

論文 火害を受けたコンクリート床版の耐疲労性状評価

富山 隆彦*1・阿久津 裕亮*2・子田 康弘*3・小澤 満津雄*4

要旨: 本研究では、火害を受けたコンクリート床版の耐疲労性状を評価する基礎資料を得ることを目的として、上面加熱と下面加熱を実施し①静的載荷試験と②疲労試験を実施した。その結果、静的載荷試験では加熱有は無しと比べて最大荷重が 25%程度低下した。加熱損傷を受けたコンクリート床版の静的載荷試験の最大荷重と疲労試験の破断繰返し数の関係を考察し、近似式を求めた。今回の関係から、静的載荷試験の結果より、破断繰返し数を推定できる可能性があることがわかった。また、加熱時間の長さによって、破断繰返し数にも差異が生じることが分かった。

キーワード: コンクリート床版, 静的載荷試験, 疲労試験, ISO834 加熱曲線

1. はじめに

社会資本の維持管理の観点から道路橋コンクリート床版(以下、コンクリート床版)の耐久性と耐力の評価を行うことは非常に重要である。これまでに床版の耐久性と耐疲労性状を評価した事例は種々の報告がある¹⁾²⁾³⁾。一方、火災損傷を受けた床版の耐力に関する研究事例はあるが⁴⁾、耐疲労特性に関するものは少ない。火害を受けるとコンクリート部材は、セメントの水和生成物が熱分解を生じ、表面および内部に微細ひび割れが発生する。拘束条件によってはコンクリート表面が爆発的に剥離・剥落する爆裂現象を生じることがある⁵⁾。この結果、コンクリートの強度および弾性係数は低下する。加えて中性化の進行および物質侵入抵抗性が低下し、コンクリート内部の鉄筋が腐食するリスクが生じ耐久性上問題となる。以上のことより本研究では、火害を受けたコンクリート床版の耐疲労性状を評価した。すなわち、小型のコンクリート床版を対象として、供試体の上面と下面をISO834加熱曲線により加熱した。その後、静的載荷試験と疲労試験を実施し、加熱の有無が静的耐力と耐疲労性状に与える影響を検討した。

2. 火害を受けたコンクリート床版の静的載荷試験および疲労試験

2.1 供試体概要

表-1 および図-1 に供試体の実験因子と供試体概要を示す。供試体寸法は、800×800×100mmとした。主筋および配力筋の鉄筋比は、X方向とY方向でそれぞれ1.0%と0.5%とした。使用した鉄筋は異形棒鋼(SD295A)とし、X方向とY方向でD10とD6とした。加熱供試体には、供試体中央の加熱面から22(主筋位置)、50、78mm(配力筋位置)にK型熱電対を配置し内部温度の測定を行った。炉内温度は、供試体下面から100mm離れた炉内6箇所に設置した熱電対の平均値とした。供試体は加熱時間によってPhase1とPhase2とした。Phase1は①加熱無し(Control1)、②上面加熱(UH1)、③炉内温度は、供試体下面から100mm離れた炉内6箇所に設置した熱電対の平均値とした。下面加熱(LH1)とした。供試体は静的載荷試験用と疲労試験用に1体ずつ作製した。加熱試験はISO834加熱曲線を用い、加熱時間は60minとした。Phase2はISO834加熱曲線で加熱時間を30minとした。供試体は静的載荷試験用として加熱無し(Control2)を1体と疲労試験用に上面(UH2)と下面加熱(LH2)したものを1体ずつ作製した。

表-1 実験因子

| No. | Phase | Type | 加熱条件 | 加熱曲線 | 静的載荷試験 | 疲労試験 | 疲労試験の荷重 |
|-----|--------|----------|------|--------------|--------|------|-------------------|
| 1 | Phase1 | Control1 | 無し | - | 1 | 1 | - |
| 2 | | LH1 | 下面 | ISO834-60min | 1 | 1 | Pmax Control1の60% |
| 3 | | UH1 | 上面 | ISO834-60min | 1 | 1 | Pmax Control1の60% |
| 4 | Phase2 | Control2 | 無し | - | 1 | - | - |
| 5 | | LH2 | 下面 | ISO834-30min | - | 1 | Pmax Control2の60% |
| 6 | | UH2 | 上面 | ISO834-30min | - | 1 | Pmax Control2の60% |

*1 群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 3年生(学生会員)

*2 群馬大学 大学院理工学府 環境創生理工学プログラム 1年(学生会員)

*3 日本大学 工学部 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

表-2, 3にPhase1とPhase2に使用したコンクリートの配合を示す。また、表-4, 5にPhase1, Phase2のコンクリートの使用材料を示す。W/CはPhase1とPhase2ともに約62%とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材の最大寸法は25mmとした。混和剤はAE減水剤を使用した。Phase1の供試体はコンクリートを打設後、41日間の湿布養生を行った。Phase2の供試体は打設後、17日間の湿布養生を行った。Phase1およびPhase2で使用したコンクリートの圧縮強度は、それぞれ18.7MPa(材齢87日)と21.4MPa(材齢296日)であった。

2.2 加熱試験

加熱はガス水平炉を使用した。加熱はISO834加熱曲線で60min加熱30min加熱とした。加熱領域は供試体の上面または下面の一面加熱として、700×700mmの領域とした。写真-1に加熱試験の状況を示す。今回は、下面加熱に対し供試体の上下を逆に設置して下から加熱したものを上面加熱とした。加熱時に供試体の周囲には、断熱用のブランケットを設置した。Phase1とPhase2の加熱試験時の材齢は61日と18日であった。Phase2は加熱試験時の養生期間が短いため、圧縮強度の発現が小さいこと

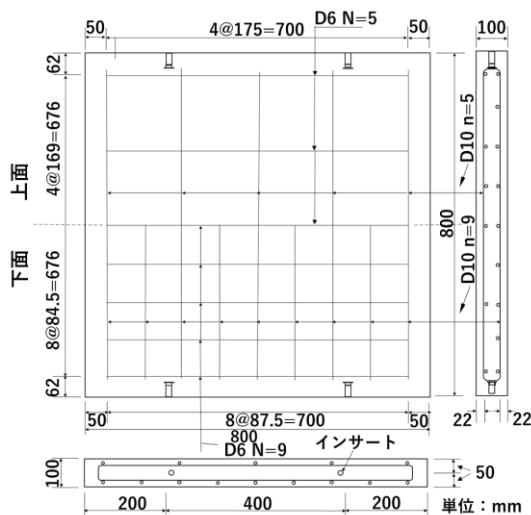


図-1 供試体の寸法形状

表-2 Phase1 コンクリートの配合

| slump (cm) | W/C (%) | Air (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|------------|---------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|
| | | | | W | C | S | G1 | G2 | ad |
| 10 | 61.4 | 4.5 | 46.5 | 165 | 269 | 853 | 399 | 610 | 2.152 |

表-3 Phase2 コンクリートの配合

| slump (cm) | W/C (%) | Air (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|------------|---------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|------|
| | | | | W | C | S | G | ad |
| 18 | 62.5 | 4.5 | 48.6 | 182 | 291 | 844 | 938 | 3.08 |

が予想され、材齢の影響を含んでいることを追記する。

2.3 静的荷重試験と疲労試験

加熱の影響が床版の静的耐力と耐疲労性状に与える影響を検討するために、静的荷重試験と疲労試験を実施した。図-2に荷重試験の検討フローを示す。まず、Control供試体を対象にして、静的荷重試験を実施し破壊時の最大荷重Pmaxを求めた。その後Pmaxの60%の荷重で定常疲労試験を行った。疲労試験時の荷重の上限は55.5kNとし下限は2.0kNとした。繰り返し速度は、2Hzとした。これらは既往の研究⁶⁾における上限荷重や静的破壊荷重比の範囲を参考にするとともに、本荷重試験装置の能力を勘案した結果により決定した。図-3, 4に荷重試験装置の概要を示す。静的荷重試験では、最大荷重が200kNの油圧ジャッキを使用した。疲労試験では、最大荷重が100kNの油圧ジャッキを使用した。供試体は700×700mmの4辺支持とし、浮き上がり防止治具により固定した。

荷重は供試体上面の中央とし、50×50×20mmの荷重板を設置した。荷重板直下の変位を測定するために、レーザ変位計(許容値±40mm, 分解能:0.01mm)を設置した。

表-4 Phase1 使用材料

| | |
|----|---|
| W | スラッジ水 |
| C | 普通ポルトランドセメント 3.15 g/cm ³ |
| S | 細骨材 揖斐川水系 2.6 g/cm ³ |
| G | 粗骨材1 米原市大久保産5-15mm、2.70 g/cm ³ |
| | 粗骨材2 揖斐川水系 25mm 2.64 g/cm ³ |
| ad | AE減水剤 |

表-5 Phase2 使用材料

| | |
|----|---|
| W | 水道水 |
| C | 普通ポルトランドセメント 3.16 g/cm ³ |
| S | 茨城県神栖市産 2.55 g/cm ³ |
| G | 粗骨材1 栃木県栃木市産5-20mm、2.68 g/cm ³ |
| ad | AE減水剤 |



写真-1 加熱試験の状況

Phase1 と Phase2 それぞれの静的荷重試験時の材齢と疲労試験時の材齢は、68 日と 98 日および 99 日と 102 日であった。静的荷重試験と疲労試験後、内部ひび割れを観察するために、供試体を切断した。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱試験の内部温度の経時変化

図-5, 6 に Phase1 と Phase2 における炉内およびコンクリート内部温度の経時変化を示す。上面加熱と下面加熱ともに炉内温度の上昇に伴い、供試体内部の温度も上昇していることがわかる。図-5 より、Phase1(60min 加熱)の LH1 における加熱終了時の炉内温度は 945°C、内部温度は 22mm と 50mm および 78mm 位置でそれぞれ 553°C と 221°C および 116°C であった。図-6 より、Phase2 の LH2 における加熱終了時の炉内温度は 775°C、内部温度は

22mm と 78mm 位置でそれぞれ 168°C と 88.7°C であった。また、UH2 における加熱終了時の炉内温度は 775°C、内部温度は 22mm と 78mm 位置でそれぞれ 168°C と 88.7°C であった。図-7 より、時間に対する LH2 と UH2 のそれぞれの温度測定位置が、ほぼ同じ温度変化をしているこ

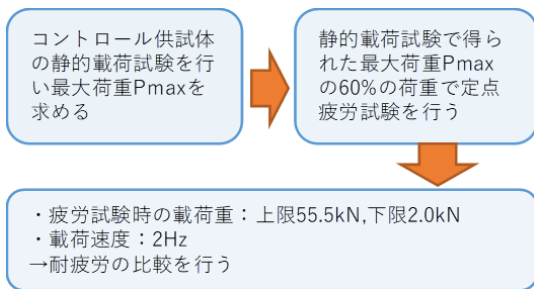


図-2 検討フロー

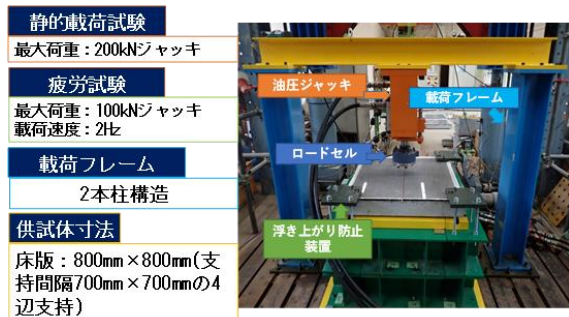


図-3 荷重試験装置の外観

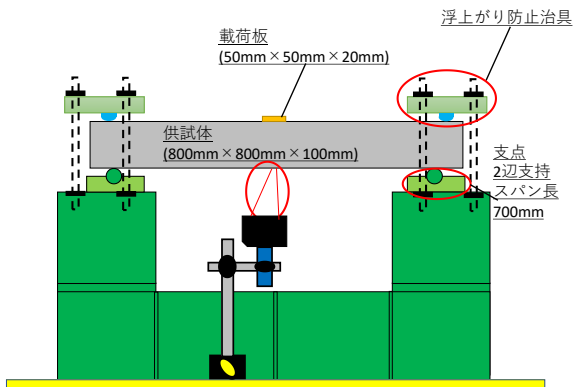
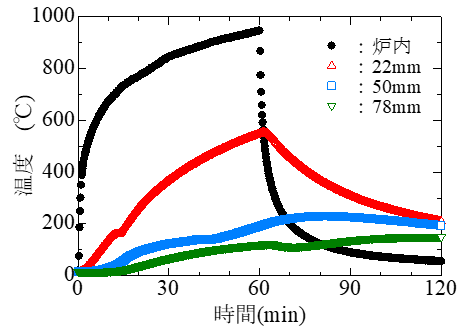
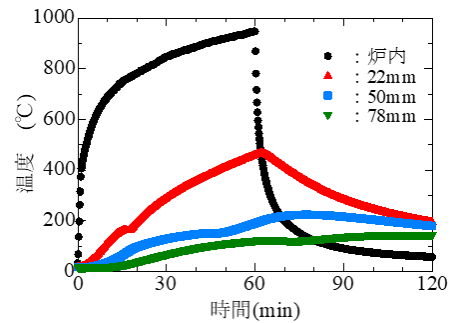


図-4 試験機の詳細図

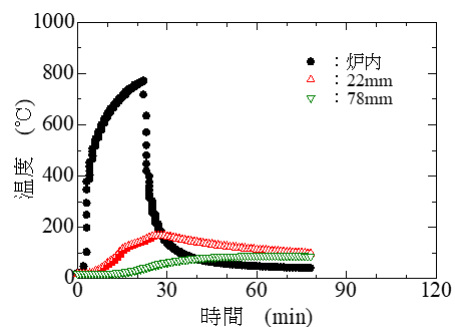


a) LH1

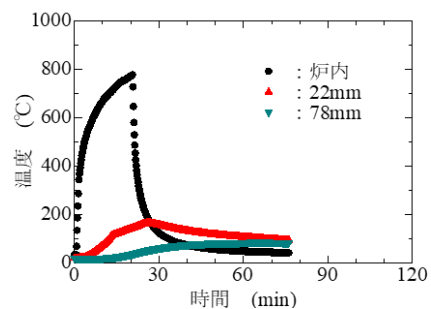


b) UH1

図-5 コンクリート内部の経時変化 Phase1



a) LH2



b) UH2

図-6 コンクリート内部の経時変化 Phase2

とから、上下面の内部温度は同程度の温度勾配が生じたと言える。

3.2 加熱面の損傷状況

写真-2, 3に Phase1 と Phase2 における加熱試験後の供試体加熱面の損傷状況を示す。図より、Phase1 と Phase2 ともに加熱領域面には微細ひび割れが生じていることがわかる。Phase1 の UH1 供試体には爆裂が生じ、断面が欠損していることが確認できた。

3.3 静的载荷試験結果：荷重変位関係

図-7に Phase1 と Phase2 の床版供試体を対象とした静的载荷試験時の荷重-変位関係を示す。全ての供試体は荷重の増加に伴い変位が増加し、押し抜きせん断破壊が生じた。Phase1 の Control1 と LH1 および UH1 の破壊時における最大荷重は 92.5kN と 67.4kN および 72.8kN であった。加熱損傷を受けることで、破壊時の最大荷重が低下することがわかる。また、初期剛性に注目すると、Control1 供試体よりも加熱した供試体の方が剛性は低下していることがわかる。LH1 と UH1 とともに床版供試体

は、加熱によるひび割れの影響およびヤング係数の低下が考えられる。加熱領域によって初期剛性が変化する点について、RC はりの曲げ試験でも同様な報告がある⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。Control2 と Control1 を比較すると、最大荷重はほぼ同等であった。一方で、Control2 の初期剛性は Control1 よりも小さくなっている。これは使用した骨材の影響等が考えられるが、今後検討が必要である。

3.4 疲労試験結果

図-8 に疲労試験の载荷回数と変位の関係および载荷回数の比較を示す。縦軸の変位は、横軸の载荷回数の時の供試体の中央のたわみのことである。本研究では、载荷回数の増加に対してそれまでの変位量より明らかに大きな変位を生じた段階で、疲労破壊したという定義づけとした。まず、Phase1 の Control1 供試体は载荷回数が 94 万回に対して、LH1 と UH1 供試体は 420 回と 3300 回となった。加熱無しと比べて 60min 加熱した UH1 と LH1 は耐疲労性が大幅に低下することが分かった。次に Phase2 において LH2 と UH2 供試体は約 2300 回と 6000

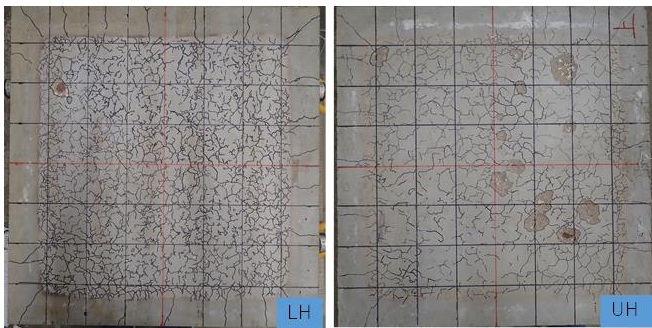


写真-2 Phase1 加熱面の状況

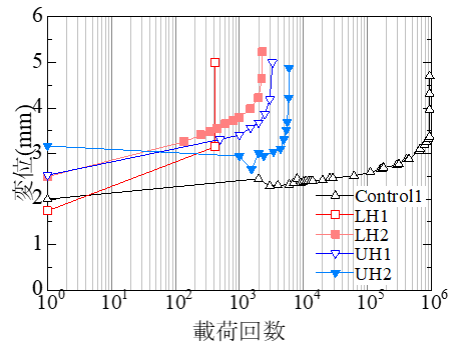


図-8 変位と载荷回数の関係 (疲労試験)

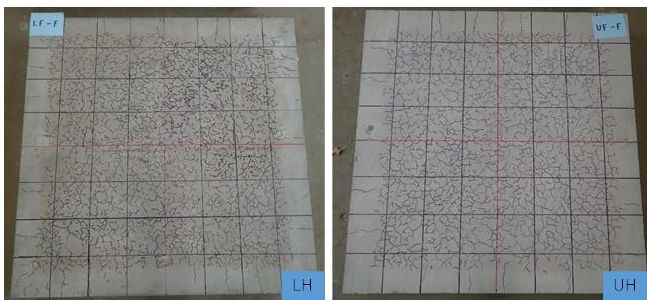


写真-3 Phase2 加熱面の状況

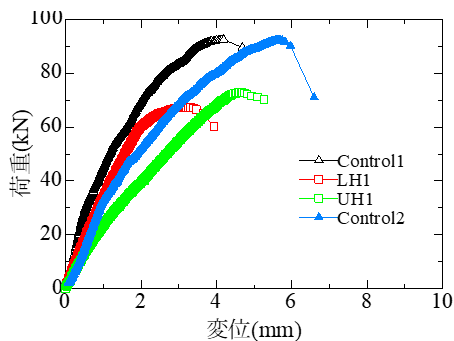


図-7 静的载荷試験結果

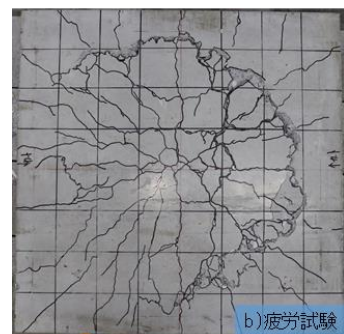
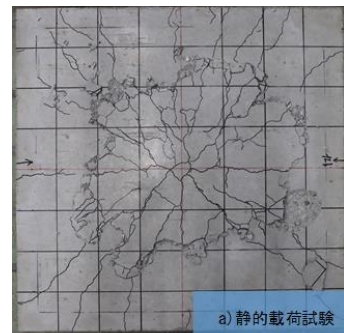


写真-4 载荷試験後の下面の様子 (UH)

回となった。以上より、加熱時間が長いと耐疲労性は低下する結果となった。また、LHとUHを比較すると、下面加熱した方が上面加熱よりも疲労回数が少ない。すなわち、耐疲労性に及ぼす加熱の影響は、加熱時間に加え床版下面であると示唆された。

3.5 載荷試験後の内部のひび割れ状況

写真-4にUH1を例として静的載荷試験および疲労載荷試験後の下面ひび割れの状況を一例として示す。静的載荷試験と疲労破壊試験ともに、下面が押し抜かれていることがわかる。Control1とLH1ともに同様な破壊形式であった。写真-5,6にPhase1とPhase2における静的載荷試験後および疲労試験後の供試体を中央部で切断し、断面のひび割れ性状を確認した結果について示す。全ての供試体において押し抜きせん断破壊によるひびわれが確認できた。加熱した供試体UH1とLH1およびUH2とLH2の切断面を確認すると、加熱領域が一部、褐色に変色していることは確認できるが、破壊性状に大きな違いは確認できなかった。

3.6 静的載荷試験の最大荷重と疲労試験の破断繰返し数の関係

Phase1のControl1と加熱あり供試体の静的載荷での最大荷重を比較すると、加熱により25%程度、荷重が低下した。一方、疲労回数はControl1が94万回(約 10^6 回オーダー)に対してUH1とLH1はそれぞれ3300回と420回で $10^2 \sim 10^4$ 回の範囲となり大幅に低下する結果となった。この点について考察する。図-9にPhase1で使用したコンクリートの残存圧縮強度と温度との関係を示す。この図は、常温での圧縮強度をもとに建築学会モデル¹¹⁾からコンクリートの残存圧縮強度を推定したものである。図-10にPhase1とPhase2における内部温度の最大値の分布を示す。Phase1より、LH1の主筋位置深さ22mmの内部温度は553°Cである。これに対する残存圧縮強度は7MPaとなり、内部の圧縮強度が低下していると考えられる。加えて、加熱面の写真(写真-3)より、微細ひび割れが確認できることから供試体内部においてもセメント水和生成物の熱分解と微細ひび割れが生じていると考えられる。このことより、静的載荷試験では25%程度の荷重低下となったが、疲労試験では荷重が繰り返し作用することで内部の微細ひび割れが拡大し、破断繰返し数が低下したと考えられる。

Phase1の静的載荷試験と疲労試験の結果より、破断繰返し数を求める近似式を推定した。近似式を式(1)に示す。

$$\ln N = -14.14 + 0.302 P_{max} \quad (1)$$

ここに、

N: 載荷回数 P_{max} : 最大荷重

次に、加熱時間の長さが疲労試験の結果に与える影響を考察する。Phase2(ISO834加熱曲線で30min加熱)の場合

のUH2とLH2の疲労回数をプロットし、式(1)の近似式との交点を求めた。UH2とLH2の疲労回数はそれぞれ5971回と2361回であり、UH1とLH1よりも疲労回数は

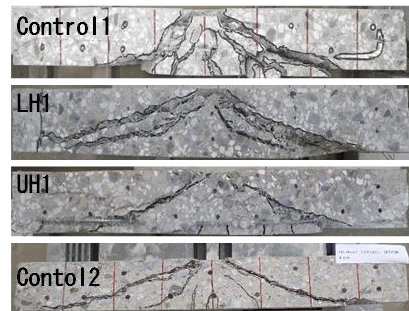


写真-5 供試体断面図(静的載荷試験後)

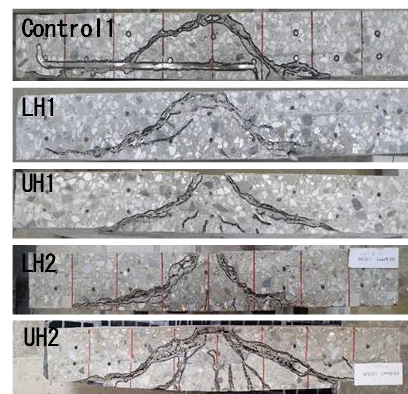


写真-6 供試体断面図(疲労試験後)

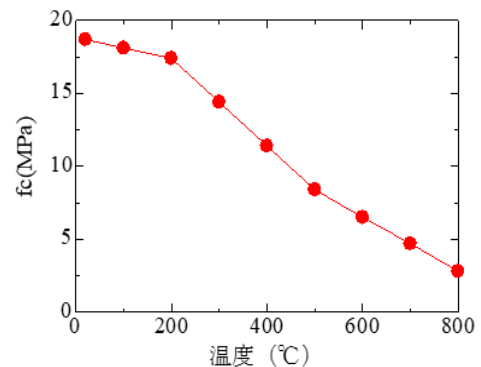


図-9 残存圧縮強度と温度の関係

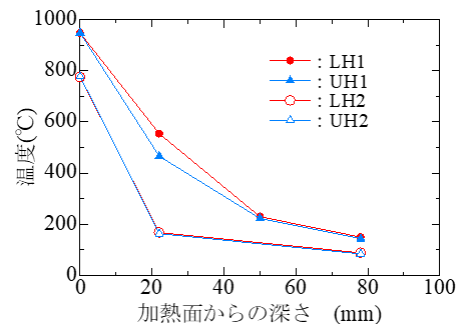


図-10 Phase1とPhase2における内部温度の最大値の分布

多かった。図-11 より、Phase2 における内部温度の最大値の分布をみると、Phase2 の温度勾配は Phase1 よりも小さいことがわかる。このため、内部の加熱損傷が Phase1 よりも小さく、疲労回数が多くなったと考えられる。近似式(1)より、Phase2 の UH2 と LH2 に静的載荷試験の最大荷重は、それぞれ 72.5kN と 75.6kN となり Phase1 よりも大きいと推察された。

以上より、加熱損傷を受けたコンクリート床版の静的載荷試験の最大荷重と疲労試験の破断繰返し数の関係を考察し、近似式を求めた。今回の関係から、静的載荷試験最大荷重を求めることで、破断繰返し数を推定できる可能性があることがわかった。また、加熱時間の長さによって、疲労回数にも差異が生じることが分かった。

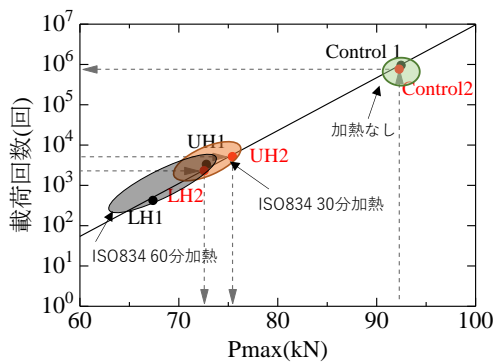


図-11 疲労試験の破断繰返し数と静的載荷試験での最大荷重との関係の近似直線

4. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- 1) コンクリート床版を ISO834 加熱曲線で 60min 下面加熱した結果、加熱面から 22mm 主筋位置の温度は 553℃となり、加熱面全体にひび割れ、一部に爆裂が生じた。同様に、30min 加熱した結果、加熱面から 22mm 主筋位置の温度は 168℃となり、加熱面全体にひび割れが生じた。
- 2) コンクリート床版の静的載荷試験を実施した結果、加熱無しに比べて上面加熱および下面加熱は破壊時の最大荷重が 25%程度低下した。一方で、疲労回数は、加熱無しと比較して加熱有の供試体は大きく低下した。
- 3) 加熱損傷を受けたコンクリート床版の静的載荷試験の最大荷重と疲労試験の破断繰返し数の関係を考察し、近似式を求めた。今回の関係から、静的載荷試験の結果より、疲労回数を推定できる可能性があることがわかった。

今後は、加熱時間をさらに短くした条件を加え、疲労試験の載荷荷重の影響を検討する必要があると考える。

謝辞

本研究は公益信託 NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金の補助を受けて実施した。また、供試体の作製に際し、丸栄コンクリート工業 阪口裕紀氏のご支援を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良 竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行: アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016
- 2) 前島拓, 子田康弘, 土屋智史, 岩城一郎: 塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.2, pp.208-225, 2014
- 3) 宮村正樹, 子田康弘, 内藤英樹, 岩城一郎, 鈴木基行: 振動特性に着目した RC 床版の疲労損傷度評価手法に関する研究, 構造工学論文集 A, Vol.57A, pp.1251-1262, 2011
- 4) Na-Hyun Yi et al : Failure behavior of un-bonded bi-directional pre-stressed concrete panels under RABT fire loading, Fire Safety Journal, Vol.71, January 2015, pp.123-133
- 5) 日本建築学会: 建物の火害診断および補修・補強方針 指針・同解説, 2015.2
- 6) 角田与史雄, 藤田嘉夫: RC スラブの疲労押し抜きせん断強度に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 317 号, pp.149-157, 1982.1
- 7) 久木野定, 田中浩, 浜田純夫, 松尾栄治, 吉武勇: 軽量 PC 床版の静的および疲労押し抜きせん断に関する研究, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.115-120
- 8) 迫井裕樹, 小澤満津雄, 山本哲, 阿久津裕亮: 高温加熱を受けた RC はりの損傷評価および耐荷力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1025-1030, 2019
- 9) 原田有: 高温を受けた鉄筋コンクリート梁の強度の低減に関する実験的研究(第 2 報 内部温度不均一の場合-I), 日本建築学会論文報告集, 第 56 号, pp.105-108, 1956
- 10) 原田有: 高温を受けた鉄筋コンクリート梁の強度の低減に関する実験的研究(第 3 報 引張側から急熱された場合), 日本建築学会論文報告集, 第 66 号, pp.149-152, 1960
- 11) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 2017.3