

# 論文 RC 床版に発生する水平クラックの要因に関する基礎研究

松田 伸隆\*1・武田 三弘\*2

**要旨:** 本研究では、道路橋の鉄筋コンクリート床版（以後、RC 床版）に発生する砂利化現象の要因に関する検討を行ってきた。砂利化が起きている床版では、上端筋周辺に水平クラックが発生していることが多いことから、このひび割れが砂利化の要因の一つであると考え、発生要因の検討を行った。実験では、アスファルト舗装面が直射日光により 60°C程度まで上昇する条件が続く条件で繰り返し載荷を受けた場合、RC 床版上面部は乾燥収縮およびクリープが大きくなることで、上端筋とのひずみの差が大きくなり、水平クラックが発生しやすい条件になることを確認することが出来た。

**キーワード:** RC 床版, 砂利化現象, 水平クラック, 表面温度, 疲労

## 1. はじめに

近年、アスファルト舗装下の RC 床版上層部において、コンクリートが劣化する現象が生じている。この劣化現象は、アスファルト舗装上面からはその現象を確認することは難しいが、アスファルト舗装を剥がすとコンクリート床版上層部が砂利のように多孔質化している現象である。

現在砂利化が発生する要因として、車両による輪荷重、凍結融解作用、アルカリシリカ反応、雨水の浸入、凍結防止剤による鋼材腐食、大型車両による過積載等これらが単独または複合的に作用して発生するものと考えられているが、この発生メカニズムについては不明な点が多い状況である。また、砂利化が生じている箇所の床版を調べた場合、上端筋の周辺に水平クラックが数多く発生しているのが確認されているが、この水平クラックが砂利化にどの様に拘わっているのか現状では解明に至っていない。

そこで本研究では、床版上端筋周辺に発生する水平クラックが砂利化の引き金として作用している可能性が考えられたため、まずは水平クラックが発生する条件について検討を行い、再現実験を行うこととした。

水平クラックの発生要因はさまざま考えられるが、本研究では夏場の直射日光によるコンクリート表面温度上昇による乾燥収縮と、通行車両の繰り返し荷重に着目した。夏場のコンクリート床版上面部の温度は、アスファルトの影響で 60°Cを超える程度まで上昇する。この時コンクリートは乾燥により収縮し、内部の上端筋は熱で膨張するため、両者には相反する応力が作用することになる。この作用により、水平クラックの発生に影響を与えている可能性が考えられた。また、その状況下にある床版に通行車両による繰り返し荷重が加わった場合、温度履歴による乾燥収縮と繰り返し荷重によるクリープの増大は、

上端筋とのひずみの差を増大させ、水平クラック発生に影響を及ぼしている可能性が考えられた。

その為、これらの要因が水平クラックの発生に及ぼす影響を調べるため、床版を想定した大型の梁型供試体を作製し、温度履歴および疲労荷重によって、コンクリートおよび上端筋のひずみがどの様に変化するのか実験的に確認を行った。

## 2. 温度履歴を受ける供試体のひずみ挙動

### 2.1 供試体概要

コンクリート床版表面部が高温状態になった時のコンクリートおよび上端筋のひずみの状況を確認するため床版を想定した小型の RC 供試体 (300mm×300mm×220mm) を 1 体作製した。図-1 は、RC 供試体の配筋例を示したものである。また、比較のため同寸法の無筋供試体も 1 体作製した。表-1 は、実験に使用したコンクリートの配合を示したものである。また、上端筋とコンクリートのひずみの変化を確認するため、図-1 に示す両端の上端筋中央部両側面に短軸ひずみゲージを、上端筋中央部直上 (上面から 25mm) の位置にコンクリートのモールドひずみゲージを取り付けている。

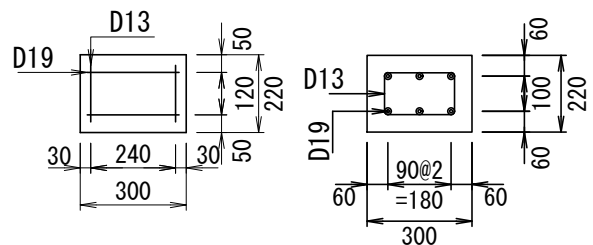


図-1 供試体配筋図

\*1 東北学院大学大学院 工学研究科 環境建設工学専攻 (学生会員)

\*2 東北学院大学 工学部 環境建設工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表－1 供試体配合

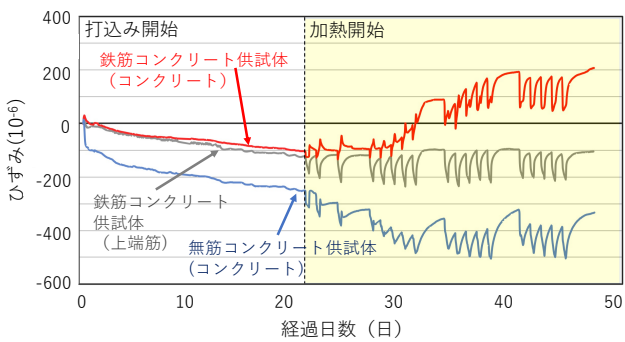
G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AE剤
20	9.2	60	4.4	45.2	180	300	789	992	1.67

2.2 実験方法

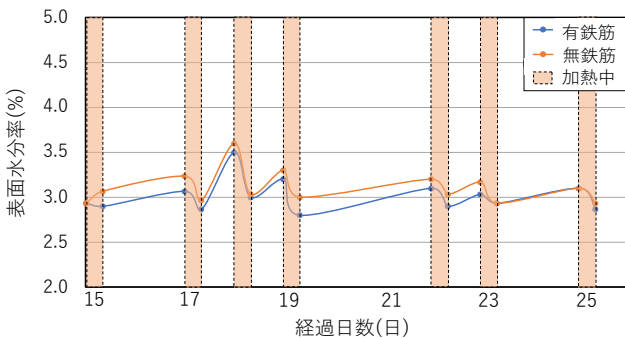
実験では、供試体上面 (300×300mm) に対してニクロム線ヒーターを用いて加熱サイクルを行った。加熱温度は夏場の直射日光を想定したコンクリート表面温度 60℃とし、加熱時間を 8 時間、ヒーターを止めてからの自然冷却 (室温の平均値 22.3℃) を 16 時間とし、この 24 時間を 1 サイクルとして 18 サイクル実施した。また、供試体打設後からひずみを計測し、打設硬化後と、加熱サイクル期間中の各部材のひずみの変動を調べた。また、合わせてコンクリート表層の水分率を低周波交流電界式の水分計を用いて測定した。なお、測定時における温度校正は行っていない。

2.3 実験結果

図－2 は、供試体の打設後から加熱サイクルまでの各ひずみの経時変化である。打込み開始から加熱開始前までは、いずれのひずみも乾燥収縮の影響により圧縮側にひずみが増加する結果となったが、無筋コンクリートが特にその傾向が大きかった。加熱開始以後は、無筋コンクリート供試体のひずみは、表面温度上昇時は圧縮側に大きくなり、表面温度下降時は引張側に推移しており、再加熱までの間隔が空くと引張側に推移する量が大きくなる傾向がみられた。



図－2 打込みから加熱サイクルまでのひずみ経時変化



図－3 供試体表面の水分率の経時変化

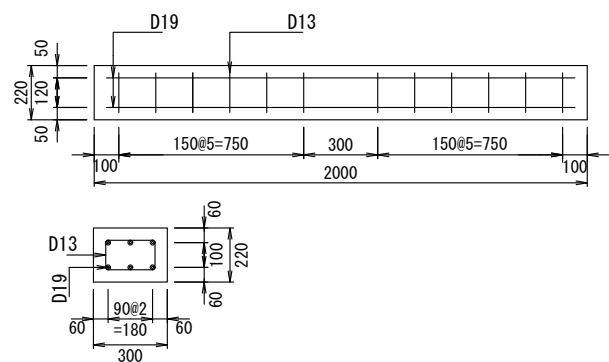
他方、RC 供試体においては、打込み開始から加熱開始前までは、無筋コンクリートと同様の傾向が見られたが、各ひずみの大きさは無筋コンクリートの結果の半分程度であった。しかし、加熱開始以後は、上端筋とコンクリートのひずみは相反する挙動を示しながらも、上端筋のひずみは加熱サイクルによる変化以外ほぼ一定であるが、コンクリートのひずみは引張側に大きく推移する傾向が見られた。これは熱による上端筋の膨張が、コンクリートの乾燥収縮により拘束されたためにこのような挙動が見られたものと思われる。この傾向は、サイクル数が増えるに従い、より顕著になりコンクリートのひずみは最終的には引張となることが分かった。

図－3 は供試体表面の水分率の経時変化である。加熱時、供試体表面の水分率が低下し、加熱を行っていない期間は水分率が上昇していることがわかる。この結果から、図－2 中のコンクリートの圧縮側へのひずみの増加は、加熱によるコンクリートの乾燥収縮によるものであり、引張側へのひずみの増加は大気中の水分の吸収による影響と考えている。なお、試験室内の湿度は約 60～70%の間で推移しており、結露の発生は認められなかった。

3. 温度履歴を受ける供試体のひずみ挙動

3.1 供試体概要

RC 床板上面が高温状態のままに輪荷重を受ける状況を再現するため、図－4 に示す梁型の RC 供試体 (普通 24-12-20N 使用、寸法 300×220×2000mm) を作製した。表－2 に実験で使用したコンクリートの配合を示す。また、梁供試体中央部に 2.1 と同様の位置にひずみゲージを取り付けている。



図－4 梁型供試体配筋図

表－2 供試体配合

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AE剤
20	12	54	4.8	44.7	164	304	809	1048	3.04

3.2 実験方法

表面の加熱は、供試体中央部の上面 (300×300mm の範囲) を 2.2 に示す方法で行った。載荷方法はスパン 1800mm

の単純梁中央点荷重とし、荷重面は 300×300 の面荷重とした。荷重荷重は、供試体の終局耐力 99.3kN の約 30% である 30kN（曲げひび割れ発生荷重は 12.9kN）とし、(1) 加熱を行わない状態での荷重（基準荷重）、(2) 表面温度 60 °C の状態における荷重（1 回加熱荷重）および(3) 表面温度 60°C 加熱～自然冷却を 6 サイクル行った後、再度 60°C まで加熱した状態で荷重（7 回加熱荷重）の 3 パターンで行った。また、荷重荷重 5kN 毎に上端筋・コンクリートのひずみを測定した。

### 3.3 実験結果

図-5 は、梁型供試体の加熱サイクルにおけるひずみの経時変化を示している。2.3 の結果と同様に、コンクリートのひずみは、表面温度上昇時は引張側に变化し、下降時は圧縮側に推移した。上端筋のひずみは、表面温度上昇時は圧縮側に变化し、下降時は引張側に推移する、コンクリートとは真逆の挙動となった。この一連の変状から、RC 供試体は表面に 60°C 程度の加熱を受けると、内部でコンクリートのひずみは引張、上端筋のひずみは圧縮側に推移し、両者の間で相反するひずみが生じ、両者の差は広がる傾向になることがわかった。

図-6、図-7 は、3.1 の梁型供試体における(1)、(2)および(3)の条件における荷重とコンクリートおよび上端筋のひずみとの関係を示したものである。終局耐力の 30% 荷重である 30kN 時のひずみは、加熱前の基準荷重に対して、加熱 1 サイクル後のひずみは約 1.5 倍に、加熱 7 サイクル後のひずみは約 3.5 倍となり増大した。同様に上端筋のひずみも基準荷重に対して約 1.3 倍、約 1.6 倍と増加したが、相対的にはコンクリートより小さな変化となった。コンクリートも上端筋も共に加熱されることによって荷重時によるひずみは増大し、加熱が繰り返されるとその差は大きくなることがわかった。なお、この差の要因として鉄筋の滑りも考えられるが、今後検討予定である。

コンクリートの圧縮ひずみが大きく増大した要因には、クリープと乾燥収縮の影響が考えられる。コンクリートのクリープひずみは、乾燥しているほど、温度が高いほど大きくなることが既往の研究<sup>3),4)</sup>により明らかになっている。また、2.3 の結果より、コンクリートは加熱の繰り返しによって高温の影響と同時に乾燥の影響が与えられ、圧縮ひずみが増大することが明らかとなっている。コンクリート上層部のひずみは、加熱の繰り返しによって与えられる高温と乾燥の影響ですでに圧縮傾向にあり、そこに荷重荷重がかかることで、加熱がされていないコンクリートに比べ圧縮ひずみが大きくなったと考えられる。

上端筋の圧縮ひずみ増大の要因は、コンクリートの圧縮ひずみが増大した影響を受けたためと考察する。2.3 の結果より、上端筋はコンクリートの圧縮を受けて圧縮ひずみが発生していると考えている。加熱の繰り返しのよりコ

ンクリートの圧縮ひずみが増大したことに伴い、上端筋も圧縮ひずみが増大したと考える。

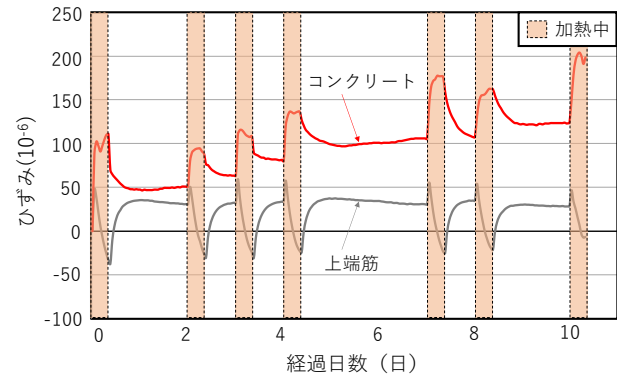


図-5 梁型供試体における加熱によるひずみ経時変化

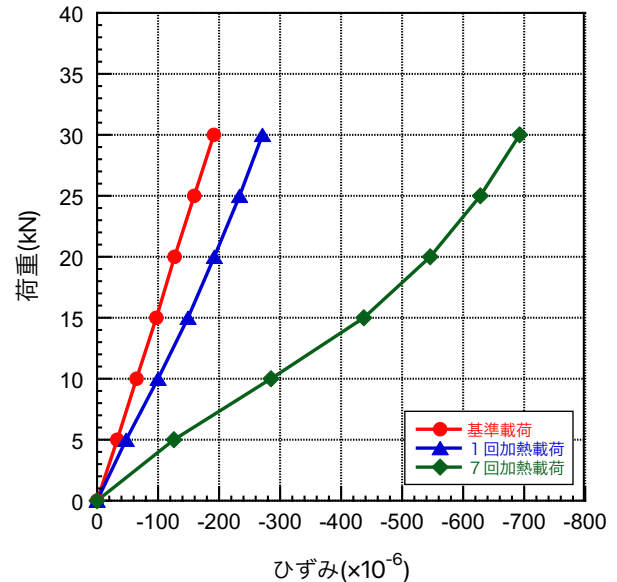


図-6 荷重荷重とコンクリートひずみとの関係

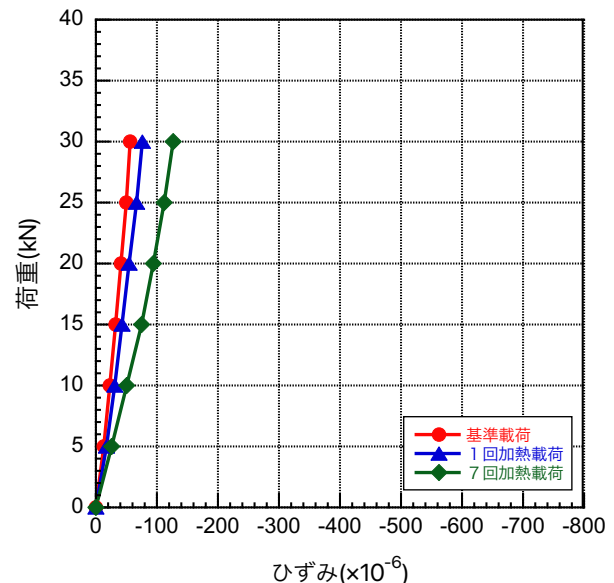


図-7 荷重荷重と上端筋ひずみとの関係

#### 4. 温度履歴および繰返し荷重を受ける供試体のひずみ挙動

##### 4.1 実験方法

温度履歴および繰返し荷重の影響を確認するため、3.1 と同一の供試体を用いて、加熱の繰返しと疲労試験を行った。加熱方法に関しては2.2, 3.2 に示す方法と同様である。疲労試験については構造物動的荷重装置を用い、荷重荷重は供試体の終局耐力の30%荷重、周波数は2Hzとした。なお、8時間の加熱と16時間の自然冷却中の10万回の疲労試験を1サイクルとして16サイクル実施した。また、各サイクルの加熱終了直後と、疲労試験終了直後に供試体の終局耐力30%まで静的に荷重をかけ、5kN毎に上端筋・コンクリートのひずみを測定した。

##### 4.2 実験結果

図-8, 図-9 は、各サイクルの加熱終了直後に行った静的荷重による荷重とコンクリートおよび上端筋のひずみとの関係を示したものである。コンクリートの圧縮ひずみは基準荷重と比較すると、3.3の結果と同様にサイクルを重ねる毎に増大する結果となった。しかし14サイクルを超えてあたりで増大量は収束する傾向が見られた。また、加熱のみを与えていた3.3の結果と比較すると、圧縮ひずみはより増大していることがわかる。このことから加熱に加え、疲労の影響が加わることでコンクリートはより大きな圧縮ひずみが生じることが分かった。一方上端筋のひずみはサイクルを重ねることで圧縮方向に増大しているがその増大量はコンクリートと比べ非常に小さく、サイクルを重ねることでコンクリートとの間に大きなひずみの差が生じるという結果となった。この結果からコンクリートでは、加熱及び繰返し荷重によるクリープの増加と乾燥収縮の影響によって圧縮ひずみが増大するのに対し、上端筋ではコンクリートの変形による拘束を受け、圧縮ひずみがやや増大するが、コンクリートほどではないため、両者の間でひずみの差がより開いていくものと考えられる。なお、3.3同様鉄筋とコンクリートのすべりの影響については今後検討予定である。

図-10, 図-11 は、各サイクルの疲労試験終了直後に行った静的荷重によるコンクリート及び上端筋のひずみと荷重の関係を示したものである。コンクリート及び上端筋共にサイクルを重ねる毎に圧縮ひずみは増大しているが、加熱終了直後の結果と比較するとひずみの増大幅は小さくなる結果となった。これより、コンクリートにおいては繰返し荷重による疲労以上に、加熱による高温状態と乾燥が、圧縮ひずみ増大に大きな影響を及ぼしている可能性があると考えられる。また上端筋に関しては、コンクリートの変形による拘束が加熱時よりも小さいため、圧縮ひずみが小さくなったと考える。

また、試験開始後4サイクルを超えたところで、梁側面

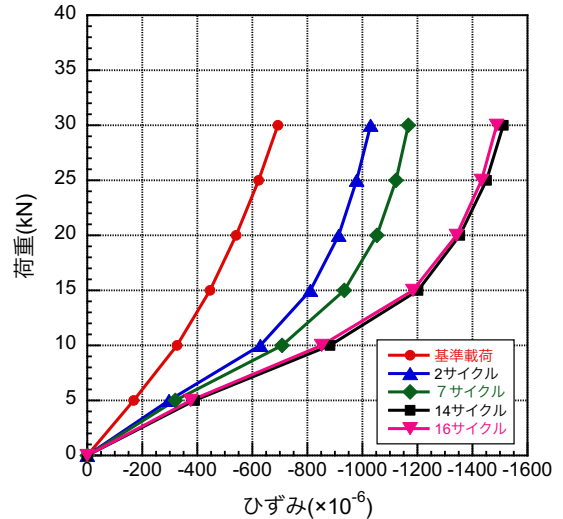


図-8 載荷荷重とコンクリートひずみとの関係 (加熱終了直後)

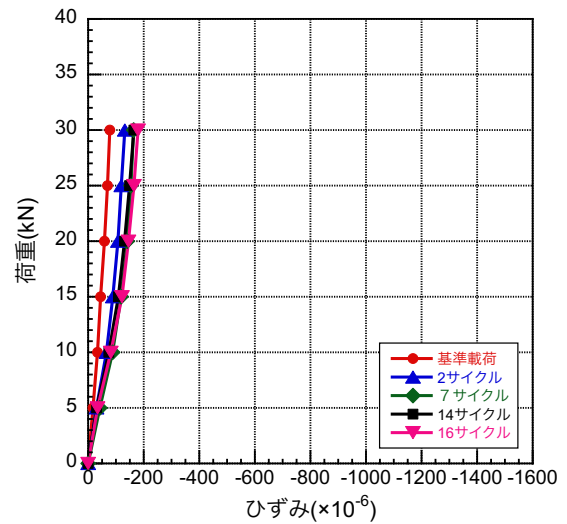


図-9 載荷荷重と上端筋ひずみとの関係 (加熱終了直後)

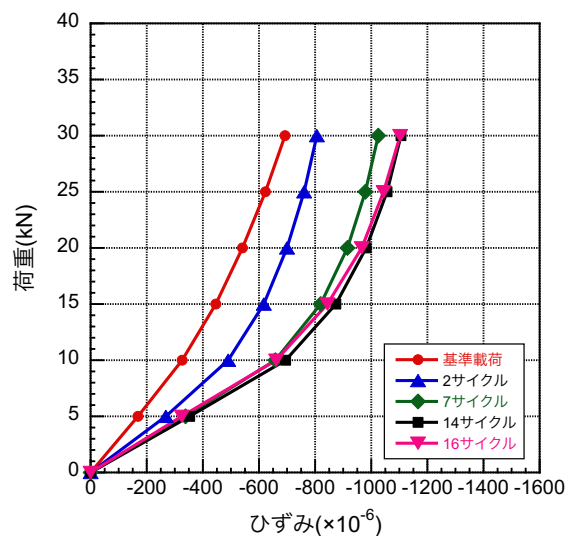


図-10 載荷荷重とコンクリートひずみとの関係 (疲労終了直後)

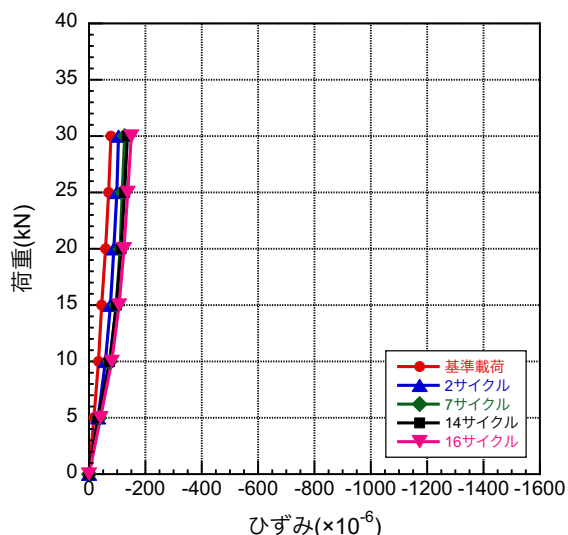


図-11 載荷荷重と上端筋ひずみとの関係  
(疲労終了直後)

中央部、端部から 1000mm の上端筋部に沿った位置で水平状のひび割れが目視で確認できた。ひび割れ幅は 0.05mm であり、その後の幅の進展は確認できなかった。ひび割れの長さはサイクルを重ねる毎に徐々に伸びていき、コンクリートの圧縮ひずみの増大が収束した時点で同時に伸びも収束した。結論として、表面温度上昇の繰り返しと繰り返し荷重が同時に作用することが、RC 床版上端筋周辺に水平クラックを発生しやすい条件を生み出しているのではないかと考えている。

## 5. X線造影撮影法によるひび割れの評価

### 5.1 実験方法

4.2 において発生したひび割れの連続性を評価するために X 線造影撮影法<sup>5)</sup>を用いたひび割れの検出を行った。撮影は、供試体側面から水平状のひび割れが確認できた箇所を中心に φ100mm のコアを採取し、湿式ダイヤモンドカッターを用いて、表層から厚さ 5mm、それ以降は上端筋部分を除き厚さ 10mm の円板状にスライスしたものを採取し、スライスされた供試体をコンクリート用に開発された造影剤<sup>5)</sup>に 1 時間浸漬し、X 線フィルムにて検出を行った。なお、造影剤は X 線を透過しにくくする性質があるため、造影剤が浸透した箇所は画像上で白く写る。造影剤が浸透し、白く写った箇所がひび割れや空隙として評価される。

### 5.2 実験結果

写真-1 は、表層から 1 枚目、供試体側面の表面にあたるスライスの透過画像である。写真中の矢印がひび割れとなる。円盤状のスライス中央から左方にかけて、水平状のひび割れが確認できた。この位置のひび割れは目視で確認できたひび割れ箇所と一致していたため、同一のひび割れであり、画像上でも検出が可能であると判断した。

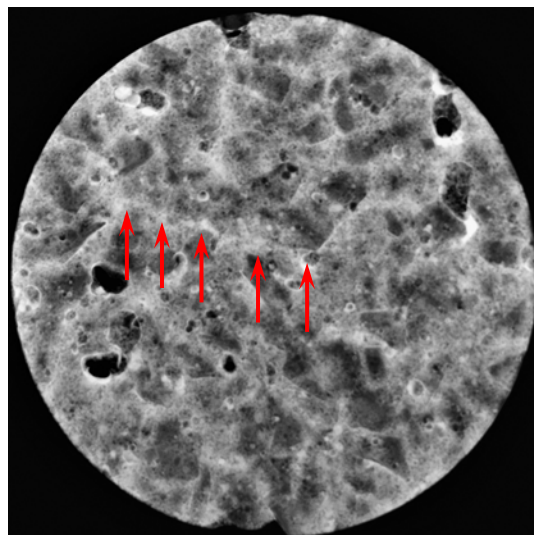


写真-1 表層 1 枚目の X 線造影撮影結果



写真-2 表層 2 枚目の X 線造影撮影結果

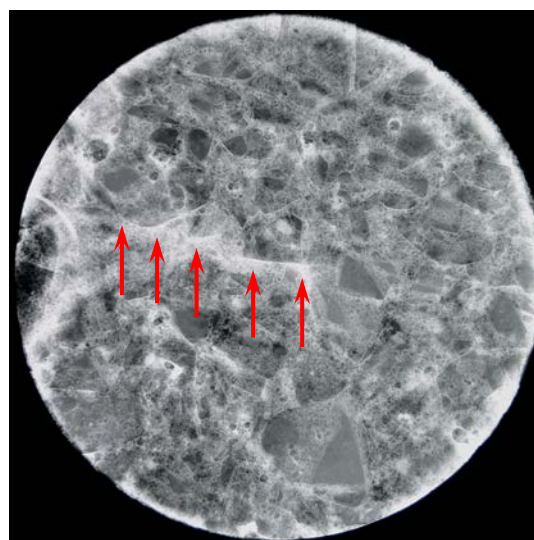


写真-3 表層 3 枚目の X 線造影撮影結果

写真-2, 写真-3 は, 表層から 2 枚目, 3 枚目のコンクリート内部にあたるスライスの透過画像である。どちらにも写真-1 と同様のひび割れが確認できた。このことからこの水平状のひび割れは奥行き方向に連続性があると言える。また, 上端筋を介した奥行き方向のスライスにはこのひび割れは確認できなかった。このことからこのひび割れは上端筋からコンクリート側面にかけてのかぶり区間に発生したものと考えられる。

一連の結果から, このひび割れのメカニズムとしては, 加熱と繰り返し荷重の影響によるコンクリートと上端筋のひずみの差により供試体内部でせん断応力が発生し, ひび割れを生じたものと考えられるが正確なメカニズムについては現在も検討中である。ひび割れはコンクリートの脆弱な箇所に向かい進展する。この供試体において供試体上部は荷重による拘束があるため, 側面のかぶり方向にひび割れが生じたものと考えられる。このひび割れが今後進展して, 劣化した床版に生じているいわゆる水平クラックと呼べるものになりうるのか検討を行う予定である。

## 6. まとめ

本実験では, 道路橋の RC 床版に発生する水平クラックの要因について, 直射日光による表面温度, 通行車両による載荷荷重および繰り返し荷重による疲労が与える影響を調べるため, 再現実験を行った。本実験の範囲内で以下のことが言える。

1. コンクリート表面に 60℃の加熱実験を行ったところ, 無筋コンクリート供試体の場合, コンクリートのひずみは, 表面温度上昇時は乾燥収縮により圧縮側に大きく推移し, 下降時は大気中の水分の吸収により引張側に推移することがわかった。他方, RC 供試体の場合, 温度上昇時コンクリートは引張側に, 上端筋は圧縮側に推移し, 両者の間でひずみの差が生じる結果となった。この要因としてコンクリートの乾燥収縮と上端筋の熱膨張が同時に作用することで, 両者の間に相反するひずみが生じたためにこのような結果になったものと思われる。
2. RC 供試体の表面が加熱の繰り返しを受けた状態で荷重を受けると, コンクリートの圧縮ひずみは加熱を繰り返すほど増大することがわかった。要因として乾燥収縮とクリープの増大が示唆された。一方上端筋の圧縮ひずみは, 加熱により増大するがコンクリートと比較すると非常に小さいことがわかった。これはコンクリートが乾燥収縮の影響によりひずみが増大したのに対して, 上端筋のひずみは, コンクリートによる拘束の影響を受けたためであると考えられる。また, 加熱が繰り返され, 荷重が加わると両者

のひずみの差は増大することが確認できた。

3. RC 供試体表面の加熱の繰り返しおよび荷重の繰り返しを行ったところ, コンクリートの圧縮ひずみは, 加熱の繰り返しのみより増大する結果となった。一方上端筋はひずみの増大量が小さいため, 結果としてコンクリートとの差が大きく広がる結果となった。また, 荷重時の圧縮ひずみについて, 疲労終了直後も加熱終了直後の荷重の方が大きい結果となった。これより繰り返し荷重による疲労以上に, 加熱による高温環境下の荷重が, 圧縮ひずみ増大に大きな影響を及ぼしている可能性があると考えられる。この試験により, 供試体側面に水平クラックと思われるひび割れが確認され, コンクリートの加熱と繰り返し荷重が同時に作用する条件が, 水平クラックの発生要因となっている可能性が示唆された。
4. 加熱および繰り返し荷重により発生したひび割れを X 線造影撮影法により解析した結果, 供試体側面表層部から奥行き方向, 上端筋にかけて連続した水平状のひび割れが検出された。この結果から加熱と繰り返し荷重によりコンクリートと上端筋のひずみの差が開くことで, 荷重による拘束を受けている供試体上部ではなく側面のかぶり方向に水平状のひび割れが生じたものと考えている。今後はこのひび割れが水平クラックと呼べるものに進展するのかが荷重方法も含め検討して行きたいと考えている。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり, 仙台コンクリート試験センター株式会社にご多大なるご協力をいただいた。また, 同研究室の北林哲也氏, 大場峻聖氏, 小野真英氏, 釜谷哲平氏には多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 村越潤, 田中良樹: 道路橋 RC 床版の劣化形態の多様化と防水対策, 土木施工, 55-6, pp. 68-71, 2014.6
- 2) 吉田長裕, 西村昂, 日野泰雄: 舗装材の表面特性と表面温度の関連性に関する実験的研究, 環境技術, 2000 年 29 巻 7 号, pp. 560-568, 2000
- 3) G. E. Troxell, J. M. Raphael and R. E. Davis: Long term-creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete. Proc. ASTM, 58, pp. 1101-1120, 1958
- 4) A. M. Neville, W. H. Dilger and J. J. Brooks: Creep of concrete. pp. 165-167, North-Holland, 1983
- 5) 武田三弘, 大塚浩司: X線造影撮影によるコンクリート強度の推定, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.376-384, 2006