

X線造影撮影によるコンクリート劣化の定量化に関する研究

Study on the quantification of concrete degradation using X-ray radiography with contrast medium

武田三弘*・大塚浩司**

Mitsuhiro TAKEDA and Koji OTSUKA

*正会員 工修 東北学院大学講師 工学部環境土木工学科 (〒985-8537 多賀城市中央 1-13-1)

**フェロー会員 工博 東北学院大学教授 工学部環境土木工学科 (〒985-8537 多賀城市中央 1-13-1)

The purpose of this study is to develop a new inspection method for concrete structure in the durability diagnosis. In this study, the microcrack of the concrete inside was detected using X-ray radiography with contrast medium, and the quantification of the concrete degradation was done. And, the relationship between this quantified degradation level and durability of the structure was required experimentally from the freeze/thaw test. In addition, from the structure in which the age exceeded 40 years, the core omission was carried out, and the quantification of the degradation by the X-ray imaging photographing was done using the sample.

Key Word : X-ray radiography with contrast medium, degradation level, microcrack

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性調査・診断を行う際に、従来より、目視検査と併せてシュミットハンマーによる反発硬度や抜き取ったコアによる圧縮強度などコンクリートの強度推定に関する試験が一般的に行われてきた。しかし、最近では、弾性波、電磁波、磁気などを用いた非破壊検査によって劣化現象を詳細に調査する場合が多くなってきた。これらの非破壊試験で得られる情報からひび割れ、空洞等の欠陥や劣化部のおよその位置および大きさなどを推定することが出来る。しかし、目視検査や現在実用されている非破壊試験ではコンクリート劣化をいくつかの段階にグレード化することはできても、個々の劣化を定量的に評価することは困難と考えられている。

著者らは、これまでにX線造影撮影法を用いてコンクリートの表面や内部に発生した、マイクロクラックを非破壊的に検出する手法について研究を行ってきた^{1)~5)}。コンクリートのマイクロクラックは、乾燥収縮、凍結融解、疲労荷重などによって発生するものである。そのマイクロクラックとコンクリートの耐久性の関係については、その発生量が、凍結融解作用による動弾性係数の低下や中性化、塩分浸透の促進に大きく影響を与えることを実験的に明らかにしており⁶⁾、両者には相関関係があると考え

えられる。従って、X線造影撮影によってコンクリート内部に発生しているマイクロクラックを検出し、そのクラック密度あるいはクラック密度に対応するX線透過度を測定すればコンクリートの耐久性（主として耐凍害性）に関する劣化を定量的に調べることが出来るのではないかと発想に至った^{7)~9)}。

そこで、本研究では、X線造影撮影法を用いて、まず、人工的に圧縮疲労による劣化を生じさせた供試体コンクリートのマイクロクラック発生状況およびX線透過度を測定し、次に、長期供用されていた実コンクリート構造物からコア抜きした供試体のマイクロクラック発生状況およびX線透過度を測定し、これらの結果から、コンクリート劣化の定量化が可能かどうかについて検討を行ったものである。

2. 供試体コンクリートによる劣化の定量化実験

2.1 供試体概要

実験に使用する供試体は、梁型供試体3体に対して繰り返し荷重を受けた鉄筋コンクリート梁からコア抜きを行い、得られた試料を厚さ10mmに切断したものを用いた。また、比較用供試体として、同じコンクリートで作製した無荷重状態の円柱供試体からも同様にコア採取し、それを厚さ10mmに切断したものを用いた。

(1) コンクリートの配合

実験には、普通ポルトランドセメント、目標強度 24 (N/mm²)、スランプ 8cm、粗骨材の最大寸法 25mm のコンクリートを用いた。表-1 はコンクリートの配合表を示したものである。

表-1 配合表

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (Kg / m ³)				
					W	C	S	G	AE 減
25	8	52	4.5	44.8	160	308	801	1036	0.92

(2) 供試体形状寸法

繰り返し载荷用鉄筋コンクリート梁の寸法は、300 × 200 × 1300mm である。この供試体には、D 19 の異形鉄筋を有効高さ 139mm に 3 本ずつ上下段に計 6 本配置したものを使用した。図-1 は、その形状寸法および配筋図を示したものである。

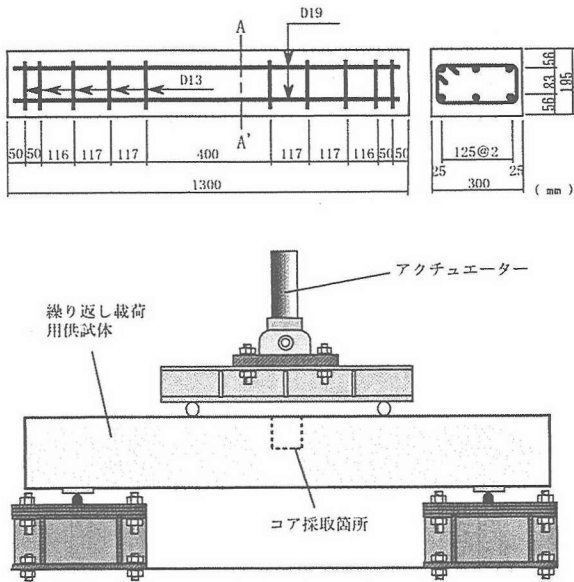


図-2 繰り返し载荷用供試体の载荷状況

2.2 実験方法

(1) 供試体作製方法

繰り返し载荷用鉄筋コンクリート梁は、4 点曲げ载荷 (せん断スパン比 a/d=2.17)、周期 4Hz において、200 万回の繰り返し载荷を行った (図-2 参照)。荷重の大きさは、梁の終局耐力の 30% (67.3kN) で行った。载荷終了後、均等の曲げモーメントを受ける曲げ圧縮部から、コアドリル (トルク 0.9 kg m) を用いて直径 100mm のコア抜きを行った。採取されたコアは、上面 (打設面) から鉄筋部分を除く約 10mm、30mm、70mm の位置において湿式ダイヤモンドカッ

ターを用いて厚さ約 10mm になるよう切断し、これを X 線造影撮影用の供試体 (劣化した供試体) として使用した。表-2 は、供試体諸元一覧を示したものである。

表-2 供試体諸元一覧

供試体名	切断位置 (mm)	スランプ (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	载荷条件 (kN)
S30-1-10	10	6	29.0	27.9	67.3 (終局耐力の 30%)
S30-1-30	30				
S30-1-70	70				
S30-2-10	10				
S30-2-30	30				
S30-2-70	70				
S30-3-10	10				
S30-3-30	30				
S30-3-70	70				

(2) X 線造影撮影方法

X 線造影撮影を行うにあたって、表-3 に示した条件で撮影を行った。

表-3 撮影条件

X 線発生装置	管電圧 (V)	100kV
	管電流 (i)	2mA
	焦点距離 (r)	900mm
	撮影時間 (t)	70sec
	焦点寸法	0.8 × 0.8mm
フィルム	工業用 X 線 (f)	富士フィルム #50
増感紙	鉛箔増感紙	

切断した厚さ 10mm の供試体に対して、造影剤を浸透させる前と、浸透後 10 分、1 時間、3 時間、6 時間および 12 時間の 6 度において撮影を行った。造影剤には、本研究室で開発したセシウム系で質量吸収係数 0.43cm⁻¹ のものを使用した。供試体は、いずれもコアから切断後、恒温恒湿室 (温度 20℃、湿度 60%) に 24 時間放置してから使用した。供試体に造影剤を浸透させる方法は、図-3 に示したように、造影剤で満たされた容器の中に供試体を沈め、圧力を加えない状態でを行った。そして、撮影の際には、供試体を容器から取り出し、表面部分の余分な造影剤をゴムワイパーで拭き取って使用した。

図-4 は、撮影状況を示したものである。供試体は、表-3 に示された条件で設置し、上方から下方に向けて X 線を照射し撮影を行った。また、現像液や定着液の状態等でフィルム濃度が変化する可能性もあるため、撮影の際には、供試体と供に基準モルタルを設置し、現像後のフィルム濃度の補正に使

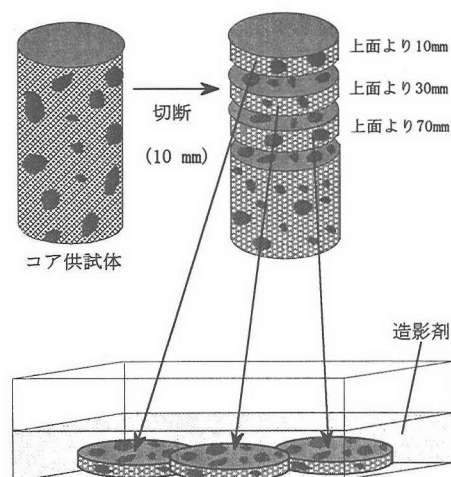


図-3 造影剤浸透方法

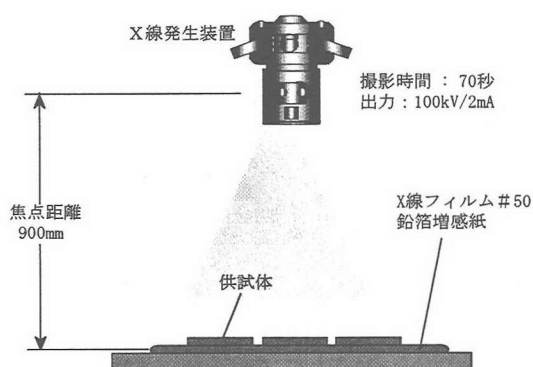


図-4 X線造影撮影状況

用した。

撮影終了後、X線フィルムは、自動現像機（富士工業用X-レイフィルムプロセッサFIP-100／富士フィルム）を用いて現像を行った。

(3) フィルム濃度の測定方法と劣化の定量化

これまで本研究室では、X線フィルムに映し出されたひび割れに対して、ひび割れ密度（単位面積あたりのひび割れ長さ）としてひび割れの長さを測定し、コンクリートの劣化の定量化を行ってきた。しかし、この方法では、マイクロクラックが多数発生している供試体ではクラックが厚さ方向に重なり合い、精度よく測定することは困難である。また、ひび割れ長さを測定する際には、人為的な誤差が伴いやすいことが分かった。

そこで、今回、X線フィルム濃度を測定する事によって、劣化度を求める方法を考案した。

一般に、コンクリート供試体に対してX線を照射し、透過したX線（透過線量）をX線フィルムに感光させた場合、現像されたX線フィルムには透過線

量に応じてその濃度に差が生じる。すなわち透過線量が大きくなるほど黒くなり、小さくなるほど透明（論文中では白）になる。

今回の実験では、X線フィルム濃度の測定に濃度計を用いた。濃度計とは、測定する局部（2mm φ）に一定の光量を入射させ、X線フィルムを透過した光量を受光し、式(1)からX線フィルム濃度を測定するものである。

$$D = \log(I_o / I_t) \quad (1)$$

但し、X線フィルム濃度 D 、測定する個所の入射光量 I_o 、透過光量 I_t とする。

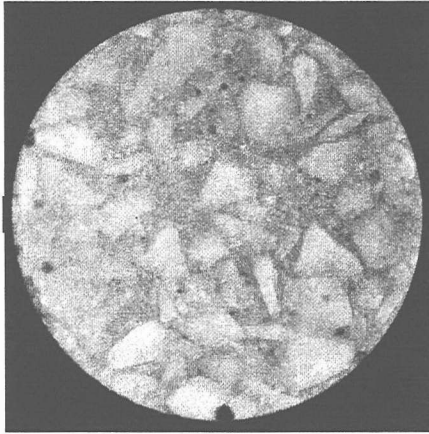
ここで、造影剤をコンクリート供試体に浸透させた場合、造影剤は、供試体内部の幅の広いクラックや欠陥部分から浸透を始め、次第にマイクロクラックへと浸透する。造影剤は質量吸収係数がコンクリートより大きい。従って、供試体内部に欠陥やクラックが多く存在している場合には、造影剤が多く浸透するためX線フィルム濃度は小さくなる。このことから、健全なコンクリートと劣化したコンクリートにおけるX線フィルム濃度の変化を比較することで、コンクリートの劣化の定量化を行うことが可能と考えられる。今回の実験において、X線フィルム濃度の測定箇所は、X線フィルムに写し出された供試体中のモルタル部分であり測定回数は、1つの供試体に対して約 1cm^2 の範囲を3箇所、各20点ずつ行い平均値を求めた。同様の方法で各造影剤浸透時間毎に同じ箇所のフィルム濃度の測定を行った。そして測定値から、浸透時間とフィルム濃度の関係をグラフで表した。尚、X線フィルム濃度は、造影剤浸透前において、2.0 となるような撮影条件（表-3参照）としている。

2.3 実験結果

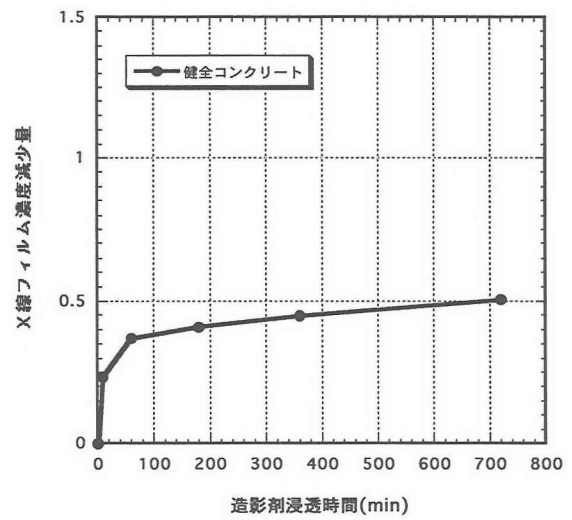
(1) 健全なコンクリートにおけるフィルム濃度と浸透時間の関係

写真-1は、健全なコンクリートから得られた供試体に対してX線造影撮影を行った結果得られたX線フィルム（造影剤浸透時間10分）を示したものである。このX線フィルムからは、マイクロクラックや欠陥部はほとんど検出することは出来なかった。

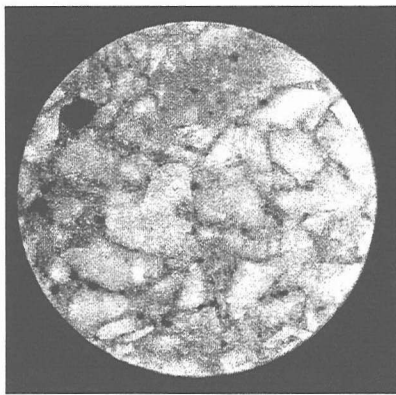
図-5は、健全なコンクリートに対して各造影剤浸透時間毎にX線造影撮影を行い、造影剤浸透前のX線フィルム濃度から、どれだけX線フィルム濃度が減少したかを表したフィルム濃度減少量と造影剤浸透時間の関係を示したものである。健全なコンクリートの場合、1時間程度までは急激にフィルム濃度が減少するが、その後は緩やかに減少した。12時間後のフィルム濃度減少量は0.5であった。



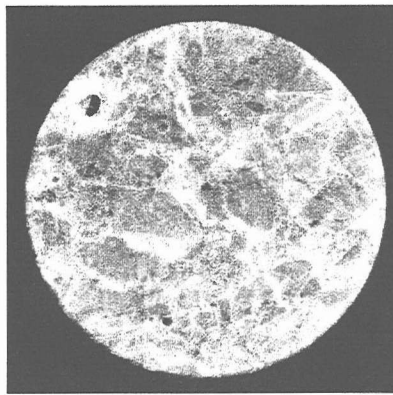
写真－1 X線フィルム(健全なコンクリート)



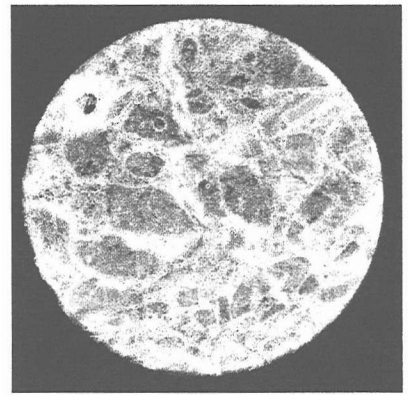
図－5 フィルム濃度減少量と浸透時間の関係



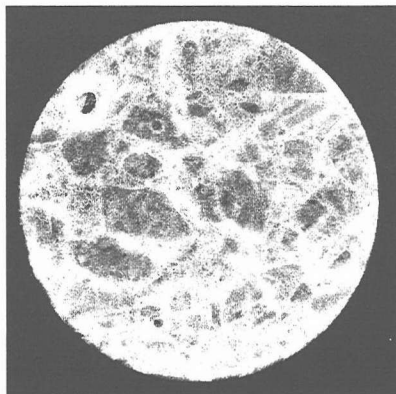
造影剤浸透前



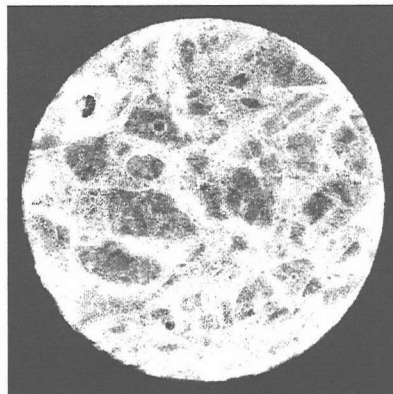
10分浸透後



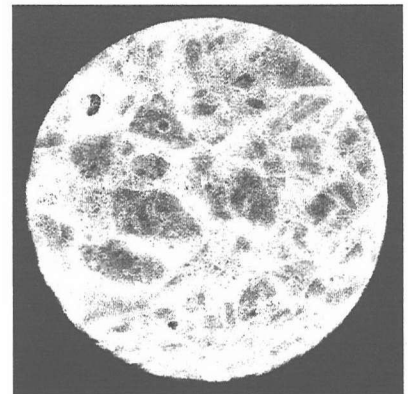
60分(1時間)浸透後



180分(3時間)浸透後



360分(6時間)浸透後



720分(12時間)浸透後

写真－2 浸透時間毎のX線フィルム (S30-1-30)

(2) 劣化したコンクリートにおけるフィルム濃度と浸透時間の関係

写真-2は、劣化したコンクリート（S30-1-30）の造影剤浸透前、10分、1時間、3時間、6時間および12時間後にX線造影撮影を行ったX線フィルムの一例を示す。造影剤浸透前のX線フィルムでは、若干欠陥部が検出できているが、造影剤浸透後10分では、幅の広いクラックばかりかマイクロクラックまでもが数多く検出できた。健全なコンクリートから得られたX線フィルム（浸透後10分）と比較してみても、検出されたクラックの量は、劣化したコンクリートの方が断然に多く、X線フィルムからも劣化していることを観察することが出来た。

造影剤の浸透時間が長くなると、造影剤は更にマイクロクラックから細孔へと浸透していき、12時間後のX線フィルム上のモルタル部分は、全体においては白くなった。

図-6は、劣化したコンクリートおよび健全なコンクリートのX線フィルム濃度減少量と造影剤浸透時間の関係の一例を示したものである。この図から分かるように、健全なコンクリートと比べて劣化したコンクリートは、深さ方向によってばらつきが見られるものの、かなりX線フィルム濃度の減少量が大きくなった。今回の実験では、X線フィルム濃度減少量の最大値は0.9程度であり、最小値は0.7程度となり、いずれの場合も、健全なコンクリートと比較すると、X線フィルム濃度減少量は大きく、劣化の傾向が確認できた。

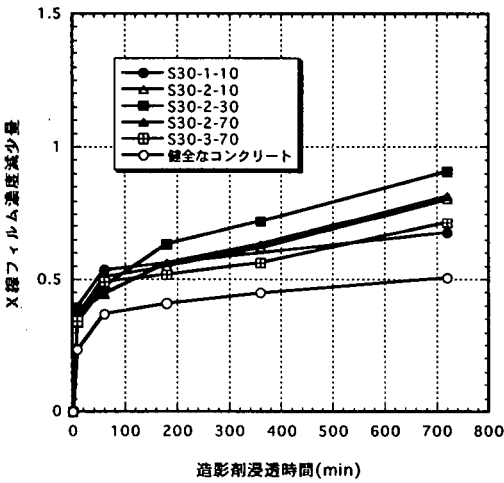


図-6 フィルム濃度減少量と浸透時間の関係

表-4は、造影剤浸透時間720分における各供試体のX線フィルム濃度変化と、健全なコンクリートに対する劣化したコンクリートの比率を示したものである。表からも分かるように、フィルム濃度減少

表-4 健全なコンクリートに対する劣化したコンクリートの比率

供試体名	X線フィルム濃度減少量 (浸透時間 720min)	健全なコンクリートに対する劣 化したコンクリートの比率
S30-1-10	0.67	1.34
S30-2-10	0.80	1.59
S30-2-30	0.90	1.80
S30-2-70	0.81	1.62
S30-3-70	0.71	1.42
健全コンクリート	0.50	1.00

量が最も大きかったのは S30-2-30 の供試体であり、最も小さかったのは S30-1-10 であった。

この様に、本手法によれば、マイクロクラックや欠陥等の発生状況を視覚的に捉えることができるばかりではなく、造影剤の浸透は大きな欠陥や幅の広いクラックから次第にマイクロクラック、そして細孔へと進んで行くことから、造影剤が劣化部だけに浸透したと考えられるある一定の浸透時間においてそのフィルム濃度の比較を行えばコンクリートの劣化度を定量化できると考えられる。

3. 実コンクリート構造物による劣化の定量化実験

3.1 供試体概要

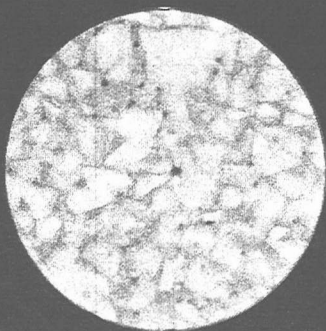
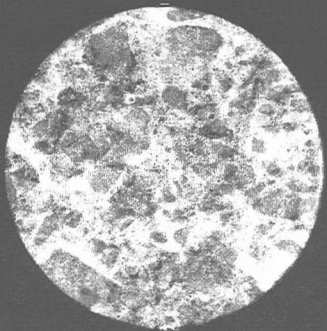
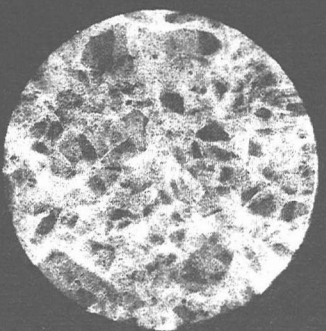
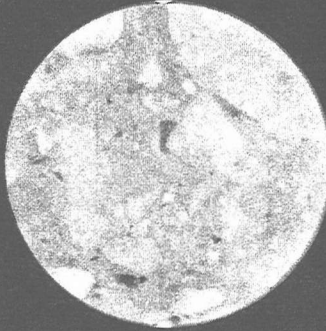
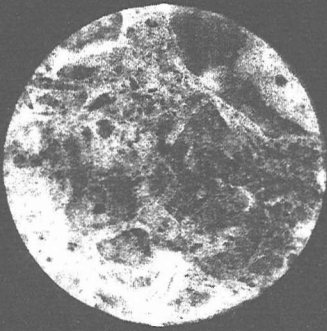
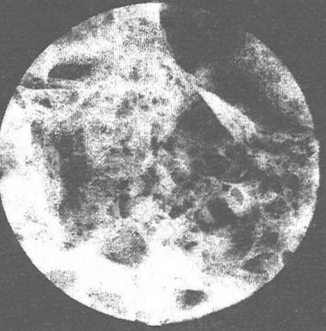
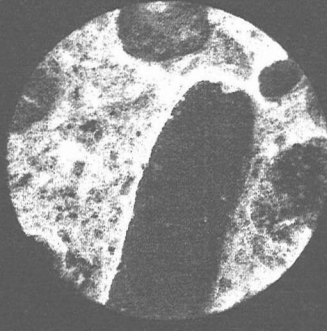
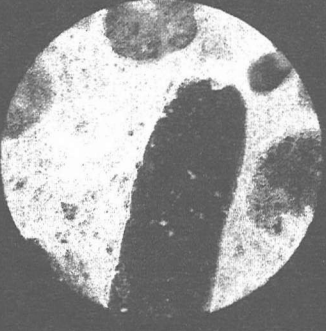
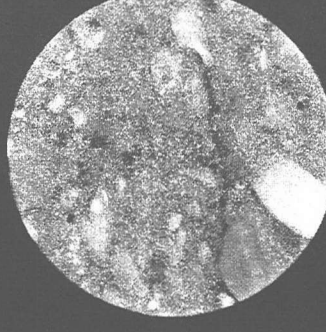
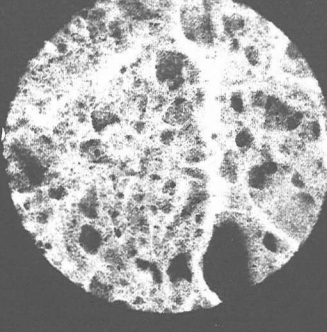
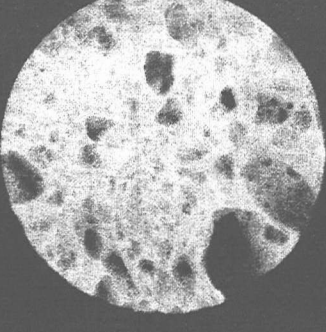
現場の供用期間40年を越える実コンクリート構造物で近く架け替えや打ち壊しが行われる予定の箇所からコア穿孔機を用いて、直径100mmのコア抜きを行った。表-5は採取した供試体の詳細について示したものである。表中の供試体名の数字は、表層から20mm程度の位置の供試体を1、表層から130mm程度の位置の供試体を2で示している。また、現場から採取した供試体と比較するために、前章で使用した健全なコンクリートを比較材として使用した。

表-5 供試体概要

現場名	材齢	採取場所	供試体名
O	41年	アスファルト舗装下コンクリート 橋梁床版部分	A-1
			A-2
K	48年	橋脚部	B-1
			B-2
H	44年	堰柱	C-1
			C-2
		パラペット	D-1
			D-2

3.2 実験方法

現場から採取したコアは、表層付近から20mmと

○ (橋梁床版)			
K (橋脚)			
H (堰柱)			
H (パラペット)			
	造影剤浸透前	浸透後10分	浸透後720分

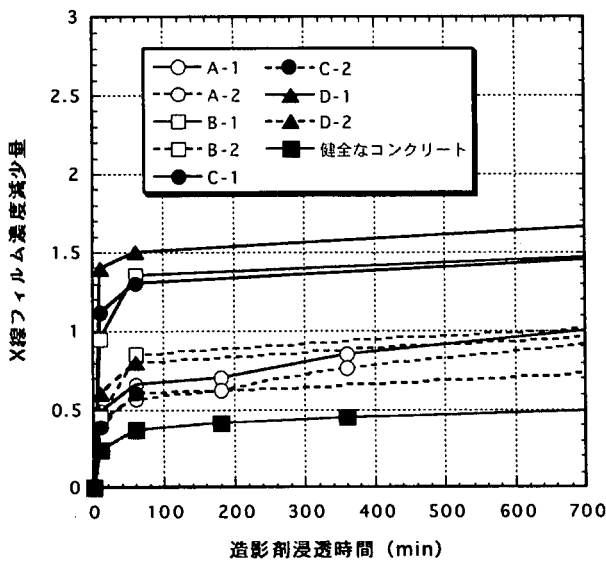
写真— 3 現場から採取した供試体

130mm の箇所から厚さ 10mm 程度にスライスし、X 線造影撮影用の供試体として、2.2 実験概要の(2) X線造影撮影方法に記した方法と同様に実験を行った。表層から 20mm の位置から供試体を取り出した理由は、表層付近のコンクリートが劣化しており、表面形状が平らではなかったためである。

3.3 実験結果

写真－3 は、各現場から採取したコアの表層から 20mm の箇所のコンクリートの、造影剤浸透前、10 分および 720 分後に X 線造影撮影を行った X 線フィルムの一例を示す。いずれの供試体も、造影剤浸透前と比較すると、明らかに造影剤浸透後に検出できるクラックの方の数が多い。また、断面が薄い部材から採取した供試体の場合は、X 線フィルム濃度の低下が特に大きい傾向が見られた。

図－7 は、現場から採取したコンクリートの X 線フィルム濃度減少量と造影剤浸透時間の関係を示したものである。この図からも、X 線フィルム濃度減少量が一番大きいのは、断面が薄い箇所（パラペット）から採取した供試体であった。また、全体的に、表層付近のコンクリートは、X 線フィルム濃度減少量が大きい傾向が見られた。



図－7 フィルム濃度減少量と浸透時間の関係

表－6 は、健全なコンクリートに対する現場から採取したコンクリートの比率を示したものである。比較の結果、健全なコンクリートに対して、コンクリート表層付近では、1.78～4.05 倍、コンクリート内部では 1.05～2.49 倍となり、コンクリート内部よりも表層部の方が劣化が進行している傾向が見られた。

表－6 健全なコンクリートに対する現場から採取したコンクリートの比率

供試体名	X 線フィルム濃度変化量 (浸透時間 60 分の場合)	現場供試体／健全
A-1	0.66	1.78
A-2	0.39	1.05
B-1	1.35	3.65
B-2	0.92	2.49
C-1	1.30	3.51
C-2	0.60	1.62
D-1	1.50	4.05
D-2	0.80	2.16
健全なコンクリート	0.37	1.00

今回、現場から採取した供試体との比較材として、前章で使用した健全なコンクリートを使用した。今後、現場の実コンクリート構造物の比較材として同一構造物内の健全部と劣化部とから試料の採取を行い、両者を比較する方法によって、構造物内の劣化状況のある程度定量化できるものと考えられる。しかし、厳密に劣化度を測定する必要がある場合には、同一配合の劣化していないコンクリート供試体が必要であり、この点はコンクリート配合と X 線フィルム濃度との関係についてのデータの蓄積などが必要で今後の課題と考えられる。

5. まとめ

本研究は、X 線造影撮影法を用いて、コンクリート内部のマイクロクラックの検出および X 線透過度の測定を行い、コンクリートの耐久性に関する劣化の定量化について検討を行ったものである。本実験の範囲内において、以下のことが言える。

- (1) 圧縮疲労を受けたコンクリート供試体に対して、造影剤を浸透させ、その前後に X 線撮影を行った結果、造影剤浸透前には、幅の広いクラックや大きな欠陥等しか検出出来なかったものが、造影剤浸透後には多くのマイクロクラックを検出することが出来た。
- (2) 健全なコンクリート供試体と圧縮疲労を受けたコンクリート供試体に対して、X 線造影撮影を行い、得られた X 線フィルムの濃度測定を行った結果、疲労したコンクリート供試体の方が、健全なコンクリート供試体に比べて、X 線フィルムの濃度が小さくなる傾向がみられた。これは、疲労を受けたコンク

リート供試体には、マイクロクラックが数多く発生し、造影剤がその中に浸透し、透過X線量が小さくなったためである。

(3) 長期供用されていた実コンクリート構造物からコア抜きした供試体を用いて、X線造影撮影によりコンクリート内部のマイクロクラックおよびX線透過度の測定を行った結果、断面の薄い箇所や表面付近のコンクリートのマイクロクラックおよびX線透過度が、他に比べて大きくなる傾向が顕著にみられた。

(4) コンクリートのマイクロクラックの発生量と耐久性との間に密接な関係があることから、X線造影撮影法により、既設コンクリート構造物から採取したコンクリートのマイクロクラックおよびX線透過度を測定すれば、そのコンクリートの耐久性に関する劣化度を定量的に調べる事が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 大塚浩司：X線造影撮影による鉄筋コンクリートの微細ひびわれ検出，コンクリート工学年次論文報告集，第10巻第3号，pp. 145-150，1988.
- 2) 大塚浩司：X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究，土木学会論文集No. 451/V-17，pp. 169-178，1992.
- 3) K.Otsuka：X-Ray Technique With Contrast Medium To Detect Fine Cracks In Reinforced Concrete，*International Workshop On Fracture Toughness And Fradure Energy (Sendai, Tohoku Univ)*, 1988.
- 4) K.Otsuka：Detection Of Fracture Process Zone In Concrete By Means Of X-Ray With Contrast Medium，*Fracture Mechanics Of Concrete Structures, Elsevier Applied Science*，pp. 485-490，1992.
- 5) 武田三弘，大塚浩司，佐野 正：X線造影撮影法によるコンクリート実構造物のひび割れ検査技術の開発，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第5部，pp. 664-665，愛媛大学城北地区，1995.
- 6) 大塚浩司，庄谷征美，阿波 稔：蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響，土木学会論文集，No. 585/V-38，97-111，1998.
- 7) 山家信幸，大塚浩司，武田三弘：橋梁コンクリート床版上層部の劣化度の定量化に関する研究，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM)，V-433，pp. 866-867，2001.
- 8) 山家信幸，大塚浩司，武田三弘：コンクリート構造物の劣化度の定量化に関する実験的研究，土木学会東北支部技術研究発表会 (平成13年度) 講演概要，pp. 530-531，2002.
- 9) 武田三弘，大塚浩司，山家信幸：コア貫入反力を用いたコンクリート強度の測定，土木学会東北支部技術研究発表会 (平成13年度) 講演概要，pp. 534-535，2002.
- 10) 大塚浩司・ショーボンド建設株式会社：コンクリートのひび割れ検出方法に用いるX線造影剤及びコンクリートのひび割れ検出方法，特願平 5-304602，1995.
- 11) 内田 勝，山下一也，稲津 博：放射線技術者のための画像工学，通商産業研究社
- 12) 武田三弘，大塚浩司，佐野 正，長内賢造：コンクリート構造物に発生した非貫通ひび割れの先端位置測定に関する研究，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，第5部 (平成8年9月)，pp. 1168-1169，1996.
- 13) Koji Otsuka, Mitsuhiro Takeda：Detection And Simultaneous Repairing Of Cracks In Reinforced Concrete Structures, *1997 International Conference On Engineering Materials, Volume II*, pp. 89-98, 1997.
- 14) Koji Otsuka, Mitsuhiro Takeda：Injection Material For Cracks With Combining Function Of Repair And X-Ray Contrast, *25th Anniversary Conference On Our World In Concrete & Structures, Singapore*, pp. 507-514, 2000.
- 15) 武田三弘，大塚浩司，佐野 正：コンクリート構造物に発生したひび割れの内部形状検出に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第5部 (平成9年9月)，pp. 692-693，1997.
- 16) 阿波 稔，大塚浩司，諸橋克敏：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひびわれ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 1，pp. 567-572，1993.

(2002. 4. 19 受付)