

未貫通なひび割れを有する覆工コンクリートの 初期劣化進展とその考察

Evaluation of deterioration in early stage of tunnel lining concrete with crack

木村 定雄¹⁾, 三村 聡²⁾, 吉田 行生³⁾, 水上 優⁴⁾

Sadao KIMURA, Satoshi MIMURA, Yukio YOSHIDA, Masaru MIZUKAMI

The accelerated deterioration experiment of the specimen which modeled RC lining and SFRC lining with the bending crack was carried out. The corrosion of the reinforcement in ages 30th of the RC lining was measured, and the bending test for confirming performance of structure was carried out.

As the result, It was confirmed that invasion of chloride ions and progress of the carbonation to the crack inside were early by the existence of the crack over 0.1mm at the width. The corrosion of the reinforcement started by the infiltration of chloride ions in the crack inside. In the meantime, the dynamic performance of the reinforcement did not lower, even if the reinforcement corroded, if the age is 30th.

Key Words: tunnel lining, deterioration, durability, structural integrity, RC, SFRC

1. はじめに

地中に構築されるトンネル構造物は、その用途に応じた機能を長年に亘って維持する必要がある。また、トンネルの用途は道路、鉄道、上下水道、電力および通信などと様々であり、その用途ごとにトンネル内の環境が異なる。したがって、機能を維持するために覆工に要求する耐久性能はトンネルの用途に応じて異なるのが実状である。これまで、覆工の構造材料として用いられてきたコンクリートの耐久性能の評価は一般の構造物に適用されるそれと同様にとり扱われ考えられてきた。しかしながら、前述した実状から覆工コンクリートの耐久性能はトンネルの用途に応じて評価すべきものであると考える。さらに、既設のトンネル覆工にはひび割れなどの欠陥が存在している場合が少なくない。したがって、覆工コンクリートの耐久性能の評価にあたっては、その影響も十分に考慮する必要がある。

そこで、筆者らは曲げひび割れなどの主断面に未貫通なひび割れを有する覆工の長期的な耐久性能の変化とそれに伴う材料特性・構造性能の変化との関係を促進劣化実験などにより明らかにすることを試みた。本論文は促進劣化実験の結果に基づき、覆工模型の初期の劣化進展と材料特性・構造性能の評価方法について検討したものである。なお、ここで対象とする覆工構造は鉄筋コンクリート(RC)および鋼繊維補強コンクリート(SFRC)である。

2. 耐久性能と構造性能の評価手法の考え方

(1) トンネル用途に応じた主劣化要因の抽出

覆工の性能を低下させる要因はトンネルの外側の地盤環境からの影響要因とその用途に応じて定まる内側

-
- 1) 正会員 博(工) 金沢工業大学 環境系土木工学科(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)
 - 2) 正会員 修(工) 金沢工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (現,ハザマ)
 - 3) 正会員 金沢工業大学 環境系土木工学科 (現,名工建設)
 - 4) 正会員 金沢工業大学 環境系土木工学科 (現,日特建設)

の使用環境からの影響要因とに分けて考えることができる。本研究ではこれらのうち、とくに後者の影響要因に着目して主劣化要因を抽出することとした。表1はこのことを念頭において抽出した劣化要因の例である。覆工の主劣化要因は種々に考えられる。ここでは、乾湿繰返し作用および塩化物イオンの浸入を主劣化要因として定め、これらを対象に耐久性能および材料特性・構造性能を評価することとした。

(2) 耐久性能の評価手法

耐久性能の評価指標を表2に示す。乾湿繰返し作用の評価指標は中性化深さと鋼材(鉄筋または鋼繊維)の腐食、また塩化物イオンの浸入の評価指標は塩化物イオンの浸入深さと鋼材の腐食とした。中性化深さの測定はフェノールフタレイン法²⁾によった。塩化物イオンの浸入深さの測定は硝酸銀噴霧法²⁾によった。RC供試体における鉄筋腐食はマクロセル腐食電流の測定³⁾からその腐食速度と量を求めて評価⁴⁾した。鉄筋の腐食形態はマクロセル腐食形態とミクロセル腐食形態とに分けて考えられている。ここでは、劣化進展の初期段階における鉄筋の腐食形態はマクロセル形態が卓越すると考えた。一方、SFRC供試体の場合には腐食電流の測定が適用できない。したがって、鋼繊維の腐食を目視によって判断した。なお、本文中で示す劣化初期段階とは材齢30日であり、初期養生を行った後に後述の表6に示す養生条件で乾湿繰返し作用の場合は1.5cycle、また、塩化物イオンの浸入の場合は3cycleの養生を施した段階を意味する。

(3) 材料特性・構造性能の評価手法

材料特性・構造性能の評価指標を表3に示す。RC供試体の材料特性は圧縮強度および静弾性係数を評価指標とした。また、構造性能を代表する曲げ性能は曲げ耐力を主な評価指標とした。SFRC供試体の材料特性はRC供試体の場合と同じとし、曲げ性能は曲げ耐力、曲げタフネスおよび曲げ引張強度を評価指標とした。

3. 促進劣化実験の方法

(1) 配合条件の選定と供試体の作製

従来からトンネル覆工の構築に用いられてきた現場打ちコンクリートの配合を調査した。図1は水セメント比に主に着目した調査結果の例である。これらの結果から、RC供試体およびSFRC供試体の水セメント比をその代表値として55%と設定した。また、RC供試体の引張鉄筋比は実績によると大きな値ではあるが0.98%

表1 山岳トンネル覆工の構造とトンネル内環境から定まる劣化要因の例

用途	乾湿繰返し	二酸化炭素	塩化物イオン	酸の侵食	硫酸塩	電蝕	表面摩耗	火災
道路	○	◎	○※1					◎
鉄道	○	◎				○		○
導水路	海水路	○	◎		○		○	
	淡水路	○		○			○	

◎:主に想定される劣化要因, ○:想定される劣化要因, ※1:寒冷地域で用いられる融雪剤などによる影響

表2 耐久性能の評価指標

主劣化要因	評価指標	試験方法	備考(反条件)
乾湿繰返し作用	中性化深さ	フェノールフタレイン法	ptRs.2~10
	鋼材の腐食	腐食電流測定	腐食電流密度より推定
	コンクリートの膨張	圧縮試験	
塩化物イオンの浸入	塩化物イオンの浸入深さ	硝酸銀噴霧法	セメント質量×0.15%
	鋼材の腐食	腐食電流測定	腐食電流密度より推定
	コンクリートの膨張	圧縮試験	

表3 材料特性・構造性能の評価指標

主劣化要因	材料特性	構造性能	評価指標	試験方法
乾湿繰返し作用 塩化物イオンの浸入	RC SFRC	RC	圧縮強度	圧縮試験
		SFRC	静弾性係数	圧縮試験
曲げ性能	RC SFRC	RC	曲げ耐力	曲げ試験
		SFRC	曲げ耐力 曲げタフネス 曲げ引張強度	曲げ試験

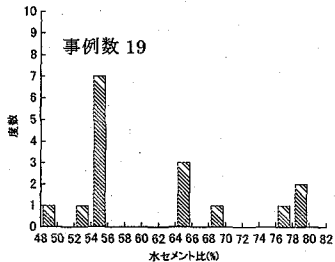
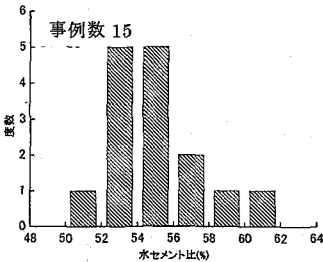
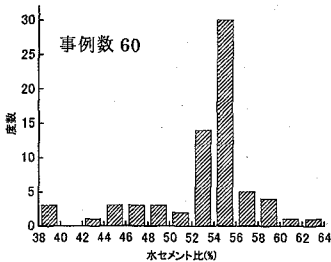


図1 水セメント比の実績調査結果

と設定した。一方、SFRC 供試体の鋼繊維混入率は RC 供試体の引張鉄筋比から鉄筋の体積比で等価となるように換算して 0.64%とした。

本実験では鉄筋腐食とそれに伴う曲げ性能の変化の基本的性状を把握するため、鉄筋腐食の評価を複雑にする要因をできる限り排除することを考えた。すなわち、①一般に用いられている異形鉄筋はブリーディング水が鉄筋下面に溜まりやすい、②粗骨材を用いることによって水や酸素、塩化物イオン等の浸入経路が複雑になるなどの理由から、覆工コンクリートはモルタルにモデル化し、RC 供試体の鉄筋は丸鋼とした。表 4 および表 5 はこれらのことを考慮して選定した使用材料およびモルタル配合を示したものである。なお、モルタル配合の選定にあたっては、所要のワーカビリティが得られる範囲でできるだけブリーディング水が少ない砂セメント比とした。

図 2 に曲げ試験用供試体および鉄筋腐食の経時変化を把握するためのマクロセル電流測定用供試体の諸元を示す。マクロセル電流測定用供試体には、図 3 に示す分割鉄筋とともにひび割れ導入時の曲げ載荷で供試体が破断しないようにエポキシ系樹脂で被膜した補強鉄筋もあわせて埋設した。モルタルの圧縮試験用供試体は $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ とした。

(2) 初期養生と欠陥をモデル化したひび割れの導入

図 4 は初期養生の条件を示したものである。材齢 5 日目に変位制御により曲げひび割れを導入して、初期欠陥をモデル化した。導入したひび割れはその表面の開口幅の大きさにより 0.2W シリーズ、0.4W シリーズおよび 2.0W シリーズに大別した。また、曲げひび割れを導入しない 0W シリーズも設けた。図 5 は曲げひび割れ導入時の表面開口幅と供試体の側面で測定したひび割れ深さの関係を示したものである。すべての供試体において、ひび割れは未貫通であることがわかる。なお、RC 供試体において曲げひび割れ導入時に鉄筋ひずみを測定したところ、その最大値は $200 \sim 600 \mu$ であり、ひび割れ導入によって鉄筋が降伏していないことを確認している。

(3) 促進劣化実験の種類と養生条件

表 6 は促進劣化実験の養生条件を示したものである。なお、乾燥状態におかれるトンネル内の環境も想定して気中養生の条件も考慮した。

4. 初期の劣化進展状況とその評価

(1) 乾湿繰返し作用による中性化と鋼材の腐食

a) RC 供試体：乾湿繰返し作用および乾燥状態の中性化深さ

表 4 使用材料の諸元

種類	種名	主な性質	
		密度	単位重
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16 g/cm^3	
粗骨材	六日町産陸砂	密度	2.61 g/cm^3
		F.M	2.92
		吸水率	2.4%
		降伏点	340 N/mm^2
鉄筋	丸鋼 (SR235)	引張強さ	460 N/mm^2
		弾性係数	$2.10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
鋼繊維	両端フック付結束型	寸法	$43 \text{ mm} \times \phi 0.75 \text{ mm}$
		製造方法	鋼線切断法

表 5 モルタル配合とフレッシュ性状

覆工種類	W/C (%)	S/C	SF混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)			フロー値 (mm)	SF混入後フロー値 (mm)	空気量 (%)
				W	C	S			
RC覆工	55	3.0	—	275	499	1500	169±5	—	2.2±0.3
SFRC覆工	55	3.0	0.64	275	499	1500	176±6	163±10	2.0±1.0

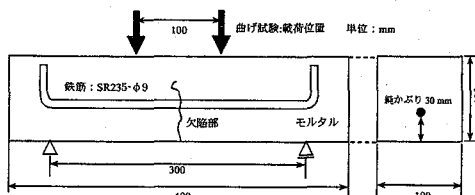


図 2 曲げ試験用供試体の諸元

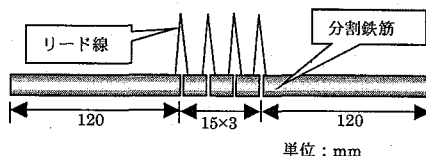


図 3 分割鉄筋の諸元

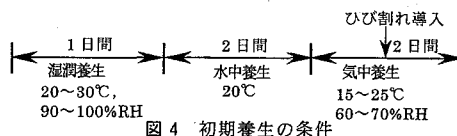


図 4 初期養生の条件

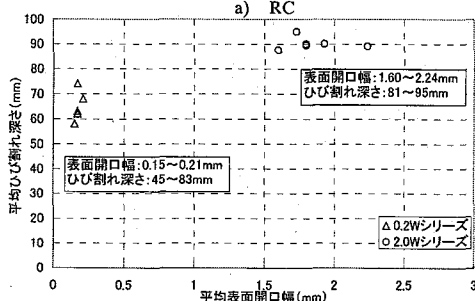
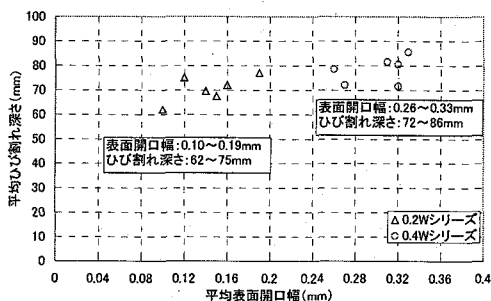


図 5 ひび割れ導入時の表面開口幅とひび割れ深さ

の測定結果を示したのが図 6 である。中性化深さは表面開口幅の大きさにほとんど関係なく、乾湿繰返し作用のケースでは 5~8mm、また乾燥状態のケースでは 8~12mm であった。また、ひび割れ導入時のひび割れ深さは 0.2W シリーズ(表面開口幅が 0.1~0.19mm)で 62~75mm、0.4W シリーズ(表面開口幅が 0.26~0.33mm)で 72~86mm であったことから中性化深さはひび割れ深さまでは達していない。一般に CO₂ はある程度乾燥している方が浸入しやすく、乾湿繰返し作用を受けた場合に比べて乾燥状態(60%RH)の方が中性化の進行は早いと考えられる⁵⁾。このことから、幅が 0.1~0.4mm のひび割れ内への CO₂ の浸入においても、湿潤と乾燥とを繰り返す状態に比べて、乾燥状態の方が中性化の進行が早くなったものと考えられる。なお、ひび割れの無い箇所における中性化は認められなかった。ここで、現在提案されている中性化速度予測式のうち、図 7 に示す高田・魚本式⁶⁾を用いて、乾燥状態におけるひび割れの無い箇所の中性化深さが 10mm となる期間を算定すると 4 年となる。したがって、ひび割れを有する場合には相当に早く中性化が進行することがわかる。また、本実験では供試体をモルタルで作製している。一般にコンクリートに比べてモルタルは細孔構造が緻密であることから中性化の進行は遅いと考えられている。このことをあわせ考えると、実際のトンネル覆工のひび割れ部ではさらに中性化が早期に進行すると推察される。図 8 に鉄筋のマクロセル腐食速度の経時変化を示す。この結果からマクロセル腐食は認められなかった。したがって、初期の段階では中性化深さがかぶり位置まで達していないことなどから不動態皮膜は消失しておらず鉄筋の腐食は生じていないと判断できる。

b) SFRC 供試体：図 9 は表面開口幅と中性化深さの関係を示したものである。ひび割れの無い箇所では中性化は認められなかった。表面開口幅が 0.2mm 程度では約 10mm、また表面開口幅が約 2.0mm では 20~35mm の中性化深さであった。このことから表面開口幅が約 2.0mm と過大になると、ひび割れ内への中性化は相当に早く

表 6 促進劣化実験の養生条件

劣化要因	養生条件 (1 cycle)			
	乾燥状態	日数	湿潤状態	日数
乾湿繰返し作用	温度 20℃, 湿度 60% RH	4 日	温度 30℃, 湿度 95% RH	10 日
塩化物イオンの浸入 + 乾湿繰返し作用	温度 20℃, 湿度 60% RH	5 日	水温 30℃, 塩分濃度 3%	2 日
乾燥状態	温度 20℃, 湿度 60% RH	—	—	—

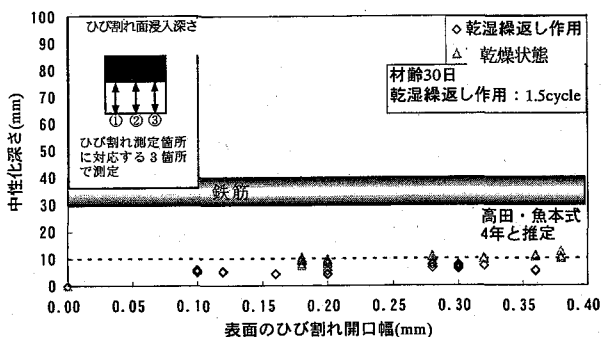


図 6 表面開口幅と中性化深さの関係

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \times e^{(8.748 - 2563/T)t} \times (2.94WC - 101.2) \times 10^{-2} \times \sqrt{Ct}$$

t: 経過時間 (週)
 WC: 水セメント比 (%)
 C: CO₂ 濃度 (%)
 X: 中性化深さ (mm)
 T: 絶対温度 (K)

図 7 中性化速度予測式

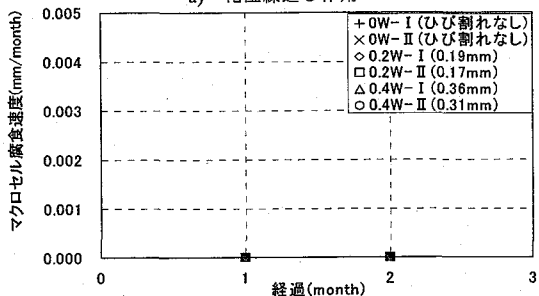
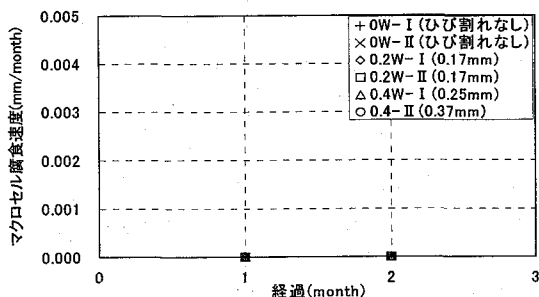


図 8 初期段階のマクロセル腐食速度

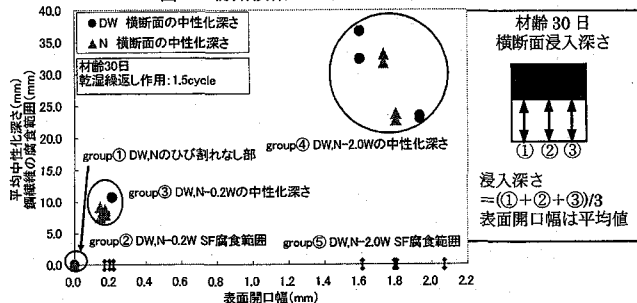


図 9 表面開口幅と中性化深さの関係

なることがわかる。なお、ひび割れ導入時のひび割れ深さは 0.2W シリーズ(表面開口幅が 0.15~0.21mm)で 45~83mm, 2.0W シリーズ(表面開口幅が 1.6~2.2mm)で 81~95mm であった。一方、材齢が 30 日と短期間であることから不動態皮膜は消失しておらず、モルタルが中性化した位置にある鋼繊維は腐食していなかった。

(2)塩化物イオンの浸入と鋼材の腐食

a) RC 供試体：塩化物イオンの浸入+乾湿繰返し作用の養生条件の RC 供試体の表面開口幅と Cl⁻ 浸入深さの関係を示したのが図 10 である。ひび割れの無い表面部では 5~10mm の Cl⁻ の浸入が認められた。また、0.2W シリーズおよび 0.4W シリーズでは鉄筋かぶりを超えて 50~80mm の Cl⁻ の浸入が認められた。このことから、表面開口幅が大きくなるにしたがって Cl⁻ の浸入深さも大きくなるがわかる。なお、初期に導入したひび割れの深さは 0.2W シリーズで 62~75mm, また 0.4W シリーズで 72~86mm であることから、ひび割れ深さより深く Cl⁻ が浸入していることがわかる。図 11 は 0.2W シリーズおよび 0.4W シリーズのひび割れ面から鉄筋軸方向への Cl⁻ 浸入深さを示したものである。その深さは表面部のひび割れの無い箇所の浸入深さと同程度の約 10mm である。一方、図 12 は鉄筋のマクロセル腐食速度の経時変化を示したものである。腐食速度は 0.2W シリーズでは 0.001 mm/month, 0.4W シリーズでは 0.003mm/month であった。したがって、表面開口幅が大きくなるほど鉄筋の腐食速度が大きくなるがわかる。これは不動態皮膜が消失して、ひび割れ幅が大きくなるほど酸素や水の供給が容易であるためと考えられる。写真 1 に示したのは曲げ試験後に取り出した鉄筋の腐食状況の一例である。a)は平均表面開口幅が 0.13mm の例であり、b)はそれが 0.26mm の例である。a)は鉄筋下面が若干発錆しているのに対し、b)は鉄筋上面まで発錆しており鉄筋下面には若干の孔食も見られた。ここで、図 12 において鉄筋の腐食速度が平均的に 0.002 mm/month と仮定すると 1 年間で鉄筋半径の減少量は 0.024mm と計算される。また、鉄筋の腐食速度は時間の経過とともに増大すると考えられることから、将来的にはここで計算された値以上に鉄筋が腐食することが予測される。

b) SFRC 供試体：表面開口幅と Cl⁻ 浸入深さの関係を図 13 に示す。ひび割れの無い表面部では RC 供試体の場合と同程度である 10~13mm の Cl⁻ の浸入が認められた。また、表面開口幅が大きくなるほど、Cl⁻ の浸入深さが大きくなるが確認された。2.0W シリーズではひ

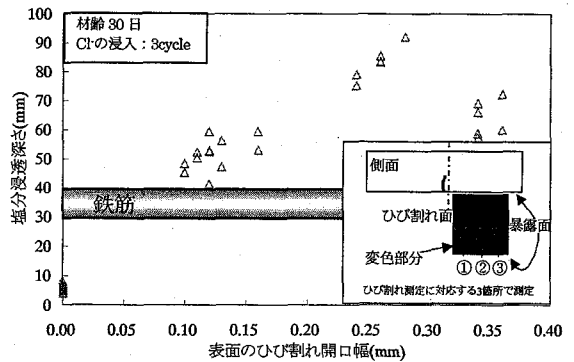


図 10 表面開口幅と Cl⁻ 浸入深さの関係

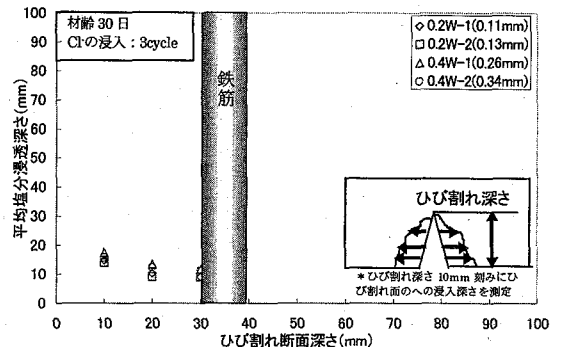


図 11 縦断面の Cl⁻ 浸入深さ

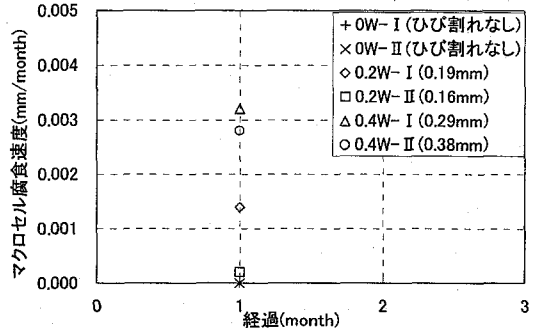


図 12 Cl⁻ の浸入によるマクロセル腐食速度

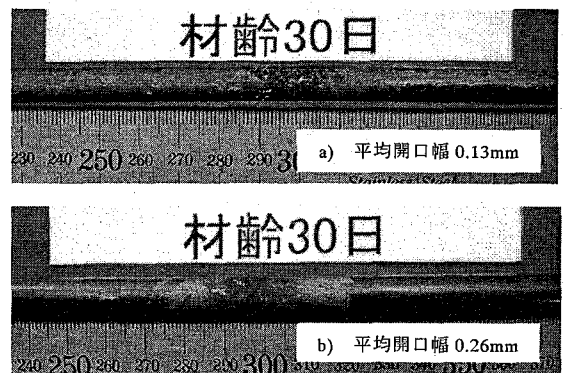


写真 1 鉄筋の腐食状況

び割れ深さ以上に CI の浸入が認められた。また、2.0W シリーズでは鉄筋軸方向のモルタル中への CI の浸透量は 20mm 程度であった。一方、0.2W シリーズでは鋼繊維の腐食が認められなかったのに対して、2.0W シリーズでは表面から約 45mm の範囲で鋼繊維の腐食が確認された。

5. 初期の材料特性・構造性能

a) RC 供試体：材齢 30 日における RC 供試体の圧縮強度、静弾性係数および曲げ耐力を表 7 に示す。これらのデータは乾湿繰返し作用、塩化物イオンの浸入および乾燥状態の養生条件下の結果（養生条件ごとに 2 供試体ずつ）である。データ数は少ないものの圧縮強度および静弾性係数の変動係数は、それぞれ 12.49% および 2.90% であり、材齢 30 日のもとでは養生条件の相違の影響をほとんど受けていない。図 14 は曲げ試験における荷重と中央点鉛直変位量の関係および荷重と鉄筋応力の関係の一例を示したものである。鉄筋が降伏点 (f_{sy}) に達しても荷重が増加し続け、鉄筋応力が引張強さ (f_{su}) に達した段階で最大荷重状態となっている。この状況はすべての供試体で同じであった。図 15 は曲げ耐力の試験結果の密度分布を表したものである。これらの図を見ると、養生条件の相違にかかわらず、また表面開口幅の大きさにかかわらず、ほぼ均一にデータが分布している。したがって、初期の曲げ耐力の評価にあたっては、養生条件の相違やひび割れ導入の影響はほとんどないものと判断できる。そこで、鉄筋応力が引張強さに達した段階で曲げ抵抗力が最大になったことを考慮してモルタルの圧縮強度の試験値と鉄筋の引張強さを用いて曲げ耐力を計算した。その平均値は $1.75 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であり、図 15b) 中の一点鎖線で示したものである。曲げ耐力の試験値の平均値は $1.67 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であったことから、概ね計算によって曲げ耐力の推定が可能である。なお、モルタルの圧縮強度のばらつきを考慮して、その最大値と最小値の範囲における曲げ耐力の計算値は $1.72 \sim 1.76 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であり、圧縮強度のばらつきが曲げ耐力の計算値に及ぼす影響は小さい。また、鉄筋かぶりの変動（有効高さの変動）に対する影響についても検討した。曲げ試験を終えた供試体のかぶりを測定したところ、設計純かぶり 30 mm に対して実際のかぶりは $29.5 \sim 34.7 \text{ mm}$ であっ

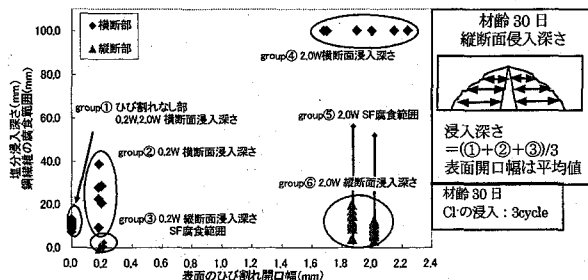


図 13 表面開口幅と CI 浸入深さの関係

表 7 RC 供試体の強度試験結果

	圧縮強度 [N/mm ²]	静弾性係数 [N/mm ²]	曲げ耐力 [kN・m]
データ数	6	6	18
平均値	42.37	2.05×10^4	1.67
最大値	48.25	2.12×10^4	1.83
最小値	33.74	1.97×10^4	1.52
偏差 ^{*)1}	5.29	0.059×10^4	0.08
変動係数 ^{*)2} (%)	12.49	2.90	4.68

*)1) 不偏分散の平方根を偏差とする

*)2) 変動係数 = (偏差/平均値) × 100 (%)

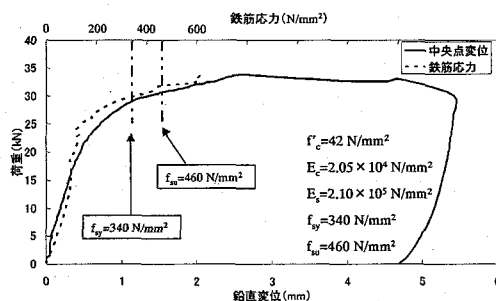
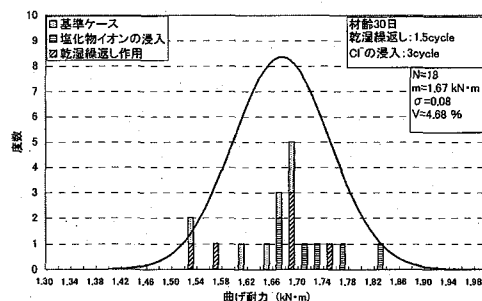
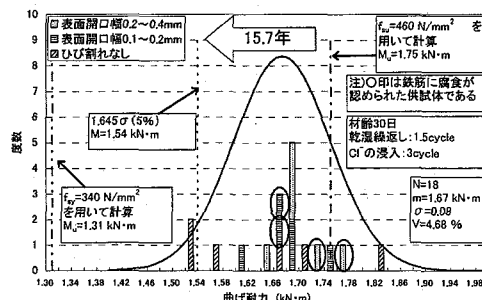


図 14 曲げ荷重と中央点鉛直変位・鉄筋応力の関係の例



a) 養生条件別に表示



b) 表面開口幅別に表示

図 15 曲げ耐力の密度分布

表 8 SFRC 供試体の強度試験結果

	圧縮強度	静弾性係数	曲げ耐力		曲げタフネス		曲げ引張強度	
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
データ数	7	7	group (0W,0.2W) 8	group (2.0W) 4	group (0W,0.2W) 8	group (2.0W) 4	group (0W,0.2W) 8	group (2.0W) 4
平均値	38.85	1.99×10 ⁴	5.76	4.11	4.68	3.15	1.99	1.31
最大値	42.66	2.06×10 ⁴	8.15	4.89	6.39	3.37	2.71	1.38
最小値	35.60	1.93×10 ⁴	3.84	3.56	3.06	2.70	1.35	1.10
偏差 ^{*1)}	2.74	0.047×10 ⁴	1.39	0.56	1.14	0.32	0.49	0.17
変動係数 ^{*2)} (%)	7.06	2.34	24.16	13.63	24.35	10.06	24.77	13.15

*1) 不偏分散の平方根を偏差とする

*2) 変動係数=(偏差/平均値)×100 (%)

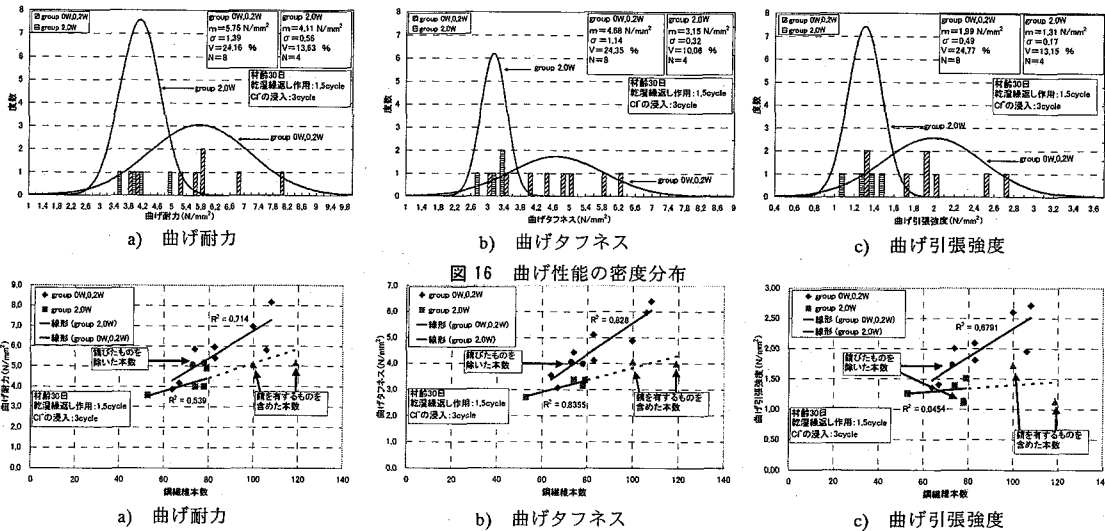


図 16 曲げ性能の密度分布

た。このことを考慮した曲げ耐力の計算値の変動幅は 1.68~1.83 kN・m である。ここで、塩化物イオンが浸入するとともに乾湿繰返しを受ける環境下において、鉄筋の腐食に伴う将来の曲げ耐力の低下を推定してみる。前述した鉄筋の腐食速度 (0.002mm/month) が一定と仮定して、曲げ耐力の計算値が試験結果の密度関数の 5%を下回るのに要する期間を計算すると、15.7 年と計算された。初期段階の鉄筋腐食は進展期の初頭であり、今後マイクロセル形態による腐食も加わると、さらに早く鉄筋腐食が進行し、曲げ耐力が低下する可能性があるものと考えられる。

b) SFRC 供試体：材齢 30 日における SFRC 供試体の強度試験結果を表 8 に示す。データ数は少ないものの圧縮強度および静弾性係数はともに変動係数が小さい。一方、曲げ耐力、曲げタフネスおよび曲げ引張強度⁷⁾の結果は変動係数が大きくなる傾向がある。ここで、2.0W シリーズはひび割れ導入時に 2.0mm 程度のひび割れを導入している。一般に、本実験で用いた形状寸法の SFRC 部材の曲げ試験では、表面開口幅が 2mm に到達する前に最大荷重状態となる⁸⁾。そこで、曲げ性能の評価を行うにあたっては、0W シリーズと 0.2W シリーズを一つのグループ (group(0W,0.2W)) とし、2.0W シリーズはそれとは別のグループ (group(2.0W)) として分けて検討することとした。

図 16 はグループ別の曲げ性能の密度分布を示したものである。曲げ耐力、曲げタフネスおよび曲げ引張強度のすべての指標において group(0W,0.2W) の変動係数は約 24% となった。この値は RC 供試体の場合に比べると大きな値であり、SFRC の特徴を表していると考えられる。すなわち、SFRC 部材の曲げ性能は部材に混入する鋼繊維の配向や分散の変動の影響を大きく受け、曲げ载荷の状態下では純曲げ区間中で主断面を跨ぐ鋼繊維本数が少ない箇所で破断する。そこで、曲げ試験時に破断した断面を跨ぐ鋼繊維本数を考慮して曲げ性能を整理した。図 17 は曲げ破断面を跨ぐ鋼繊維本数と曲げ性能の関係を示したものである。group(0W,0.2W) と group(2.0W) との両者はともに鋼繊維本数が増加するにしたがって、曲げ耐力、曲げタフネスおよび曲げ引

張強度が増加する傾向がみられる。また、これらの結果をみても、group(0W,0.2W)とgroup(2.0W)とは分けてとり扱う必要があることがわかる。また、塩化物イオンの浸入と乾湿繰返し作用を施した2.0Wシリーズでは鋼繊維に腐食が確認されたが、初期段階では発錆の程度は小さく、腐食した鋼繊維も曲げに対する抵抗に効果があるものと考えられる。

6. まとめ

本論文では促進劣化実験の結果に基づき、曲げひび割れを有するRC供試体とSFRC供試体の初期(材齢30日)の鋼材腐食と材料特性・構造性能の評価方法について検討した。得られた主な知見を以下に示す。

(1) 耐久性能の評価について

RC構造の場合、その幅が0.1~0.2mm程度のひび割れであっても欠陥が存在することで、中性化に対する抵抗性能は相当に低下する。また、ひび割れ内部への中性化の進行は乾湿繰返し作用を受ける環境下に比べて乾燥状態下の方が早い。SFRC構造の場合においても中性化に対する抵抗性能はRC構造の場合とほぼ同じであり、ひび割れ幅が2.0mm程度と過大になると、さらに中性化は表面から奥深くまで進行する。ただし、RC構造およびSFRC構造の両者ともに劣化が進行する材齢が30日と短ければ鋼材の不動態皮膜は消失せず、鋼材の腐食までには至らない。一方、塩化物イオンが浸入するとともに乾湿繰返し作用を受ける環境下では、その幅が0.1mm以上のひび割れが存在することで、塩化物イオンが早く浸入し、さらに鉄筋の不動態皮膜も相当に早く消失する。したがって、その幅が0.1mm以上のひび割れが存在する状況下で、塩化物イオンの浸入が予測される場合には、鉄筋腐食の潜伏期は存在しないとして覆工の耐久性能を評価すべきである。

(2) 材料特性・構造性能の評価について

モルタルの圧縮強度および静弾性係数は、乾湿繰返し作用、塩化物イオンの侵入および乾燥作用の環境条件の影響をほとんど受けないと考えられる。また、塩化物イオンの侵入などにより鋼材の腐食が開始したとしても材齢が30日と短ければ、鋼材腐食が曲げ性能に及ぼす影響は小さい。

今回報告した促進劣化実験を現在でも継続して実施している。今後、各種の環境条件下における鉄筋の腐食の進行を明らかにし、RC構造やSFRC構造の構造性能の低下がどのように生じるかを把握する予定である。

謝辞：本実験を実施するにあたり、石川島建材工業(株) 大関宗孝氏、橋本博英氏には実験用資材を提供して頂いた。また、ブリジストン(株) 深津章文氏には鋼繊維を提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)和泉意登志・喜多達夫・前田照信：コンクリート構造物の耐久性シリーズ中性化，pp5，1986。
- 2)Nobuaki Otsuki, Shigeyosi Nagataki, and Kenji Nakashita：Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials，ACI Materials Journal，pp587-593，1992。
- 3)宮里心一・大即信明・小長井彰裕：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討，コンクリート工学論文集 No.2，pp547-552，2001。
- 4)土木学会：コンクリートライブラリー109 コンクリートの耐久性に関する研究の現状とデータベース構築のためのフォーマットの提案，pp.39-40，2003，12。
- 5)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02[基礎編]，pp32-38，2002。
- 6)魚本健人・高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No.451，V-17，pp119-128，1992.8。
- 7)(社)日本鉄鋼連盟・SFRC 構造設計施工研究会編：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)，pp.39-43，2002.11。
- 8)矢郷隆浩・木村定雄・射場康平他：鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工板の開発(1)，第56回年次学術講演会，VI-014，2001.10。