

論文 内部ひび割れのある鉄筋コンクリートの鉄筋近傍における水分挙動に関する研究

土屋 直子*1・兼松 学*2・野口 貴文*3・飯倉 寛*4

要旨: 本研究では鉄筋コンクリート中の鉄筋近傍における水分挙動の知見を得ることを目的とし、両引き載荷により人工的に鉄筋周囲に付着損失領域を導入した鉄筋コンクリート試験体及び無載荷試験体を準備し、非破壊イメージング技術である中性子ラジオグラフィを用いて実験的検討を行った。得られた測定値からコンクリート中の水分質量を定量化し、水分濃度依存の非線形拡散現象として拡散係数を算出した。画像及び拡散係数の結果から、鉄筋近傍における水分移動は大きく、特に両引き載荷による付着損失部分は健全な部分に比べて顕著であることが明らかとなった。

キーワード: 水分挙動, 鉄筋近傍, 付着損失領域, 鉄筋コンクリート, 水分定量, 中性子ラジオグラフィ

1. はじめに

鉄筋コンクリート中の水分は、劣化因子をコンクリート内部へ運ぶ役割を担うだけでなく、コンクリートの比抵抗を低下させるため、鉄筋コンクリートの耐久性と大きく関わっている。その中でも、鉄筋腐食は鉄筋コンクリート構造物の安全性を脅かす可能性のある最も重要な劣化現象である。この鉄筋腐食は、コンクリートの中性化や塩分侵入により鉄筋の不動態皮膜が破壊され、鉄筋へ水分と酸素の供給がなされることで発生する。従って鉄筋コンクリートのひび割れ部では、中性化の進行や水分の鉄筋部分への到達が速いため、鉄筋腐食開始時期や腐食速度が速いことが実験により明らかとなっている¹⁾。また、鉄筋とコンクリートとの界面には、鉄筋周囲に生じる内部ひび割れやブリージングの影響等により空隙が形成されていることもあり、ひび割れ部分から鉄筋に沿ってコンクリートの中性化が進行すること^{2), 3)}や鉄筋表面における空隙率と鉄筋腐食に相関があること⁵⁾なども実験により明らかにされている。これらはブリージングや内部ひび割れの存在により、劣化因子の供給がされ易いためと考えられる。

しかしながら、これら鉄筋腐食に関する研究の多くでは、コンクリートのかぶり厚さや水セメント比、ひび割れの有無やひび割れ幅等を試験体水準として設け、暴露、中性化促進試験、塩水浸漬と乾燥の繰返し試験等を行った後に鉄筋腐食を確認しているのみで、鉄筋腐食を発生させる要因である水分がどのようにコンクリート中の鉄筋近傍で移動するのかについては明らかにされていない。

一方、コンクリート中の水分測定手法として、中性子

を用いたイメージング技術である中性子ラジオグラフィがある。本装置は各元素に対する中性子の透過・減衰の差を利用した装置で、特に水素の存在によって大きく減衰するため、水分の検出に適しており⁵⁾、著者らによりコンクリート中の水分定量化手法が開発されている^{6), 7)}。

そこで本研究では、中性子ラジオグラフィを用いて今まで明らかにされていない鉄筋コンクリート中の鉄筋近傍における水分挙動について知見を得ることを目的とした中性子ラジオグラフィを用いた実験的検討を行った。特に、鉄筋とコンクリートの付着破壊によって異形鉄筋近傍に生じる内部ひび割れ⁸⁾が存在する場合を想定し、両引き載荷することで人工的に内部ひび割れを導入した鉄筋コンクリート試験体を用いて実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 装置概要

本研究における中性子ラジオグラフィによる測定は、(独)日本原子力開発機構 JRR-3M 内、TNRF (thermal

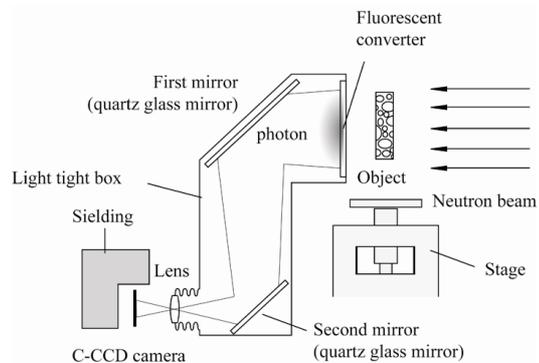


図-1 TNRF 概要図.

*1 東京大学 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科准教授 博(工) (正会員)

*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門研究員 博(農)

表-1 TNRF 装置仕様

中性子束	1.2×10 ⁸ (n/cm ² /sec)	
コリメータ比 L/D	水平方向	176
	垂直方向	153
画像サイズ	1008×1024 (pixel)	
空間解像度	100μm/pixel	
CCD カメラの輝度分解度	14bit (16384 階調)	
蛍光コンバータ	6LiF:NzS(Ag)	
レンズ	f105mm	
時間解像度(データ転送時間を含む)	8 (sec)	

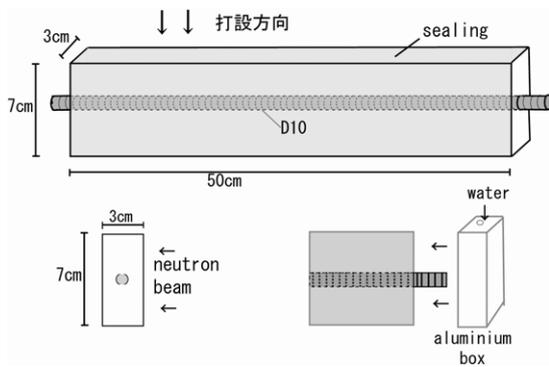


図-2 試験体概要図

表-2 試験体配合

%	%	kg/m ³			
W/C	air	water	cement	fine	coarse
50	4	175	350	856	911

表-3 式中の記号概要

I / I_0	透過率
I_{RC-t}	ある時間における鉄筋コンクリートの中性子透過強度
I_0	試料を何も置かないときの中性子透過強度
I_{fe}	鉄筋の中性子透過強度
λ (cm ² /g)	質量吸収係数 (物質固有の値)
ρ (g/cm ³)	物質の密度
δ (cm)	物質の厚さ

c: コンクリート, fe: 鉄筋, w: 自由水

neutron radiography facility) 第2撮影室で行った。装置仕様を表-1に、装置概要を図-1に示す。本装置は、研究炉より得られる熱中性子線を利用したラジオグラフィ装置である。図-1において中性子線が右から試料に照射され、透過した中性子線はコンバータで光に変換されて CCD カメラに捉えられる。データの整理方法など詳しくは文献6を参照されたい。

2.2 試験体概要

引張を受ける異形鉄筋の周辺のコンクリートにおいて、鉄筋軸と直角方向に発生するひび割れ近傍では、異形鉄筋のフシから円錐状に内部ひび割れが生じていることが知られる⁸⁾。そこで、鉄筋コンクリートを両引きによる両引き載荷することにより鉄筋周囲に内部ひび割れがある試験体及び無載荷の内部ひび割れがない試験体を用いて実験を行った。

試験体概要を図-2に、試験体調合を表-2に示す。水セメント比50%で寸法7×3×50cmのコンクリート試験体中央部分にφ10異形鉄筋を配置し、打設から24時間で脱型し、20℃、60%RHの気中養生とした。用いた鉄筋はタケフシ型である。材齢28日に100N/mm²の両引き載荷を行うことで試験体端部に付着破壊に伴う内部ひび割れを生じさせた。また、TNRF測定のためにコンクリートカッターにより中央部で分割し、試験体側面からの吸・放水を防ぐためにアルミテープを巻くことでシーリングした。

2.3 実験概要

鉄筋軸方向に対して垂直方向に生じたひび割れから鉄筋近傍の内部ひび割れへ浸透する自由水を仮定して、図-2に示すように試験体端部にアルミ製の容器を取り付けて水分を供給した。

水分を供給する前、および水分供給から5, 10, 20, 30, 45分後において中性子ラジオグラフィの撮影を行った。また、恒温ユニット装置を用いて温度は20℃一定とした。

3. 定量化概要

画像の各 pixel における中性子透過率は、自由水と鉄筋、ペースト、骨材を含む複合的な値である。そこで、本研究では、鉄筋コンクリート中の水分挙動を明らかにするため、自由水の通り道であるペーストの単位体積あたりの水分質量として定量化する。表-3に本論文での式で用いる記号概要を示し、定量化の概要を以下に示す。

3.1 移動した水分質量の定量化

試験体に照射された中性子は、試験体の質量吸収係数 λ 、密度 ρ 、厚さ δ といった減衰因子に関係して減衰することが知られる⁹⁾。また、これらの減衰因子は試験体中の各物質の重ね合わせが可能である¹⁰⁾ことから、中性子照射方向に鉄筋、コンクリートおよび自由水がある場合の中性子透過率 I_{RC-t}/I_0 と減衰因子との関係は式(1)のように表される。

$$-\ln\left(\frac{I_{RC-t}}{I_0}\right) = \lambda_c \rho_c \delta_c + \lambda_{fe} \rho_{fe} \delta_{fe} + \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (1)$$

ここで I_{RC-t} はある時間 t において鉄筋とコンクリートと自由水がある場合の中性子透過強度を示し、 I_0 は試験

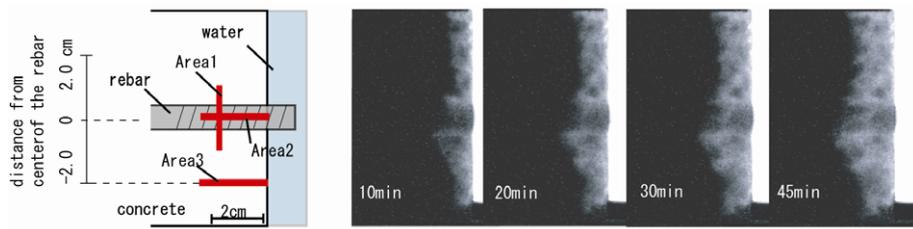


図-3 無載荷試験体における水分挙動（透過率画像）

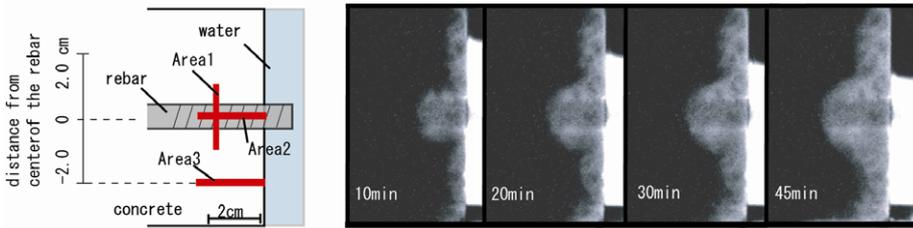


図-4 内部ひび割れを有す試験体における水分挙動（透過率画像）

体がない状態での中性子透過強度である。

時間 t における鉄筋コンクリート試験体中の自由水変化量を定量化するため、式(2)に示すように時間 t における透過度 $I_{RC,t}$ から初期の透過度 $I_{RC,t=0}$ を差し引くことで、移動した自由水のみに対する中性子透過率を得る。

$$-\ln\left(\frac{I_{RC,t}}{I_{RC,t=0}}\right) = \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (2)$$

ここで、自由水のみに対する中性化透過率を 2cm 厚さの飽水させたコンクリート中に存在する水の質量吸収係数 $\lambda_w = 1.42^7$ とコンクリート厚さ δ_w で除すことで、コンクリート単位体積あたりの水分質量 ρ_w を算出し、さらに各座標におけるペースト体積で除すことでペースト単位体積あたりの水分質量を算出可能である。

4. 実験結果・考察

4.1 透過率画像

式(2)で表される各時間における自由水分変化量を表す透過率画像について、図-3に無載荷試験体の結果を、図-4に載荷により内部ひび割れの生じた試験体の結果を示す。白い部分は水分が多いことを示している。

図-3より、無載荷試験体では水分供給後 10 分までに鉄筋下部における水分浸透が多いことが観察された。その後、最初の水分分布形状にほぼ平行して水分は鉄筋軸方向へ浸透しており、水分供給後 10 分以降での鉄筋軸方向への水分浸透は、鉄筋近傍とそれ以外のコンクリート部分とで大きな差が見られなかった。

次に、図-4より、内部ひび割れを有する試験体では、同様に水分供給後 10 分までに鉄筋表面部分に一気に水分が浸透しているが、鉄筋表面部分とそれ以外のコンクリート部分での水分が浸透している範囲の大きさは無載

荷試験体より顕著であった。また、水分供給後 10 分以降では、鉄筋表面部から鉄筋軸と垂直方向へも水分が浸透している様子が観察された。

また、鉄筋の影響を受けないコンクリート部分のみの水分浸透を両試験体と比較すると、水分浸透量に若干の差が見られるが、これは水頭圧の差や試験体誤差によるものと考えられる。

4.2 鉄筋軸と垂直方向への水分挙動

図-3及び図-4に示す試験体表面から 2cm の Area1 について、鉄筋コンクリート中を移動した水分をコンクリート単位体積あたりの水分質量として定量化した結果を、無載荷試験体については図-5に、載荷により内部ひび割れを有する試験体については図-6に示す。なお、ここでは 9 pixel×9 pixel (約 4mm²) の平均値を用いている。また、これ以降に示す結果は全て 9 pixel×9 pixel 範囲の平均値を用いている。

結果より、無載荷試験体と比較して内部ひび割れがある試験体の場合には鉄筋部の水分量が多く、鉄筋軸方向に凸型の形状となっている。一方、図-5では図-6のような鉄筋を中心とした凸の形状は見られないが、ブリージングの影響と考えられる鉄筋下部分に多くの水分が浸透する現象見られた。

4.3 鉄筋軸方向への水分挙動

さらに、鉄筋軸方向の水分挙動について調べるため、図-3及び図-4に示す鉄筋軸上の Area2 における変化水分量、及び鉄筋周囲部ではないコンクリート部分 Area3 における変化水分量の経時変化を、無載荷試験体については図-7に、載荷により内部ひび割れを有す試験体については図-8に示す。

結果より、いずれの試験体においても、コンクリート

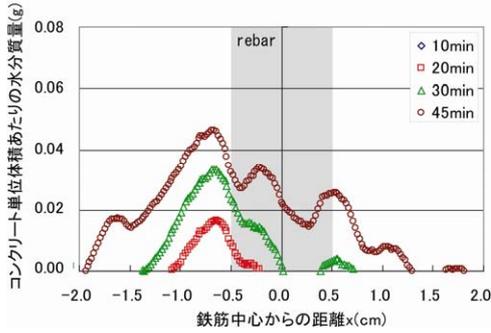


図-5 鉄筋軸と垂直方向への移動水分質量
Area_1 無載荷試験体

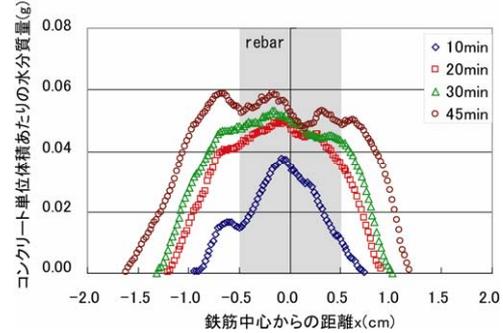


図-6 鉄筋軸と垂直方向への移動水分質量
Area_1 内部ひび割れを有す試験体

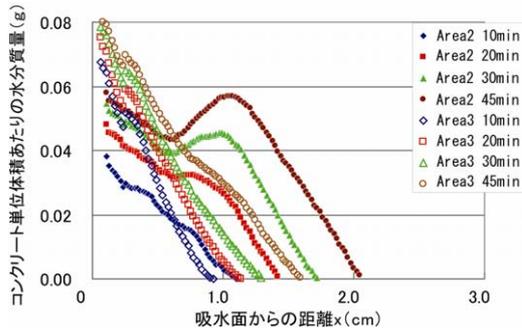


図-7 吸水面から鉄筋軸方向への移動水分質量
Area_2 及び Area_3 無載荷試験体

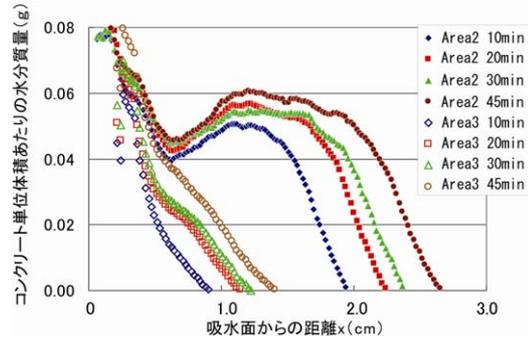


図-8 吸水面から鉄筋軸方向への移動水分質量
Area_2 及び Area_3 内部ひび割れを有す試験体

部分に比べて鉄筋軸上では水分供給面から深さ方向への水分の進行速度が速いこと、またコンクリート部分に比べて鉄筋近傍の方が水分質量も多いことが明らかとなった。これは、いずれの試験体においても鉄筋周辺において空隙量が多いためと考えられる。

また、図-7及び図-8を比較すると、図-8の方が鉄筋軸上とコンクリート部分とで水分の進行距離の差が顕著であり、これは水分供給から10分後までに一気に水分が進入していることが大きな要因である。

4.4 水分移動モデル

(1) 手法

コンクリート中の水分移動現象はコンクリート中の水分濃度に依存した濃度拡散現象として式(3)に示すような非線形拡散方程式で表すことができ、さらにボルツマン変換により式(4)として水分濃度依存の拡散係数を求めることができる¹¹⁾。

$$\frac{d\theta}{dt} = D(\theta) \frac{d^2x}{dx^2} \quad (3)$$

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{d\lambda}{d\theta} \int \lambda d\theta \quad (4)$$

ここで、 $D(\theta)$ は水分濃度依存の水分拡散係数 (cm^2/day)、 θ は水分濃度、 x は距離 (cm)、 $\lambda = x/2\sqrt{t}$ であり、各時間・距離における水分濃度を把握することで算出が可能である。

そこで、Area1における鉄筋軸と垂直方向へのコンクリート中への水分挙動とArea2における鉄筋軸方向での水分挙動、及びArea3のようなコンクリートのみ部分における水分挙動を比較するため拡散係数を算出した。

なお、本論文におけるArea2, 3では空間軸の各方向によって水分移動の大きさが異なるが、ここではそれらを含めた値として算出する。

(2) 結果

Area1, 2, 3における水分濃度依存の拡散係数の結果について、図-9に無載荷試験体の結果を、図-10に内部ひび割れを有する試験体の結果を示す。

Area1, 2, 3の結果を比較すると、コンクリート部分における拡散係数は約100程度であるが、Area1, 2での拡散係数はいずれも1000を超え、特に内部ひび割れを有する試験体の鉄筋軸上では10000を超える結果となった。これらのことから、コンクリートのみの部分に比べて鉄筋軸上や鉄筋周囲での水分拡散係数は大きくなり、更に内部ひび割れを有する試験体では無載荷試験体より水分拡散係数が大きくなることが示唆された。

また、無載荷試験体のArea1における結果が他と異なり一定範囲内に値が収束していない理由として、鉄筋下部分における水分挙動が原因と考えられる。つまり、鉄筋軸と垂直方向よりも鉄筋軸方向での水分移動が大きかったことが原因と考えられる。

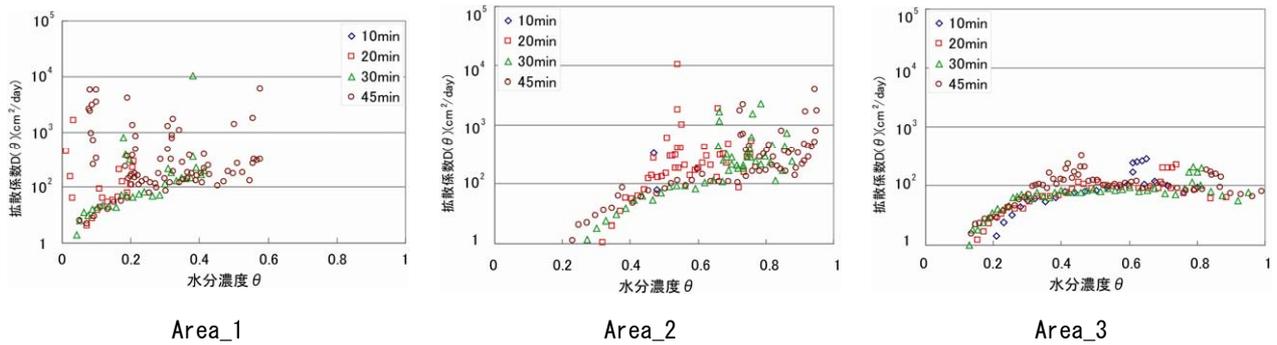


図-9 無載荷試験体の各 Area における水分拡散係数

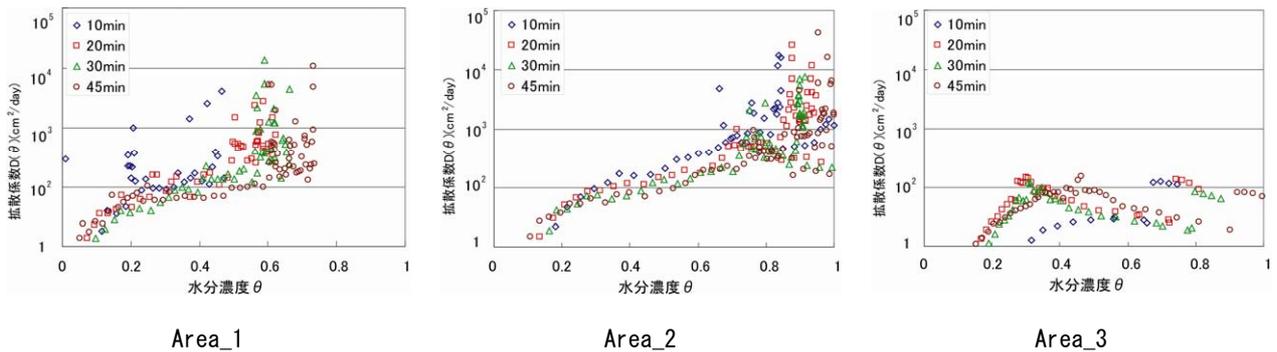


図-10 内部ひび割れを有す試験体の各 Area における水分拡散係数

5. まとめ

本研究では鉄筋コンクリート中の鉄筋近傍における水分挙動の知見を得るため、両引き載荷により人工的に鉄筋周囲に内部ひび割れを導入した鉄筋コンクリート試験体及び無載荷試験体について中性子ラジオグラフィを用いて水分挙動の測定を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 両引き載荷により鉄筋周囲に内部ひび割れを生じさせた鉄筋コンクリート中の鉄筋近傍での水分挙動は、水分供給開始後すぐに水分が鉄筋表面部に浸透し、その後鉄筋表面部に浸透した水分が鉄筋軸と垂直方向へ浸透することが明らかとなった。
- (2) 内部ひび割れを生じさせていない無載荷の鉄筋コンクリート試験体においても、鉄筋下部分にブリージングの影響と考えられる水分移動が見られ、水分質量も多かった。
- (3) 吸水面から鉄筋軸方向への水分挙動についてコンクリート体積あたりの水分質量として定量化した結果、鉄筋周囲における水分挙動は鉄筋周囲ではないコンクリート部分における水分挙動に比べて水分移動が速く、特に内部ひび割れを有す場合は顕著であった。
- (4) 鉄筋周辺の水分挙動について水分濃度依存の水分拡散係数を算出した。その結果、鉄筋周辺における水分拡散係数は鉄筋周囲ではないコンクリート部

分の水分拡散係数に比べて大きな値を示し、特に内部ひび割れを有す場合は顕著であった。

謝辞

本研究を実施するに当たり、東京理科大学の篠田裕樹氏のご協力を賜りました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 大野義照, 柳済峻: 鉄筋腐食に及ぼすコンクリートの中性化の影響, セメントコンクリート論文集, Vol.17, No.52, pp.974-979, 1998
- 2) 唐沢智之ほか: ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.26, No.1, pp.873-878, 2004
- 3) 松田沙耶他ほか: 曲げひび割れを有するコンクリートの中性化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.1, pp.657-662, 2008
- 4) Glass, et al.: PCT Patent App WO 01/55056 A1, 2001
- 5) (社)日本アイソトープ協会: 中性子イメージング技術の基礎と応用, 2009.2.
- 6) 兼松学ほか: 中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における水分挙動の可視化及び定量化に関する研究, セメントコンクリート論文集, No.61, pp.160-167, 2007
- 7) 土屋直子ほか: 中性子ラジオグラフィによるコンク

- リート中の水分定量に関する研究, コンクリート工学年次大会論文集, vol.30, No.1, pp. 769-774, 2008
- 8) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.294, pp.85-9100.1980.2
- 9) F.C. de beer, et.al.: Neutron radiography of porous rocks and iron ore, Applied Radiation and Isotopes, vol.61, pp.487-495, 2004
- 10) H.Pleinert, et.al.: Determination of moisture distributions in porous building materials by neutron transmission analysis, Materials and structures, Vol.31, pp. 218-224. 1998.
- 11) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集, Vol.23, No.490, pp.101-110, 1994.