を大きく見積もった方が、必ずしもセグメントの安全側の設計とはならないことから、これを踏まえた合理的な覆工構造の設計手法として「内水圧が作用する覆工構造設計の手引き」（以下、「手引き」と言う）がまとめられている。¹⁾²⁾これにより、近年の地下河川のシールドトンネルプロジェクトでは、一次覆工のみの構造形式で、外荷重に加えて内水圧にも耐える構造が採用されている。また、同手引きにおいて、覆工がRC構造の場合には、コンクリート標準示方書設計編に準拠し、ひび割れ幅を算出し、許容ひび割れ幅以下であることを確認することとなっている。その際、内水圧の作用により、覆工断面が純引張り状態となる場合は、貫通ひび割れが発生することとなり、セグメント本体の水密性について詳細な検討が必要となる。

本報告は、RCセグメントの水密性に着目して、単体曲げ試験に基づくひび割れ間隔とひび割れ幅の実測値や既往の研究に基づくひび割れ幅と漏水量との関係から、地下河川トンネルにRCセグメントを用いる場合の水密性に関する評価方法について考察したものである。

-
- | | | |
|--------|------------------------|--------------|
| 1) 正会員 | (財) 先端建設技術センター | 研究第二部部長 |
| 2) | 〃 | 研究第二部主任研究員 |
| 3) 正会員 | (株) 間組 (前(財)先端建設技術センター | 研究第二部主任研究員) |
| 4) 正会員 | 三井建設 (株) | 土木事業本部 土木技術部 |
| 5) 正会員 | パシフィックコンサルタンツ (株) | トンネル部 |

2. 内水圧が作用するRCセグメントの設計と課題

(1) 覆工内の応力状態

トンネル覆工の曲げモーメントは、一般に、トンネル天端(図中A点)が内側引張り、スプリング付近(図中B点)が外側引張り、また、その中間付近(図中C点)に曲げモーメントのゼロ点を有する(図-1参照)。内水圧が作用するトンネルはこれに軸引張力が加わり、覆工内部の応力状態は図-2のようになる。

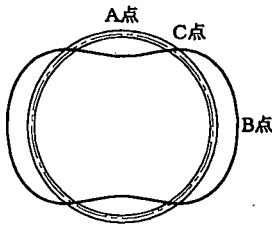


図-1 曲げモーメント図

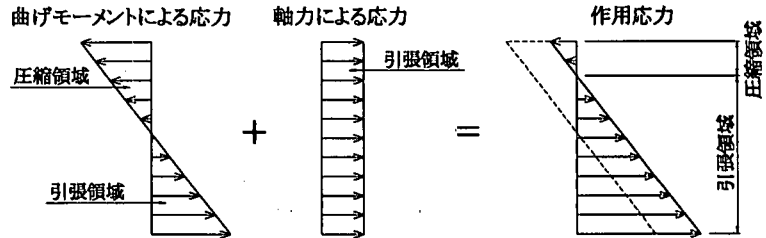


図-2 トンネル覆工の応力状態

ひび割れ幅は曲げモーメントが卓越するA点およびB点で最大となる。一般に、ここでの覆工内応力は軸引張力が作用しても圧縮領域が残る。一方、C点には曲げモーメントが作用しないため、全断面引張応力状態となり、貫通ひび割れが発生する恐れがある。

(2) ひび割れ幅の照査方法と課題

内水圧を受けるRCセグメントでは、最大ひび割れ幅が発生するA点、あるいはB点で鉄筋の腐食に対する耐久性の照査を行う。また、覆工内部の応力が全断面引張状態となるC点を中心とする範囲で水密性に対する照査を実施する必要がある。以下には、各照査における課題を示す。

1) 耐久性に対する許容ひび割れ幅とひび割れ幅の算定式

鉄筋の腐食による耐久性の低下から構造物を保護するためにひび割れ幅の制御が必要である。許容ひび割れ幅は、環境条件、かぶり、鋼材の種類に応じて表-1が用いられており、地下河川においては、通常、鋼材に対する環境条件として一般の環境(0.005c : cは鉄筋のかぶり)が用いられている。

表-1 耐久性に対する許容ひび割れ幅¹⁾

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋 普通丸鋼	0.005 c	0.004 c	0.0035 c
PC鋼材	0.004 c	—	—

また、ひび割れ幅の算定は「コンクリート標準示方書」による次式で算出される。

$$w = k_1 \{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \} \left[\sigma_{ss} / E_s + \epsilon_{cs} \right] \quad (1)$$

ここに、 k_1 : 鋼材の付着性状の影響を表す定数で、異形鉄筋の場合には1.0とする。

c : かぶり (cm)

c_s : 鋼材の中心間隔 (cm)

ϕ : 鋼材径 (cm)

σ_{so} : 鉄筋応力度

ϵ_{cs} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

ここでは、ひび割れ幅算定式を RC セグメントに適用する場合の課題として次のことが考えられる。

① ひび割れ幅の算定式の高強度コンクリートへの適用性

土木学会のひび割れ幅算定式は角田の式¹⁾が基本になっており、角田は目標強度 $\sigma_t = 30 \sim 35 \text{ N/mm}^2$ のコンクリート供試体の両引き試験および曲げ試験結果からひび割れ幅算定式を導いている。コンクリート強度が異なれば、コンクリートの引張強度および鉄筋との付着強度の違いによるひび割れ幅への影響が考えられる。

② ひび割れ間隔のスターラップによる影響

ひび割れ幅は主鉄筋間隔とかぶりで算出されるが、RC セグメントの場合、一般にスターラップ間隔は 100~200mm と密に配筋されており、またスターラップ位置でかぶりが小さくなっている。そのため、スターラップがクラックの主な発生原因(以下、クラックイニシエータと呼ぶ)になることが考えられる。

③ コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の影響

製造工程が管理された工場製品の場合、現場打ちコンクリートに比べて、乾燥収縮、クリープの影響が小さいことが考えられるため、ひび割れ幅算出におけるこれらの取扱いについて検討する必要がある。

2) 水密性に対する許容ひび割れ幅

部材の水密性を確保するためにひび割れ幅の制御が必要である。許容ひび割れ幅は、構造物の使用条件および作用荷重特性を考慮して定められ、表-2 が参考になる。なお、ひび割れ幅の算定式には式(1)が用いられる。

表-2 水密性に対する許容ひび割れ幅 (mm)²⁾

要求される水密性の程度		高い水密性を確保する場合	一般の水密性を確保する場合
卓越する 作用断面力	軸引張力	— ^{※1)}	0.1
	曲げモーメント ^{※1)}	0.1	0.2

※1) 作用断面力によるコンクリート応力は全断面において圧縮状態とし、最小圧縮応力度を 0.5 N/mm² 以上とする。また、詳細解析により検討を行う場合には、別途定めるものとする。

※2) 交番荷重を受ける場合には、軸引張力が卓越する場合に準じることとする。

ここで、地下河川トンネルにおいて表-2 を適用する場合には次の課題が考えられる。

① 地下河川において要求される水密性の程度

② 高強度コンクリートにおけるひび割れ幅と漏水量の関係

③ 水密性を確保するために必要な桁高に対する圧縮領域の程度

なお、本論文では、主にひび割れ幅算定式の適用性について検討した。

水密性に対する許容ひび割れ幅については、RC セグメントに相当する高強度のコンクリート供試体を用いたひび割れ幅と漏水量の実験結果を踏まえて評価することが望ましいと考えられるため、詳しくは今後報告することとし、ここでは、通常強度のコンクリート供試体による既往の研究結果から考察するに留めた。

3. 試験結果に基づくひび割れ間隔とひび割れ幅

ここでは RC セグメントの単体曲げ試験結果からひび割れ幅算定式(以下、土木学会式と呼ぶ)の適用性について検討した。単体曲げ試験を行ったセグメント仕様を表-3 に示す。ここでは、桁高 0.125~0.45m、主筋間隔 48~202mm、スターラップ間隔 72~234mm の合計 20 供試体について試験を行った。試験では、初期

表-3 検討で用いたセグメント仕様

	外径 (m)	幅 (m)	桁高 (m)	内側主筋 間隔(mm)	スターラップ 間隔(mm)
1	4.6	1.0	0.225	59.5~130	191~214
2	5.7	1.2	0.28	60~115	80~160
3	5.3	1.2	0.28	65~120	144~146
4	5.3	1.0	0.3	95~180	180
5	7.0	1.2	0.35	48~139	87~131
6	7.0	1.2	0.35	48~139	87~131
7	9.5	1.2	0.40	62~136	109~166
8	5.3	1.0	0.25	55~125	104~175
9	5.3	1.0	0.25	55~125	104~175
10	8.8	1.0	0.45	80~140	72~130
11	3.9	1.0	0.2	90~120	108~212
12	2.4	1.0	0.2	90~170	136
13	10.9×6.3	1.2	0.3	65~140	94
14	2.55	1.0	0.125	74~192	140~180
15	2.55	1.0	0.175	64~202	116~192
16	7.3	1.5	0.3	70~160	100~160
17	2.75	1.0	0.175	101~171	145~174
18	4.3	1.0	0.15	105~175	175~208
19	8.6	1.0	0.35	90~130	219~234
20	3.45	1.0	0.2	60~116	72~163

の段階から発生したひび割れについて、1 供試体につき 4～6 本を対象にして、各荷重段階ごとに、引張鉄筋の応力度と最大ひび割れ幅を計測した。

図-3 は最大ひび割れ間隔の実測値と土木学会式によるひび割れ間隔の計算値の比較である。土木学会式によるひび割れ間隔は、主鉄筋の間隔とかぶりで算出されるため、20cm 以上の値となっているが、実測値は、20cm 以下と計算値に比べて小さくなっている。

次に各供試体の最大スターラップ間隔と最大ひび割れ間隔の実測値との関係を図-4 に示す。これより、両者には高い相関があることが認められることから、RCセグメントにおいてはスターラップがクラックイニシエータになっているものと考えられる。

図-5 はひび割れ幅について土木学会式による計算値と実測値との比較である。ここで、計算値で用いた鉄筋応力度は単体曲げ試験で実測された応力度を用い、また、乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅への影響は無視した。これより、ひび割れ幅の実測値は計算値に比べて小さく、計算値は過大なひび割れ幅を算出する結果となっている。この原因の一つとして、前述したスターラップの影響により、実際にはひび割れ間隔が狭くなることから、ひび割れ幅が計算値よりも小さくなることが考えられた。そこで、土木学会式のひび割れ間隔の項($k_t(4C+0.7(C_s-\phi))$)に各供試体の

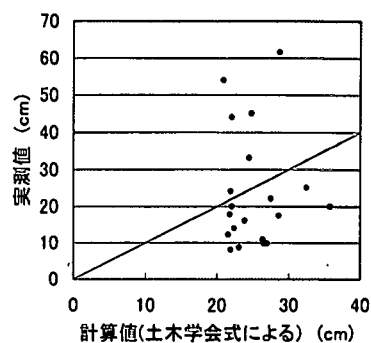


図-3 最大ひび割れ間隔の実測値と計算値

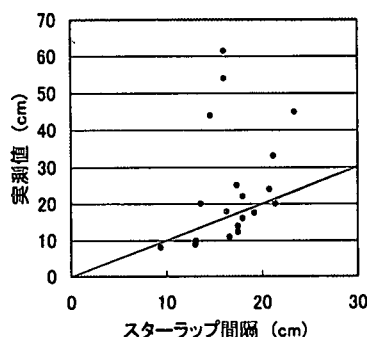


図-4 最大ひび割れ間隔の実測値とスターラップ間隔

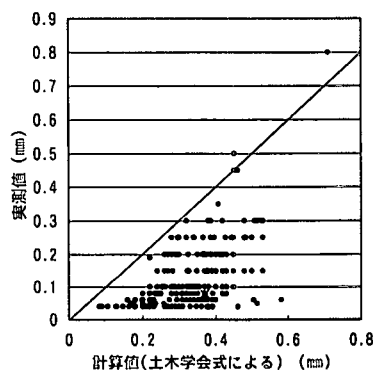


図-5 ひび割れ幅の実測値と計算値(その1)

最大スターラップ間隔を代入してひび割れ幅を算出し、実測値と比較した(ここでも乾燥収縮とクリープによる影響は無視した)。その結果を図-6 に示す。

図-6 は、図-5 に比べて、計算値と実測値との相関は高くなってきたが、逆に、ひび割れ幅の実測値が 0.2mm 以上の場合、計算値を超えるものもでてきた。

図-6 には鉄筋応力度が降伏値を超えるひび割れ

幅も含むため、実用的な応力度レベルである $200\text{N}/\text{mm}^2$ 以下のひび割れ幅を図-7に示す。

これより、スターラップ間隔を考慮しても、計算値は概ね実測値に比べて安全側の結果を示すことが確認された。

4. 既往の研究に基づくひび割れ幅と漏水量

表-4はコンクリート供試体で実施されたひび割れからの漏水に関する既往の研究結果である。ここで、文献番号①～⑤の研究結果は、表-2の水密性に対する許容ひび割れ幅をコンクリート標準示方書に組み込むときに反映されており、本検討では、それ以降の研究成果についても調査した。なお、文献番号⑤の研究のみ液化窒素の漏出を対象にしている。これらの研究成果より、以下のことが確認されている。

a)コンクリートのひび割れには漏水を起こす限界のひび割れ幅がある。

渡部の研究では $0.02\sim 0.1\text{mm}$ の範囲で、また寺山らの研究では 0.05mm で漏水は生じないことが報告されている。

b)コンクリートのひび割れには自癒効果（漏水量が時間の経過に伴って減少すること）が期待できる。

伊藤らの研究では 0.1mm 以下で、また寺山らの研究では 0.12mm 以下で漏水は経時的に減少することが、さらに壹岐の研究ではひび割れ幅 0.2mm で自癒効果の境があることが報告されている。

壹岐や伊藤らは自癒効果は目詰まりによるひび割れ幅の減少によるものと推測しており、その原因として、①水中懸濁物質②水中の溶存酸素・気泡③コンクリートと水との化学反応による固形物の析出④プランクトンなどの生物増殖などによる影響が考えられている。また、松岡らは 0.2mm 未満の範囲ではひび割れは不連続な状態であると報告しており、これは壹岐が自癒効果の境としているひび割れ幅に一致している。

以上の研究成果より、ひび割れ幅 0.1mm 以下では、目詰まり効果により漏水は経時的に減少すると考えてもよいと思われる。ただし、一部の研究を除き、供試体厚が 30cm 以下と比較的薄く、また作用水圧も $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 以下と限られた条件での成果が多い。漏水量は、部材厚、作用水圧、ひび割れ幅に影響される。また、ひび割れの性状はコンクリート強度に影響されと考えられることから、地下河川で対象とするセグメント厚や作用水圧およびコンクリート強度を考慮したモデル実験で、確認することが必要と考えている。

5. おわりに

ひび割れ幅と漏水量に関する既往の研究成果および RC セグメントの単体曲げ試験に基づくひび割れ幅算定式の適用性について検討した結果、以下の結論を得た。

①セグメントに発生するひび割れは、スターラップがクラックイニシエータになっており、スターラップ間隔でひび割れが発生する。その結果、土木学会式による計算値に比べてひび割れ間隔は小さくなる。

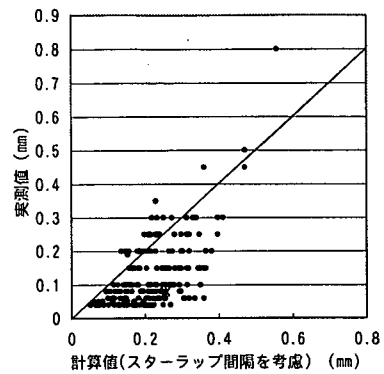


図-6 ひび割れ幅の実測値と計算値(その2)

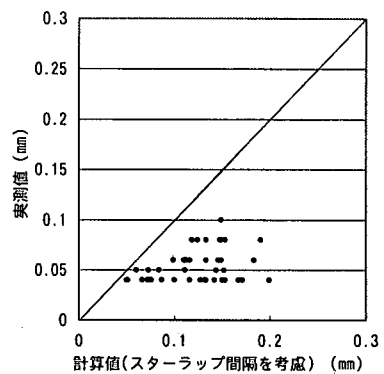


図-7 ひび割れ幅の実測値と計算値(その3)

表－４ ひび割れ幅と漏水量

番号	研究者	供試体の大きさ	作用水圧 (N/mm ²)	ひび割れ幅と漏水量
①	伊藤祐二 古賀重利 ¹⁾ 青泉平昌 笹谷照勝	厚さ 5, 14, 29cm 直径 15cm の円柱	0.03～0.9	水圧 0.6～0.9N/mm ² で、ひび割れ幅を 0.3 から 0.1mm に制御することにより漏水量は 1/7 に低減。ひび割れ幅 0.1mm, 0.2mm の場合、材令 28 日まで水中発生すると漏水量は材令 3 日の 25～60% 程度に低下。
②	渡部 ¹⁾	厚さ 15cm の コンクリート板	0.0005～0.02	ひび割れには透水を生じない限界ひび割れ幅がある。これは既往の研究を参考にすると 0.02～0.1mm の範囲にある。
③	寺山 徹 大塚敬三 ¹⁾ 大友 健	厚さ 40cm の コンクリート板	0.1～0.4	最小ひび割れ 0.3mm (平均 0.6mm) で激しい漏水が継続したのに対し、0.12mm 以下で漏水は徐々に小さくなる。平均ひび割れ幅 0.05mm、最小ひび割れ幅 0.03mm で漏水は認められない。
④	伊藤 洋 坂口雄彦 ¹⁾ 西山勝榮 清水昭男	厚さ 15～17cm 直径 10cm の円柱	0.05～0.08	ひび割れ幅 0.1mm 以下では目詰まり効果により漏水量は経時的に大きく減少する。0.3mm 以上では時間依存は小さい。
⑤	岡村 甫 前川宏一 ¹⁾ 北村八郎 芳賀孝成 黒坂敏正	厚さ 35cm, 60cm のコンクリート板	0.1～0.15	ひび割れ幅が 0.1mm 以下であればひび割れが貫通していても液体の漏出はない。接液側のひび割れ幅 0.2mm 以下で、流出側のひび割れ幅が 0mm であれば漏出はない。
⑥	狩野裕之 金好昭彦 ¹⁾ 進士喜英 藤原 愛	横 20cm×縦 65cm ×厚さ 20～100cm	0.05	ひび割れ幅が 0.1mm 程度以下であっても漏水が見られる。
⑦	豊岐直之 ¹¹⁾	横 200cm×縦 120cm ×厚さ 40cm	0.15, 0.3	ひび割れの透水係数は既往の研究(厚さ 30cm 以下)にくらべて小さい。またひび割れ幅 0.2mm を境にして自癒効果は大きく異なる。
⑧	松岡 茂 福原輝幸 ¹¹⁾ 柳 博文	横 80cm×縦 80cm ×厚さ 100cm	0.1～0.7	ひび割れ幅 0.2mm 未満ではひび割れの約 50% が不連続。ひび割れ幅 0.2mm 以上でひび割れは連続する。

②土木学会式によるひび割れ幅算定式は、実際のひび割れ幅に比べて安全側の値(大きく算出される)となるので、高強度コンクリートを用いたセグメントにおいても適用できる。この時、乾燥収縮およびクラックによる影響は無視できる。

③ひび割れ幅には漏水を生じない限界のひび割れ幅がある。また、ひび割れ幅 0.1mm の場合、目詰まり効果によって漏水は経時的に減少する。

本報告は、内水圧を受ける地下河川トンネルを対象にした、RC セグメントにおける水密性の評価方法に関する研究の中で、特にひび割れ幅の算定に必要な基礎データを整理し、報告したものである。なお、当報告の中でも触れたが、RC セグメントを対象とした漏水量実験については、今後報告する予定である。最後に、本研究においてご指導・ご助言を賜りました北海道大学大学院工学研究科角田教授、早稲田大学理工学部小泉教授ならびに単体曲げ試験のひび割れデータを提供して下さいた日本 RC セグメント工業会には多大なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き, (財) 先端建設技術センター, 平成 11 年 3 月
- 2) 中村敏一 他, 内水圧が作用するシールドトンネル覆工構造の考え方, トンネルと地下, 平成 12 年 3 月
- 3) 平成 8 年制定 コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会
- 4) 角田与史雄, 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, vol8, No.9, sept, 1970
- 5) 伊藤祐二 他, 高水圧下におけるコンクリートひび割れからの漏水に関する実験的研究, フジタ技術研究所報, 第 27 号, 1991 年
- 6) 渡部, 発電所廃棄物陸地貯蔵・処分用コンクリートピットの水密性に関する研究－ひび割れ部および継目部の透水性評価－
- 7) 寺山徹 他, プレストレストによるひび割れ幅の低減効果, 土木学会第 43 回年次学術講演会
- 8) 伊藤洋 他, コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究, セグメント技報, 昭和 62 年
- 9) 岡村甫 他, 低温液化ガス用コンクリート部材の貯液性能に関する研究－その 1, 土木学会第 45 回年次学術講演会
- 10) 狩野裕之 他, コンクリートひび割れ内の透水性に関する一考察, 土木学会第 55 回年次学術講演会
- 11) 豊岐直之, 沈埋トンネル側壁のひび割れからの漏水と自癒効果の確認実験, 土木技術年報, 第 5 巻 (1996)
- 12) 松岡茂 他, コンクリートひび割れからの漏水メカニズムと漏水量予測, 土木学会論文集 No.523, 1995.9