

研究成果報告書

研究開発課題名	RC 造農業水利施設のひび割れ劣化診断・補修システムの開発
研究総括者	西松建設株式会社 技術研究所 原田 耕司
研究開発組合	①西松建設株式会社 ②株式会社計測リサーチコンサルタント
試験研究機関	①佐賀大学 ②長崎大学 ③東海大学

1. 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

我が国の農業用水を供給する農業水利施設のうち、基幹的な農業用水用排水路の総延長は、約 47,000km にも達し、また、ダム、頭首工、用排水機場等は約 7,000 箇所を超える。これらの施設は、現在、老朽化のピークを迎えており、膨大な農業水利ストックの機能を効率的・効果的に維持するための技術開発が課題となっている。

この膨大な農業水利ストックの機能を適切かつ効率的に発揮させるためには、深刻な機能低下が発生する前に、施設の劣化状況を把握するための点検・調査・機能診断に基づく適切な予防保全を行うストックマネジメントが重要である。

ストックマネジメントとは、農林水産省のホームページによれば、「管理者による日常管理、定期的な機能診断調査と評価、調査結果に基づく施設分類と劣化予測、効率的な対策工法の比較検討、計画に基づく対策工事の実施、調査・検討の結果や対策工事に係る情報の蓄積等を、段階的・継続的に実施するものである」と定義されている。今回開発する技術は、上記ストックマネジメント遂行で基幹となる技術である、機能診断調査、対策工事に関するものである。

コンクリートはぜい性材料であり、鉄筋コンクリート構造物のひび割れ発生は宿命的なものであると言える。鉄筋コンクリート構造物では、ひび割れの進展状況をモニタリングすることや、その補修は、構造物の長寿命化にとって、極めて重要なポイントとなる。

そこで本研究開発では、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化に大きく影響を与える「コンクリートのひび割れ」に着目し、コンクリートの表面ひび割れの進展状況およびひび割れ発生時のモニタリング装置の開発、および内部ひび割れ状況やひび割れ補修材の充填状況を直接管理できるシステムを開発することを目的とする。

コンクリートの表面ひび割れの進展状況およびひび割れ発生時のモニタリング装置に関しては、現在、補修・補強工事がピークを迎えている RC 造農業水利施設に必要な技術であると考えている。すなわち、補修工事の完了後、鉄筋腐食等によるひび割れが発生する前に再劣化（ひび割れ発生）を事前に予測することにより、構造物の計画的な補修計画が可能になる。

また、ひび割れ補修材の充填状況確認に関しては、西松建設㈱が施工した北陸農政局様発注の阿賀野川頭首工改修（その 2）工事の特記に、ひび割れ注入材の注入状態の確認を行うよう記載されており、RC 造農業水利施設の現場からのニーズもあり、同じく RC 農業水利施設には、必要性が高い技術であると考えている。

1. 2 事業の内容及び実施方法

(1) コンクリート表面ひび割れのモニタリング装置の研究開発

コンクリート表面のひび割れの進展状況もしくはひび割れ発生のモニタリングを行うための高精度な画像撮影装置を開発した。

1) 高精度な表面画像撮影装置の開発

ひび割れの幅や長さの進展状況をデジタル画像により簡易に精度良く行う、高精度な表面画像撮影装置を開発した。さらに、この装置をデジタル画像相関法解析により表面ひずみ分布が測定できるように発展させ、鉄筋腐食によるひび割れの発生位置を予測できる装置とした。

2) 室内試験

表面画像撮影装置により、鉄筋腐食によるひび割れの発生を予測する方法を、室内試験で詳細な検討を行った。

3) 実証試験

開発した装置を用いて実証試験を行った。

(2) ひび割れ注入の施工管理の研究開発

内部ひび割れ状況やひび割れ注入材の充填状況を削孔した小径孔より観察できる装置及びシステムを開発した。

1) 紫外線ライト型内部ひび割れ計測・診断装置の開発

ひび割れ注入は、微細なひび割れに注入されるため、目視で注入状態を確認することが困難である。そこで、蛍光材入りの注入材を観察するための紫外線ライトを装着したコンクリート内部ひび割れ計測・診断装置を開発した。

2) 蛍光材を添加した注入材料の諸特性の把握

市販の注入材に蛍光材を添加した場合の諸物性の変化を各種試験によって把握した。注入材はポリマーセメントモルタル系とエポキシ樹脂系の2種類について行った。

3) 実証試験

開発した装置を用いて実証試験を行った。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

事業着手時に想定した技術的問題点への対応を表－1.3.1 に示す。

表－1.3.1 技術的問題点と対応

技術的問題点	対応
コンクリート表面ひび割れを高精度に撮影する装置における画像解像度と外乱光による誤差の問題	・画像を広範囲に撮影する装置にはカメラがあるが、レンズ収差の問題や外乱光による画質の劣化の問題があった。そこで、撮影対象に密着して画像を取得できるラインセンサスキャナを走査させ撮影する装置を開発した。この方法では画像解像度も高く、1 ピクセル 20 μ m 程度の分解能が得られた。
ひび割れ注入は、微細なひび割れに注入されるため、解像度の高い撮影方法が要求される	・蛍光材を添加した注入材を紫外線 LED ライトで発光させ、微細なひび割れに注入された注入材の充填状況の観察を容易にした。 ・紫外線ライト型内部ひび割れ計測・診断装置を開発した。

1. 4 事業の実施体制

表－1.4.1 に研究開発の役割分担を示す。

表－1.4.1 役割分担

開発テーマ	実施項目	新技術研究開発組合		試験研究機関		
		西松建設	計測リサーチコンサルタント	佐賀大学	長崎大学	東海大学
コンクリート表面ひび割れのモニタリング装置の開発	①高精度な表面画像撮影装置の開発	◎	○	○	○	○
	②室内試験（ひび割れ発生予測方法の検討）	◎	○	○	○	○
	③実証試験	○	◎	○	○	○
ひび割れ注入管理システムの開発	①紫外線ライト型内部ひび割れ計測・診断装置の開発	◎	○	○	—	—
	②蛍光材を添加した注入材料の諸特性の把握	◎	—	—	—	—
	③実証試験	◎	○	○	—	—

1. 5 事業の年度計画と実績

(1) コンクリート表面ひび割れのモニタリング装置の開発

表－1.5.1 に年度計画と実績を示す。

表－1.5.1 年度計画と実績（モニタリング装置）

項 目	平成 2 3 年度		平成 2 4 年度		平成 2 5 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
高精度な表面画像撮影装置の開発						
室内試験（基礎データの収集）						
実証試験						

注)  は計画、 は実績。

(2) ひび割れ注入管理システムの開発

表－1.5.2 に年度計画と実績を示す。

表－1.5.2 年度計画と実績（注入管理）

項 目	平成 2 3 年度		平成 2 4 年度		平成 2 5 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
紫外線ライト型内部ひび割れ計測・診断装置の開発						
蛍光材を添加した注入材料の諸特性の把握						
実証試験						

注)  は計画、 は実績。

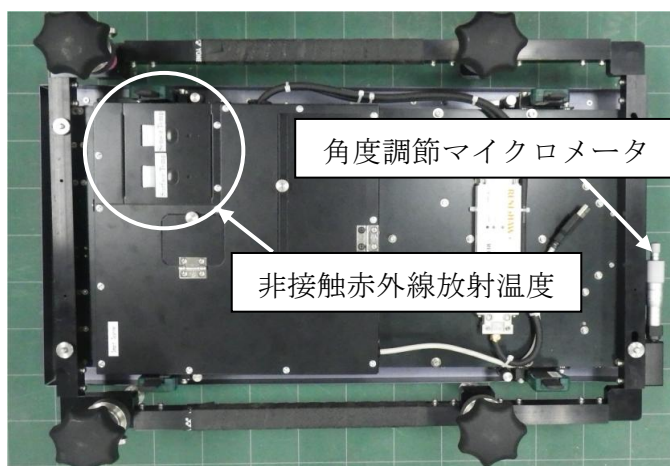
1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) コンクリート表面ひび割れのモニタリング装置の開発

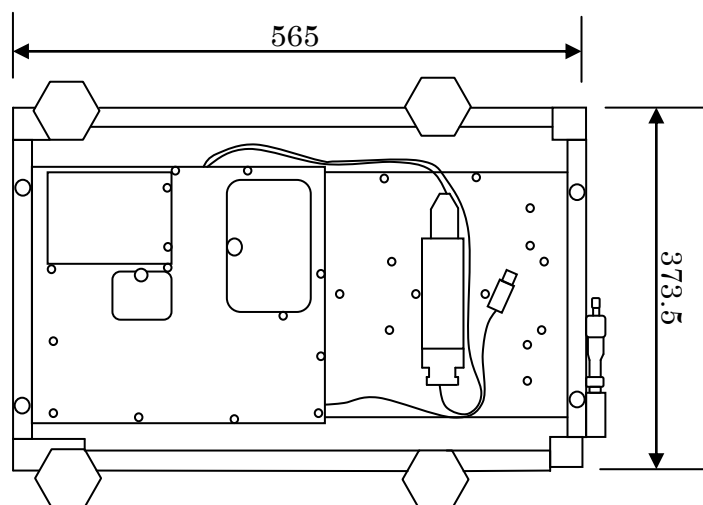
1) モニタリング装置の概要

①モニタリング外観および形状

モニタリング装置の外観を写真－1.6.1～1.6.3 に、その図面を図－1.6.1～1.6.3 に示す。開発したモニタリング装置は、ラインセンサを走査しコンクリート表面の高精細な画像データを入手できるシステムとなっている。その外形寸法は373.5mm×565mmで、質量は12.2kgであり、一人で取付けが可能な大きさとなっている。本装置の設置方法は、試験体に受け具を貼り付け、そこに写真－1.6.3 に示すような本装置の四隅にある取り付け部を入れ込み、押しバネの反力により本装置を計測面に押し付け固定するといった、簡易な方法で設置できる。スキャニング範囲（入手できる画像の範囲）は、最大 350mm×210mm である。また、ラインセンサの送り機構として写真－1.6.2 に示すボールネジを 2 本配置し、ラインセンサのスキャニング時（移動時）のヨーイング（上下を軸とした回転）およびピッチング（左右を軸とした回転）を低減し副走査方向ひずみ計測精度を確保している。



写真－1.6.1 モニタリング装置（上面）



図－1.6.1 モニタリング装置（上面）＊単位：mm

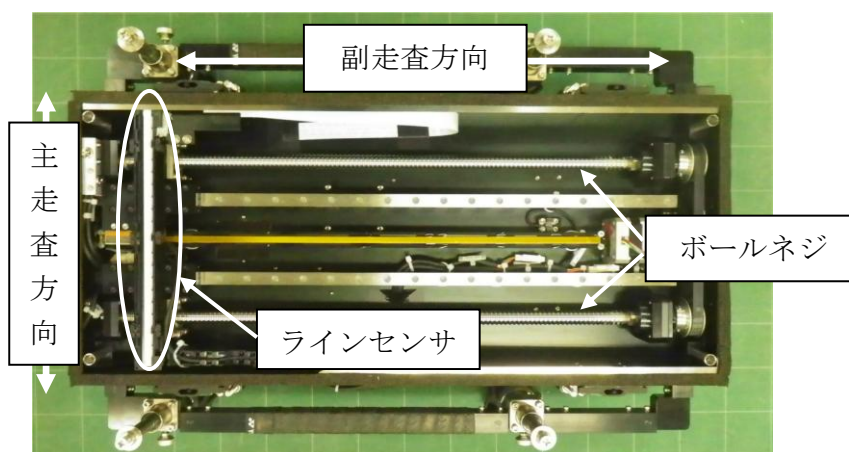


写真-1.6.2 モニタリング装置（裏面）

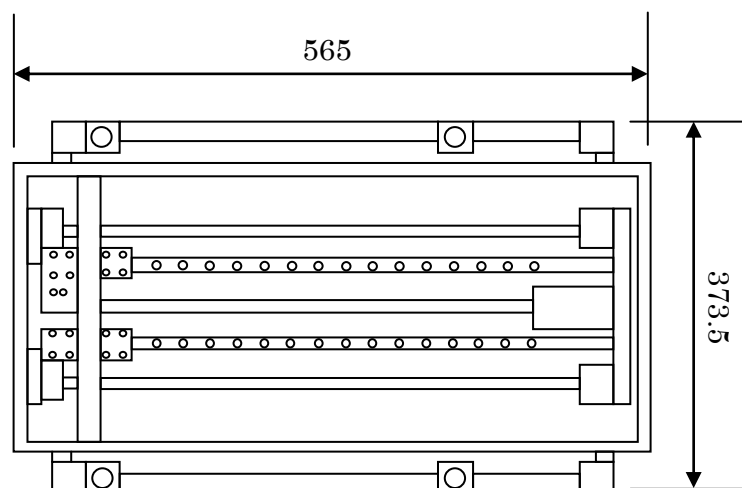


図-1.6.2 モニタリング装置（裏面）＊単位：mm

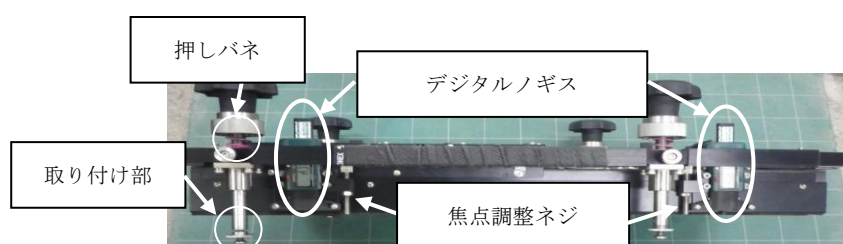


写真-1.6.3 モニタリング装置（側面）

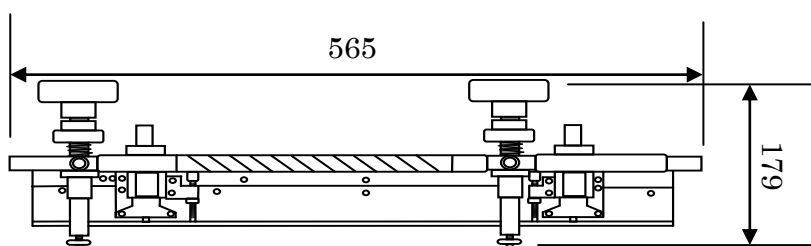


図-1.6.3 モニタリング装置（側面）＊単位：mm

②各部の概要

イ. ラインセンサ

モニタリング装置に使用したラインセンサは CIS タイプのものであり、その仕様を表－1.6.1 に示す。

表－1.6.1 ラインセンサの仕様

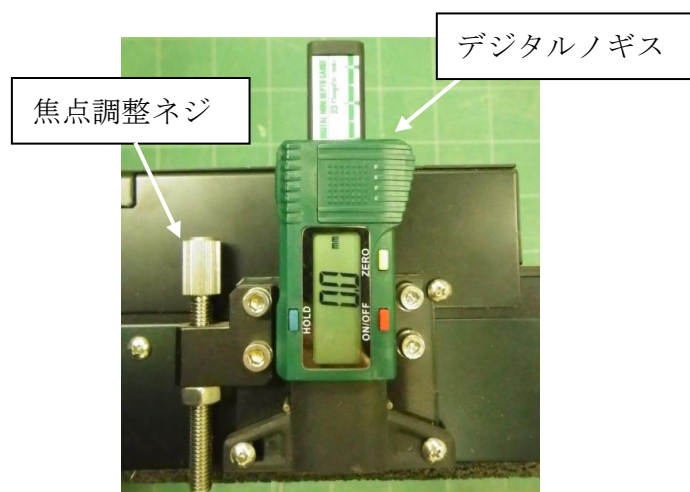
センサタイプ	CIS(Contact Image Sensor)
最大読み取りサイズ	375mm×210mm
光学解像度（主走査×副走査）	1,200×1,200dpi
読み取り解像度	1,200dpi×1,200dpi
光源	RGB3 色 LED
電源	DC15V
消費電力	15W

ロ. 非接触赤外線放射温度計

モニタリング装置には、赤外線放射温度計が 2 個取り付けられている。1 つは計測対象物表面温度を測定することができ、温度変化に伴うひずみ補正を行うためのものである。もう 1 つの赤外線放射温度計は、ラインセンサの温度を測定し、その温度変化に伴う誤差を補正するためのものである。

ハ. デジタルノギス・焦点調整ネジ

計測では、モニタリング装置を正確に対象構造物へ取付ける必要がある。モニタリング装置のデジタルノギスと焦点調整ねじを用いることにより、モニタリング装置の取付け後の焦点調整が素早く正確に行うことができる。写真－1.6.4 にデジタルノギスおよび焦点調整ネジを示す。



写真－1.6.4 デジタルノギスと焦点調整ネジ

ニ. 角度調節マイクロメーター

角度調節マイクロメーターは、取付け後のモニタリング装置の傾きの微調整を行うものである。角度調整マイクロメーターを一周回すと約 0.1 度主走査方向（写真－1.6.2 参照）の傾きが変化する。

2) モニタリング装置のひずみ計測精度の検証実験

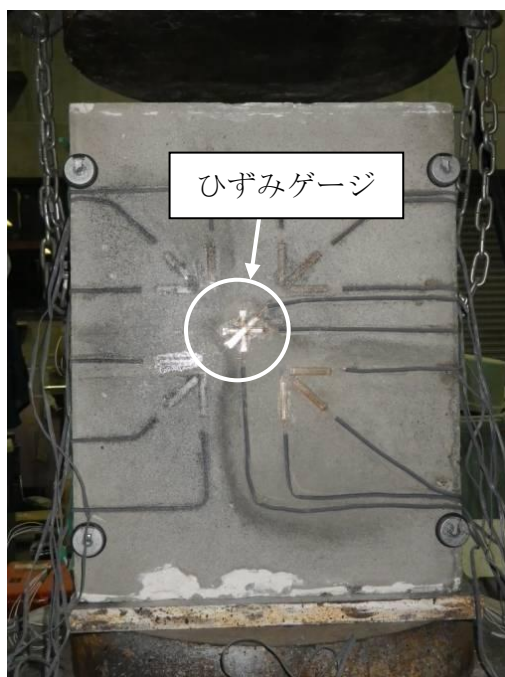
①実験概要

開発したモニタリング装置によるひずみ計測精度を検証するために、無筋コンクリート試験体を圧縮载荷しひずみを発生させ、画像を解析によって得られたひずみ値とひずみゲージにより測定した値を比較することにより、計測精度の評価を行った。

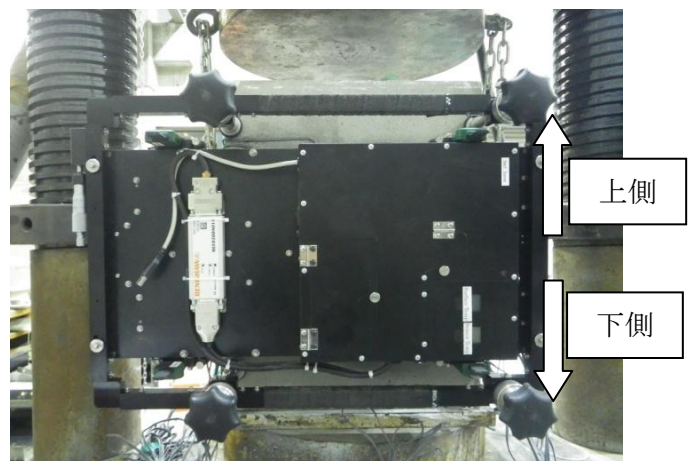
イ. 試験体およびひずみの測定

本実験に使用した試験体は写真－1.6.5 に示す無筋コンクリート試験体である。载荷面の断面は 370mm×240mm であり、その高さ 460mm である。試験体の端面（上下面）の研磨仕上げの精度や圧縮試験機ヘッドの微妙な偏心により、表面に貼付した複数のひずみゲージに偏差を生じるため、端面には石膏を塗りその上から金属板を接着することで試験体にかかる荷重がほぼ均等となるよう調整した。

モニタリング装置でのひずみの計測状況を写真－1.6.6 に示す。また、比較用のひずみゲージは、無筋コンクリート試験体の中心部に、写真－1.6.5 のように 30mm のストレインゲージを 3 方向（ ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_{xy} ）に添付して測定した。



写真－1.6.5 試験体（計測面）



写真－1.6.6 計測状況

* 垂直面を計測

ロ. 载荷方法

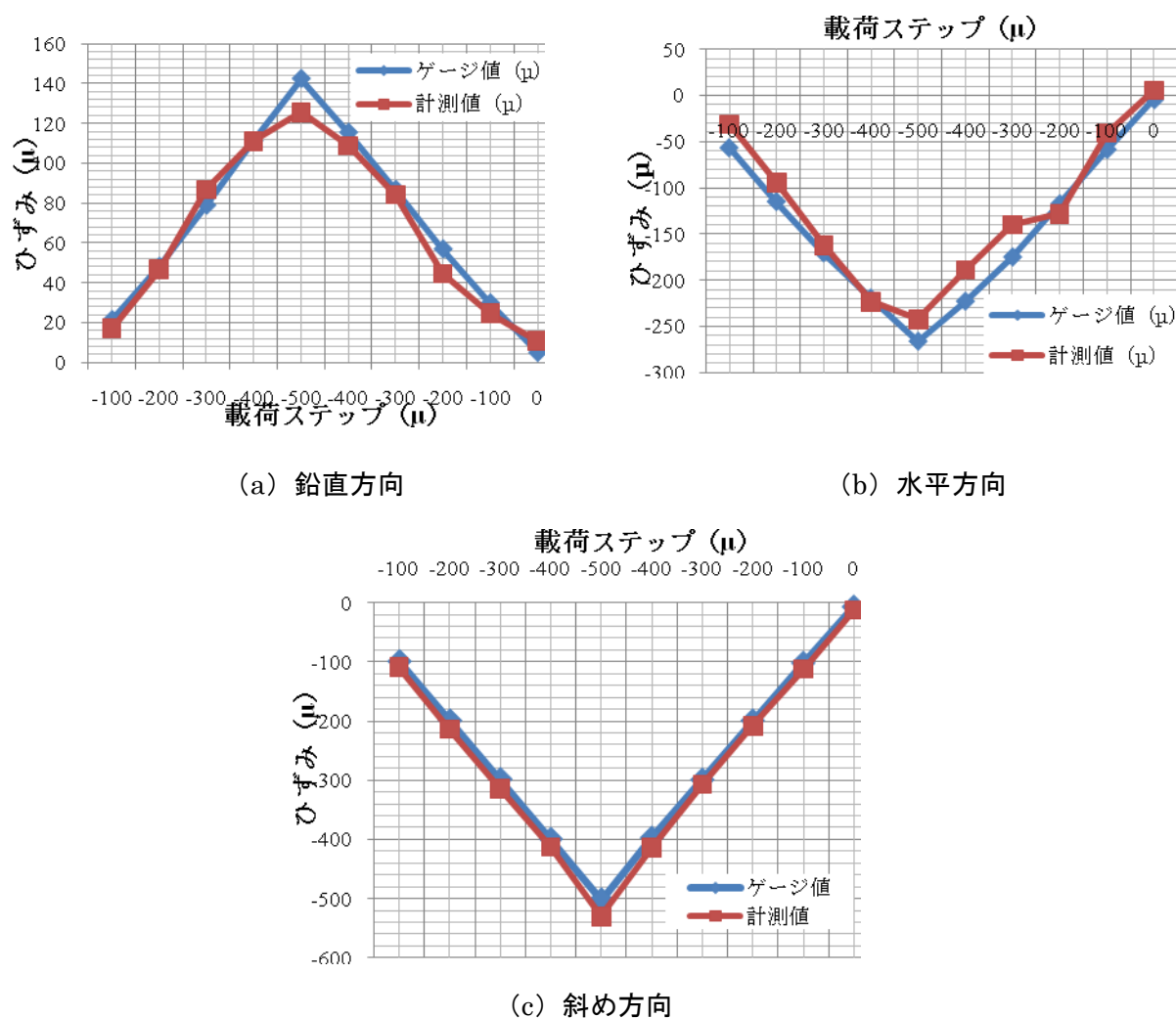
载荷方法は、圧縮試験機により一軸载荷し、鉛直方向に貼付したひずみゲージ値（ ϵ_y ）が 0 μ 、100 μ 、200 μ 、300 μ 、400 μ および 500 μ に達した時点で载荷を止め、モニタリング装置を用いてスキャンニングを行った。また、除荷時においても、同様に 100 μ 毎にスキャンニングを行った。

②実験結果

鉛直方向、水平方向および斜め方向のひずみの計測結果を図－1.6.4に示す。また、各方向の平均誤差および最大誤差を表－1.6.2に示す。ひずみゲージとモニタリング装置での計測の平均誤差は、鉛直方向、水平方向および斜め方向で、それぞれ12.2 μ 、6.2 μ 、10.7 μ となっている。また、最大誤差も65.5 μ となっており、モニタリング装置から求めたひずみ値は、ゲージから求めた値とほぼ同じ値を示しているのが分かる。

なお、本装置の画像分解能は0.0212mm/pixelであり、画像内で1pixel (0.0212mm)以上の幅を持つひび割れに関しては確認および計測が可能である。

以上により、開発したモニタリング装置は、ひずみレベルでも精度の高い値が求められ、ひび割れ幅・長さの計測に関しても、その精度は問題のないと言える。



図－1.6.4 荷重ステップとひずみの関係

表－1.6.2 平均誤差と最大誤差

	平均誤差 (μ)	最大誤差 (μ)
鉛直方向	12.2	25
水平方向	6.2	26.7
斜め 45°方向	10.7	65.5

3) 汚れによる影響の検討

現場ではひずみを連続して取るだけでなく、計測間隔が数ヶ月に及ぶ場合がある。天候が優れない日は、測定対象物が風雨に見舞われることもある。その場合、計測面に施した塗装が汚れ、計測結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで本実験では計測対象物を意図的に汚し、汚れによって生じる誤差を検討した。

①実験概要

本実験では比較的強めの汚れを入れることで、長期間の風雨による汚れに相当する汚れを短期間で再現できるよう、水を加えて混ぜた有明粘土(写真 - 1.6.7)を用いて計測面に意図的に汚れを入れた。

実験では、まず初期画像をスキャニングする。その後、表面に有明粘土を塗ることにより汚れを入れた。有明粘土が完全に乾いたところで洗剤とスポンジを使用し洗い流した。洗い流した面が完全に乾かした後、再度スキャニングした。この工程を計 10 回繰り返して行った。各回において 3 枚ずつスキャニングし、ひずみを求めて、汚れによる誤差を算出し検討した。



写真 - 1.6.7 有明粘土

②実験結果

現場を想定したスキャニング対象物表面の汚れによって生じる誤差についての検討を行った。計測対象面に汚れを入れ、洗い流した後スキャニングして得られた結果を表 - 1.6.3 に示す。1 回目と 4 回目においては誤差が少々大きく出ているが、その原因として汚しを入れた部分の洗浄がしっかりできていなかったことが考えられる。7 回目以降では、徐々に誤差が生じる結果となっているがその値小さく、また、今回の汚れが比較的強めの汚れを想定したものであることを考慮すると、計測では計測面の洗浄を十分に行えば、問題のないデータが取得できることを確認した。

表 - 1.6.3 汚れの影響による結果

比較画像	組み合わせ	ひずみ μ	(絶対値)平均 ひずみ μ				
初期画像	①-②	1.1	0	比較画像	組み合わせ	ひずみ μ	(絶対値)平均 ひずみ μ
	①-③	-0.5					
	②-③	-1.5					
初期画像 -1回目	①-①	-21.2	-19	初期画像 -6回目	①-①	-2.2	-2
	①-②	-20.1			①-②	-1.5	
	①-③	-17.8			①-③	-1.1	
	②-②	-20.9			②-②	-2.6	
	②-③	-18.6			②-③	-2.3	
	③-③	-15.5			③-③	-0.1	
初期画像 -2回目	①-①	-8.7	-4	初期画像 -7回目	①-①	-8.5	-14
	①-②	-4.6			①-②	-16.2	
	①-③	-1.1			①-③	-14.8	
	②-②	-5.5			②-②	-16	
	②-③	-2.1			②-③	-16.2	
	③-③	-0.1			③-③	-14.6	
初期画像 -3回目	①-①	-1.4	-2	初期画像 -8回目	①-①	10.6	17
	①-②	-1.1			①-②	13.6	
	①-③	-1.5			①-③	16.1	
	②-②	-2.1			②-②	14.4	
	②-③	-2.5			②-③	15.3	
	③-③	-0.7			③-③	29.2	
初期画像 -4回目	①-①	-18.3	-17	初期画像 -9回目	①-①	10.6	21
	①-②	-20.1			①-②	-22.9	
	①-③	-17.8			①-③	-53.8	
	②-②	-16.5			②-②	-6.5	
	②-③	-14.2			②-③	120.7	
	③-③	-12.1			③-③	79.7	
初期画像 -5回目	①-①	0.2	1	初期画像 -10回目	①-①	82.8	37
	①-②	1			①-②	-13.2	
	①-③	1.7			①-③	-2.5	
	②-②	-0.2			②-②	-15.6	
	②-③	0.5			②-③	-18.7	
	③-③	2.1			③-③	186.8	

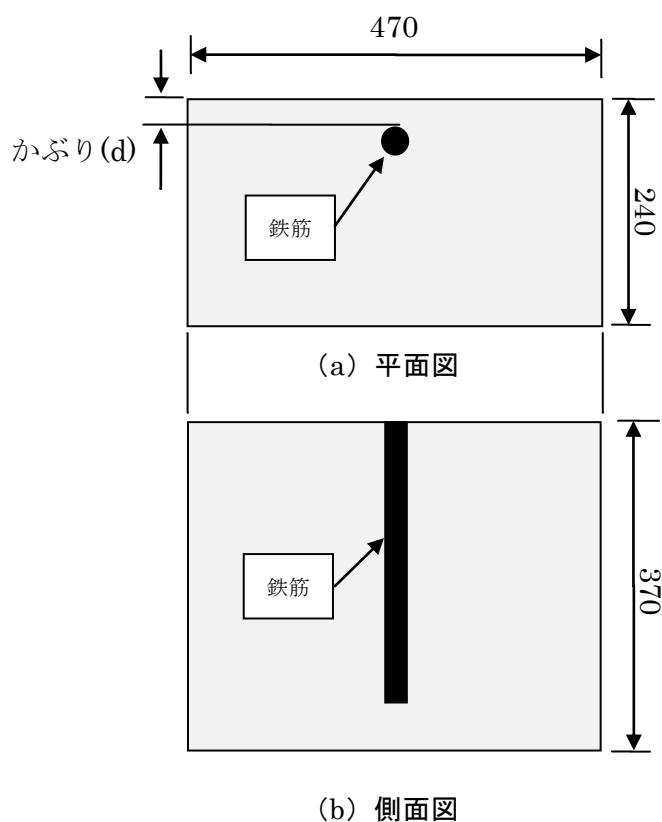
4) 鉄筋の腐食位置予測の室内実験

開発したモニタリング装置を用いて、鉄筋腐食によるひび割れ発生位置を予測できるかの検討を行った。具体的には、電食により鉄筋を腐食させ、コンクリート表面に発生するひびきをモニタリング装置で計測し検証した。

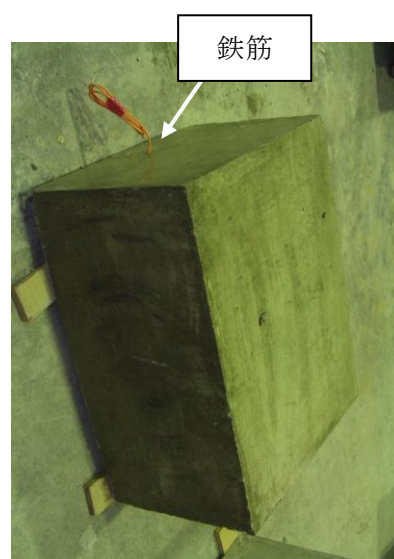
①実験概要

イ. 試験体

試験体の形状は、図－1.6.5 および写真－1.6.8 に示すように 370×470×240mm である。コンクリートは、土木構造物でよく用いられる呼び強度 24N/mm² のものを採用した。試験体の内部には、土木構造物で使用実績が多い D25 の異形鉄筋を配置した。なお、異形鉄筋は、10%クエン酸二アンモニウム溶液で黒錆を除去した後に埋設した。



図－1.6.5 試験体 * 単位 : mm



写真－1.6.8 試験体

ロ. 実験ケース

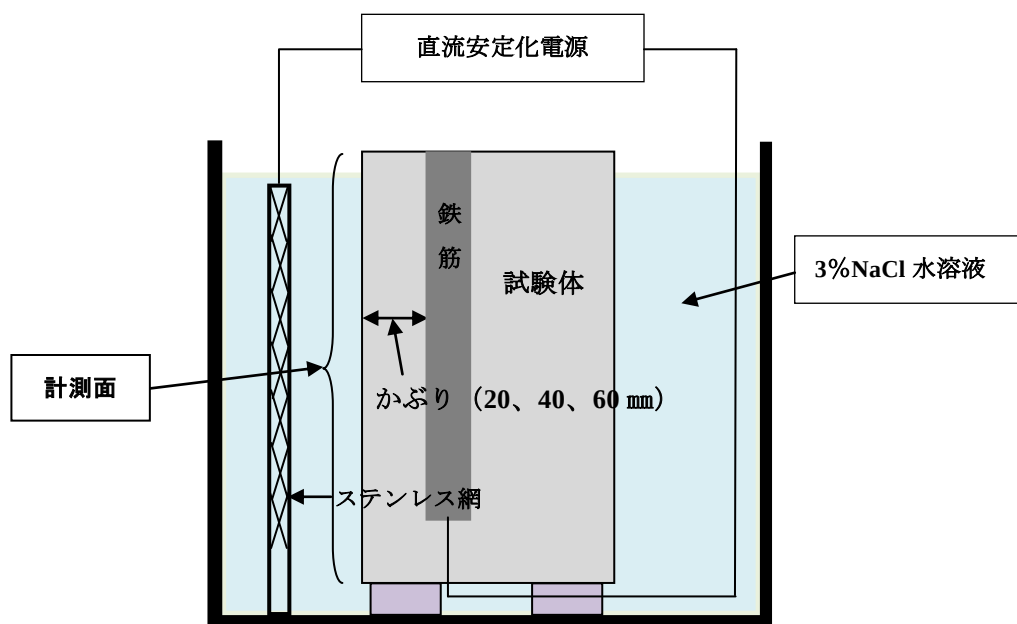
実験では表－1.6.4 に示すように、かぶりを変化させて検討を行った。

表－1.6.4 実験ケース

No.	鉄筋径	かぶり
1	D25	20mm
2		40mm
3		60mm

ハ. 電食方法

電食は、図－1.6.6 に示すように 3%NaCl 水溶液に試験体を浸漬し、鉄筋とステンレス網に直流電源を接続し鉄筋を腐食させた。



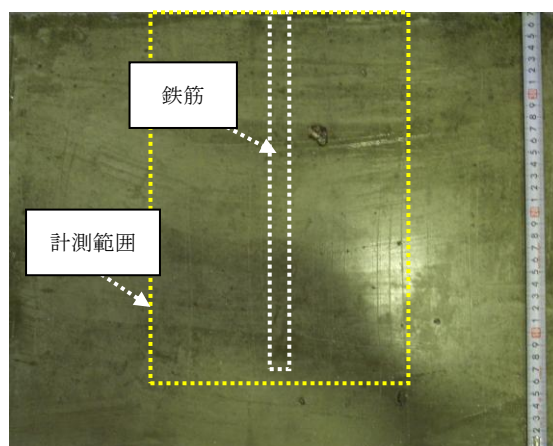
図－1.6.6 電食概要図

ニ. 計測方法

計測では、図－1.6.6 の試験体の計測面を上にして、計測面を覆う水分をスポンジ等で除去し乾燥していない状態で、写真－1.6.9(a)のようにモニタリング装置を試験体に設置してスキヤニングを行った。計測では、写真－1.6.9 (b) のように鉄筋が中央になるようにモニタリング装置をセットした。



(a) 計測状況



(b) 計測範囲

写真－1.6.9 計測

②実験結果

電食実験において、電食開始から経過時間毎の計測面の主ひずみのコンター図を図－1.6.7～1.6.9に示す。凡例においてプラスは引張ひずみであり、マイナスは圧縮ひずみを示す。引張ひずみの上限は $1,800\mu$ 、圧縮ひずみの上限値は 200μ に設定した。なお、凡例の左側に表示されている折れ線は各ひずみの階級の度数分布を表している。図中の黒色実線は、画像から目視で観察したひび割れ発生位置を示している。また、図の(a)～(f)は電食開始からの時間を示している。なお、写真－1.6.10に、一例としてかぶり 20mm の撮影画像の一部を示す。

図－1.6.7のかぶり 20mm の場合、(b)の 69 時間後の時点で、図中央上の部分に引張ひずみが集中した黄色の部分が表示されている。(c)の 138 時間後でその黄色の部分が赤色になり、引張ひずみが大きくなっているのがわかるが、この時点ではまだひび割れは発生していない。その後(d)の 186 時間後、赤色になった引張ひずみが集中した位置の一部にひび割れが発生している。続いて、(e)の 210 時間後および(f)233 時間後では、赤色の引張ひずみが集中している線状の位置で、ひび割れが成長しているのが分かる。この傾向は、図－1.6.8のかぶり 40mm および図－1.6.9のかぶり 60mm にも観察できる。

以上より、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れは、黄色⇒赤色⇒ひび割れの順番で発生している傾向があった。すなわち、今回の実験の範囲では、開発したモニタリング装置を用いれば、鉄筋の腐食によるひび割れが発生する前に、その位置が予測できることが分かった。

ひび割れが発生する前の黄色、赤色は、これまでは観察できなかった、表－1.6.5に示す進展期に分類される。モニタリング装置を用いれば加速期の入る前に対策を実施することが可能になり、構造物の長寿化に大きく貢献できるものと考えられる。参考までに、進展期における補修工法を表－1.6.6に示す。

表－1.6.5 塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の外観上のグレードと劣化の状態¹⁾

構造物の外観上のグレード	劣化過程	劣化の状態
グレード I	潜伏期	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
グレード II	進展期	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始
グレード III-1	加速期前期	腐食ひび割れや浮きが発生、さび汁が見られる
グレード III-2	加速期後期	腐食ひび割れの幅や長さが大きく多数発生、腐食ひび割れの進展に伴うかぶりコンクリートの部分的な剝離・剥落が見られる、鋼材の著しい断面減少は見られない
グレード IV	劣化期	腐食ひび割れの進展に伴う大規模な剝離・剥落が見られる、鋼材の著しい断面減少が見られる、変位・たわみが大きい

表－1.6.6 構造物の外観上のグレードとそれに対応する補修工法の選定方針の例¹⁾

構造物の外観上のグレード	劣化過程	構造物の要求性能ごとの対策方針【 】は標準的な工法例を示す			
		安全性	使用性(たわみや振動等)	第三者影響度	美観
グレードⅠ	潜伏期	塩化物イオンの浸透量の低減【表面処理】			
グレードⅡ	進展期	塩化物イオンの浸透量の低減・除去、鋼材の防食 【表面処理】、【脱塩】、【電気防食】、【断面修復】 ※断面修復や脱塩に際し、表面処理を併用することもある。			
グレードⅢ-Ⅰ	加速期前期	塩化物イオンの除去、鋼材の防食 【断面修復】、【脱塩】、【電気防食】 ※断面修復や脱塩に際し、表面処理を併用することもある。		剥落防止 【たたき落し】 【断面修復】 【剥落防止ネットの設置】 ※断面修復に際し、表面処理を併用することもある。	美観の回復 【断面修復】 ※断面修復に際し、表面処理を併用することもある。
グレードⅢ-Ⅱ	加速期後期	耐力、剛性の回復等 【断面修復】 ※断面修復に際し、表面処理を併用する場合や、鋼材の増設・交換を行う場合もある。 ※プレストレストコンクリート構造物(部材)の場合は、断面修復に加えて、電気防食を併用する場合もある。			
グレードⅣ	劣化期	耐力、剛性の回復等 【断面修復+鋼材の増設や交換】 ※断面修復に際し、表面処理を併用することもある。 ※上記以外に、連続繊維接着、外ケーブル、巻立て、増厚等による場合もある。			

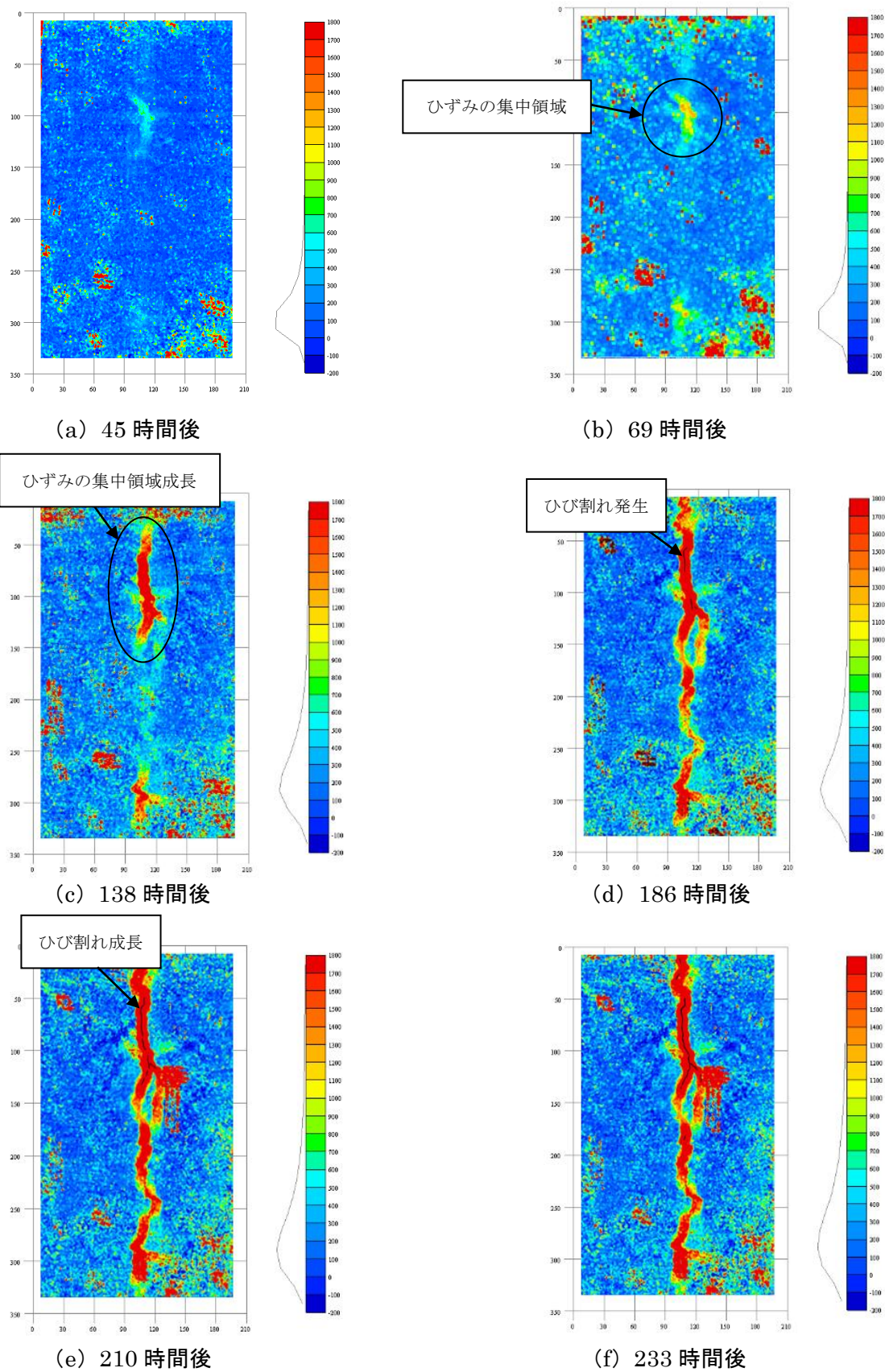
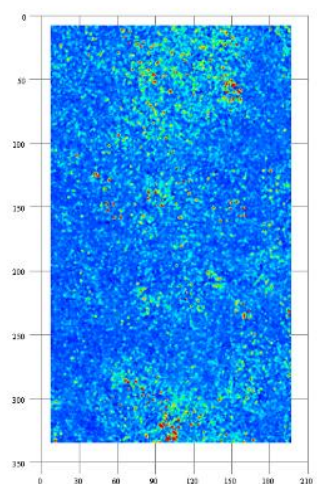
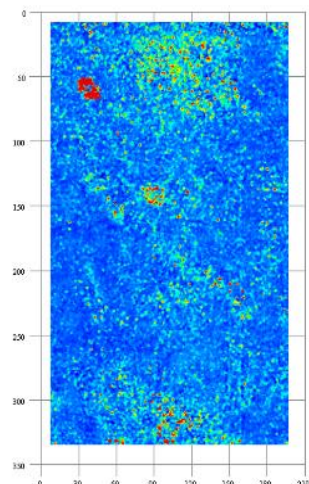


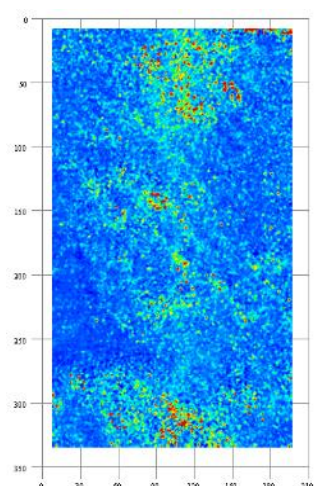
図-1.6.7 かぶり 20mm のコンター図



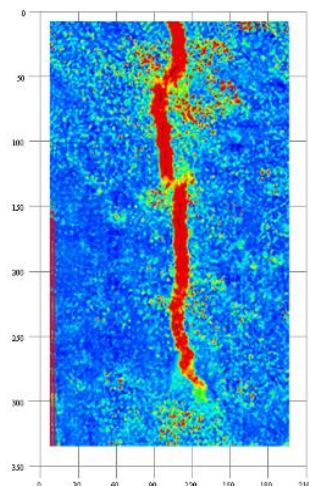
(a) 263 時間後



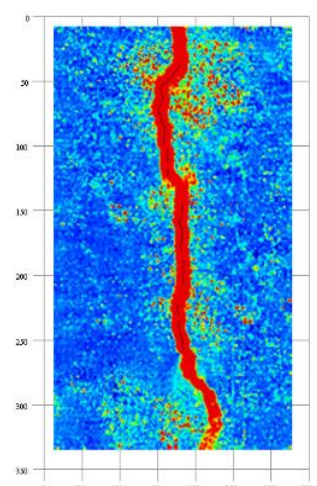
(b) 287 時間後



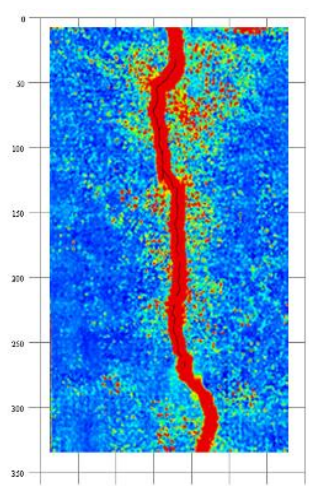
(c) 310 時間後



(d) 359 時間後



(e) 384 時間後



(f) 407 時間後

図-1.6.8 かぶり 40mm のコンター図