

論文 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

迫井裕樹*1・小澤満津雄*2・山本哲*3・阿久津裕亮*4

要旨: 鉄筋コンクリート構造物が火災など高温加熱を受けると、表面および内部にひび割れ等の損傷が生じ、その力学的特性および耐久性が低下する。高温加熱を受けた鉄筋コンクリート構造物の安全性・使用性の評価においては、受熱後の損傷範囲の評価・推定とともに、受熱後の耐荷性能に関する検討が重要となる。本研究では、800°Cの加熱を受けた RC はりを対象に、表層透気試験を用いた損傷範囲の推定について検討を行った。また、加熱領域を構造体の一部に限定し、かつ、加熱領域の異なる RC はりを用いて曲げ載荷試験を行い、加熱領域の違いが耐荷性能に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード: 火害, RC はり, 超音波伝搬速度, 表層透気試験, 耐荷性能

1. はじめに

火災など高温加熱を受けた鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物は、表面および内部に微細ひび割れが発生し、セメント水和物の熱分解、さらに状況によっては爆裂現象が生じる。近年、高温加熱に伴う爆裂現象の発生を防止・抑制することを目的として、有機繊維やジュート繊維をコンクリート中に混入した検討が行われ、その効果が報告されている^{例え、1), 2)}。これら繊維の混入により爆裂現象の防止・抑制がされたとしても、加熱に伴う力学的特性の低下や中性化の進行、さらには加熱に伴い生じたひび割れ等損傷に起因する物質移動抵抗性が低下するなど、耐久性上問題となることがある³⁾。

一方で、既存構造物に着目すると、火災など高温加熱を想定した設計が行われた構造物は少ないと思われる。近年、特に都市部においては高架橋や立体交差などが多く存在し、その近傍で車両事故などに伴い火災などが発生することを想定すると、その後の構造物の使用性・安全性を検討するために、既存の非破壊試験の利活用を含めた損傷の評価・診断手法を検討することが必要となる。特に、熱源からの距離や加熱面からの深度方向の損傷の分布を効率的に評価・診断する手法の確立が望まれる。これらに対して著者らはこれまでに表層透気試験を用いた火害損傷範囲の評価・推定に関する検討^{例え、4), 5)}を行っており、表層透気係数による損傷範囲推定の可能性を示している。

さらに、加熱を受けた RC の使用性・安全性の検討において、火害後の RC の耐荷性能を把握することが必要不可欠となる。この際、実構造物、特に高架橋など屋外開放空間における土木系構造物が火災による加熱を受け

ることを想定すると、大規模火災の場合を除き、構造物を構成する部位・部材の一部が加熱を受け、局所的な損傷を生じるとともに、部材としての耐荷性能等に影響を及ぼすことが想定される。つまり、構造物に対して、局所的な受熱を想定し、その受熱部（例えば、等曲げ区間／せん断区間、あるいは、圧縮側／引張側／側面など）の違いが受熱後の RC の耐荷性能に及ぼす影響を検討することが重要であると考えられる。

本研究では、加熱領域が限定された RC はりの損傷範囲の評価・推定および、加熱後の RC はりの耐荷性能を把握することを目的とする。まず、加熱を受けた RC はりを対象として、超音波伝搬速度による損傷範囲の評価との比較検討により、表層透気試験を用いた損傷範囲の評価・推定の可能性について検討を行った。次いで、加熱後の RC はりを用いてせん断実験を行い、受熱領域の異なる RC はりのせん断耐荷性能について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験では使用材料として、セメントは早強ポルトランドセメント（密度=3.13g/cm³）を、細骨材は砂岩（表乾密度：2.62g/cm³）および石灰岩砕砂（表乾密度：2.64g/cm³）の混合砂を、粗骨材は輝緑凝灰岩（表乾密度：2.64g/cm³）を用い、混和剤は AE 減水剤を用いた。

表-1 に本実験で用いたコンクリートの配合を示す。水セメント比は 47.0%，細骨材率は 39.0%，目標スランプおよび目標空気量はそれぞれ 10.0±1.0cm および 4.5±1.0%とした。また、表-1 中には、材齢 28 日におけるコンクリートの力学的特性を併せて示している。

*1 八戸工業大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 博士（工学）（正会員）

*2 群馬大学大学院理工学府 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 群馬大学大学院理工学府 環境創生理工学教育プログラム（学生会員）

*4 群馬大学理工学部 環境創生理工学科（学生会員）

表-1 配合および力学的特性

| W/C [%] | s/a [%] | 単位量 [kg/m ³] | | | | | | 圧縮強度 [N/mm ²] | 引張強度 [N/mm ²] | 静弾性係数 [kN/mm ²] |
|------------|------------|--------------------------|-----|----------------|----------------|------|------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | | W | C | S ₁ | S ₂ | G | AE剤 | | | |
| 47.0 | 39.0 | 175 | 375 | 345 | 345 | 1151 | 3.75 | 51.6 | 4.45 | 39.6 |

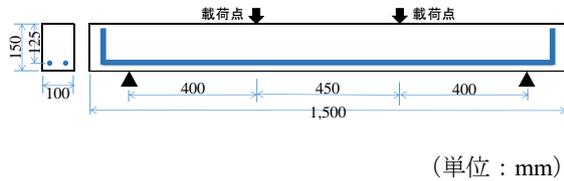


図-1 RC はり概要

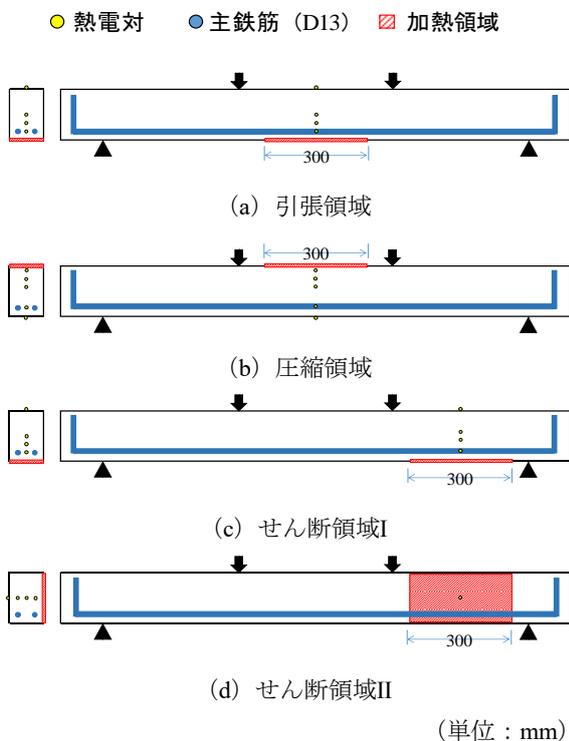


図-2 RC はりの加熱領域概要

2.2 加熱に伴う力学的特性の変化

受熱温度に伴う力学的特性の変化を把握するため、全面加熱を行ったコンクリート供試体を用いて、圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。使用した供試体はφ100×200mmの標準円柱供試体であり、加熱には電気炉を用いた。加熱条件として、炉内最高温度を120, 220, 320, 520および620℃とし、約1℃/分の昇温速度で加熱を行った。設定最高温度に達した後、5時間保持し、その後自然冷却とした。室温程度まで冷却した後、圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。

2.3 RC はりを用いた検討

本実験で使用したRC はりを図-1に示す。RC はりはL:1500×H:150×W:100mmとし、主鉄筋としてD13を2本用いた。なお、本研究の目的の一つである加熱後のRC

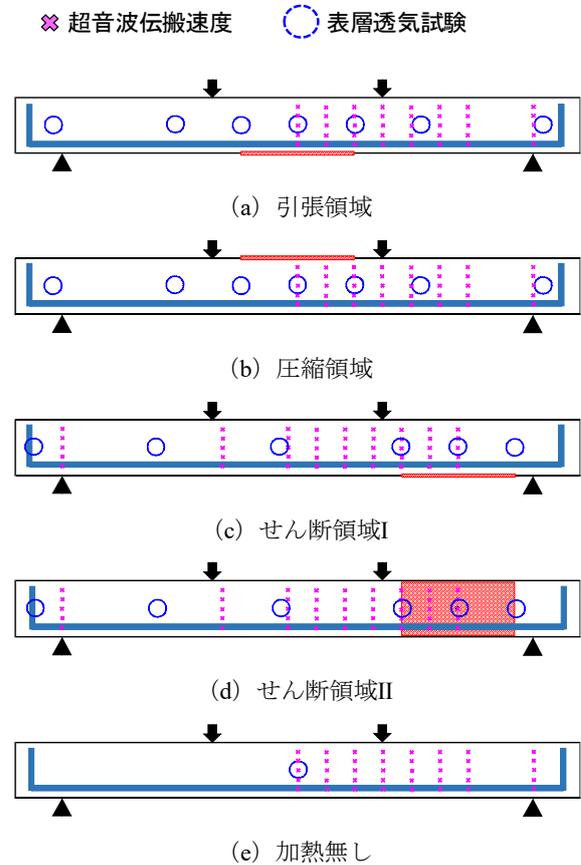


図-3 超音波伝搬速度および表層透気係数測定位置

はりのせん断耐荷性能を把握するため、主鉄筋のみとして、せん断補強筋は用いていない。

後述の加熱試験および加熱後の各種試験に供する試験体の加熱領域として本実験では、①等曲げ区間の引張領域（下面加熱）（以下、引張領域と記す）、②等曲げ区間の圧縮領域（上面加熱）（以下、圧縮領域と記す）、せん断領域の③下面加熱（以下、せん断領域Ⅰと記す）および、④側面加熱（以下、せん断領域Ⅱと記す）の4ケースを設定した。また、比較検討用に⑤加熱試験を行わない試験体（以下、加熱無しと記す）も設定した。①～③の加熱領域は、L:300×W:100mm、④の加熱領域はL:300×H:150mmとした。加熱試験に供する①～④全てに対して、加熱領域中央部で、加熱面（引張領域、せん断領域Ⅰ：下面、圧縮領域：上面、せん断領域Ⅱ：側面）から深さ25, 50, 75mm位置および、加熱面裏面（①～③：加熱面から150mm、④：加熱面から100mm）に熱電対を設置し、加熱試験時の試験体内部の温度測定を行った。

また、②については、加熱面から 125mm 位置（鉄筋位置）にも熱電対を設置した。これら各 RC はりの概要図を図-2 に示す。

試験体の加熱には電気炉を用いた。電気炉開口部に各試験体の加熱領域が一致するよう試験体を設置し、加熱試験を行った。なお、加熱領域以外の箇所については、断熱ブランケットを用いて、断熱処理を行った。加熱は、目標炉内最高温度を 800℃として、約 16℃/分の昇温速度で加熱を行った。炉内温度が 800℃に達した後、3 時間保持し、その後実験室内に静置して自然冷却を行った。なお、ここで示す加熱条件は、加熱箇所の違いが損傷評価および加熱後の耐荷性能に及ぼす影響を把握するために設定したものであり、実火災を想定したものではない。

加熱試験後の試験体が室温程度まで冷却した後、加熱に伴う損傷範囲・損傷程度および損傷分布を把握することを目的として、超音波伝搬速度および表層透気係数の測定を行った。各試験体の超音波伝搬速度および表層透気係数の測定箇所を図-3 に示す。超音波伝搬速度は、加熱領域中心位置から 0, 75, 150, 225, 300, 375, 450, 625 および 1050mm 位置において、供試体高さ方向に 25mm 間隔で測定を行った。また表層透気試験の測定は、引張領域または圧縮領域が加熱を受けた試験体では、加熱領域中心から 0, 150, 325, 625mm 位置、せん断領域が加熱を受けた試験体では、加熱領域中心から 0, 150, 475, 800, 1125mm 位置において測定を行った。なお、加熱無しについては桁中心部のみ、せん断領域Ⅱについて

は加熱領域中心において試験体背面（加熱面の裏面）での測定も行った。

超音波伝搬速度および表層透気係数の測定後、2 点曲げ載荷試験を行い、破壊特性および耐荷力の把握を行った。なお載荷試験時には、試験体中央下部において変位計測も行った。

3. 実験結果および考察

3.1 円柱供試体を用いた加熱に伴う力学的特性変化

図-4 には、円柱供試体を全面加熱した際の圧縮強度、静弾性係数の変化を示す。図中 20℃の箇所のプロットは、加熱前の値を示している。

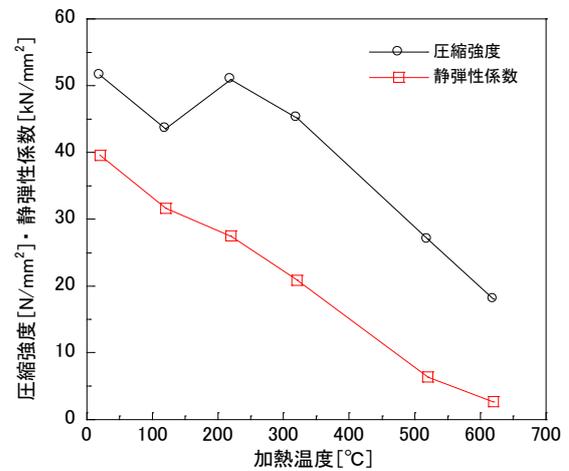


図-4 加熱に伴う力学的特性の変化

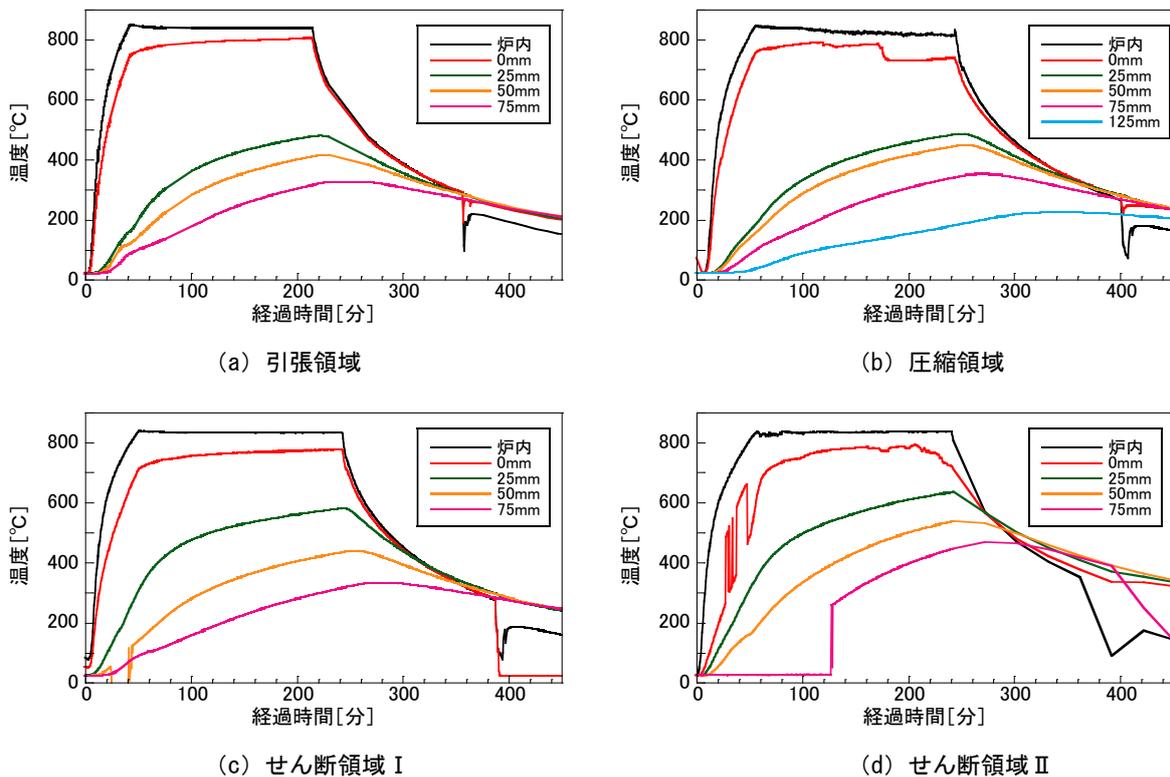


図-5 加熱に伴う内部温度履歴

図-4 より、圧縮強度は 220℃程度までは大きな変化を示さないものの、220℃を超える加熱を受けると、加熱温度の上昇に伴い圧縮強度が低下し、620℃の加熱では、加熱無しと比較して約 40%程度となることが確認された。一方、静弾性係数は、加熱開始直後から加熱温度の上昇に伴い、低下することが確認された。

これらの結果より、後述の加熱を受ける RC はりににおいて、加熱箇所からの距離および加熱面からの深さによって、温度勾配を生じることから、RC はり内部で力学的特性の分布が生じ、構造体としての耐荷力等にも影響を及ぼすものと推察される。

3.2 RC はりの内部温度分布

各 RC はりの加熱に伴う温度履歴を図-5 に示す。これより、加熱表面部においては、炉内温度とほぼ同様の温度履歴を示しているとともに、加熱面からの深さに伴い、温度勾配が生じていることが確認された。加熱表面から最も深い位置に設置した熱電対では、最高温度が 300~400℃程度となることが確認された。なお、他の条件においても同様の傾向を示していることが確認された。

ここで、各試験体における加熱表面からの深さ方向の距離（熱電対の埋設位置）と最高温度の関係を図-6 に示す。これより、いずれの試験体においても硬化体内部の温度勾配はほぼ同程度であったことが確認された。

3.3 加熱後の RC はりの損傷状況

(1) 超音波伝搬速度による損傷評価

図-7 (a) ~ (e) には、加熱後の RC はりににおける超音波伝搬速度の分布を示す。超音波伝搬速度を測定していない箇所については、図中では白抜きで示している。

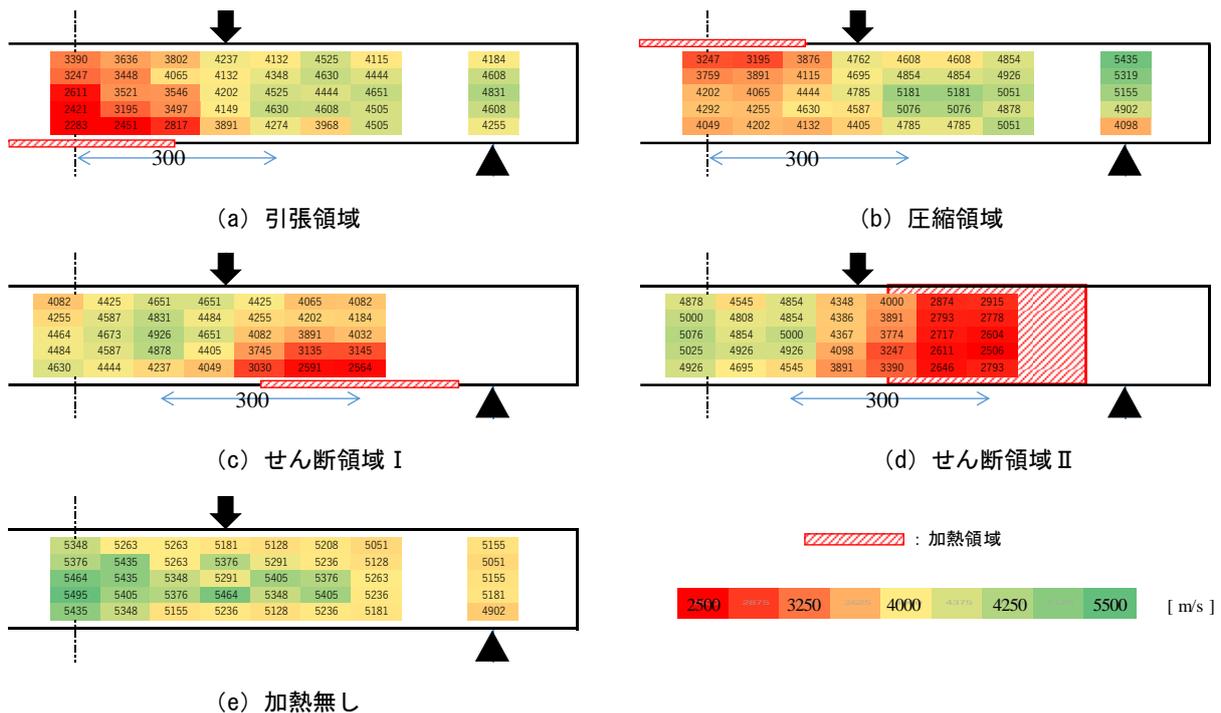


図-7 加熱後の超音波伝搬速度分布

加熱無し試験体については、測定範囲全体において、約 5300m/s 程度とほぼ同程度の超音波伝搬速度を示している一方で、加熱後の試験体はいずれも、加熱領域近傍で 2000~3000m/s 程度の値となり、加熱に伴う損傷が生じていることが示唆された。また加熱領域中心からの距離に伴い、超音波伝搬速度は高い値を示し、加熱領域中心から 300mm 程度以上離れた箇所では 4500m/s 以上と、加熱前とほぼ同等の超音波伝搬速度を示すことが把握された。

ここで、加熱領域中心部における深さ方向の温度分布と超音波伝搬速度の関係を図-8 に示す。図中の受熱最高温度 20℃にプロットしている超音波伝搬速度は、加熱無し試験体の超音波伝搬速度の平均値を示している。これより、両者の関係は加熱領域の違いによらず、概ね良

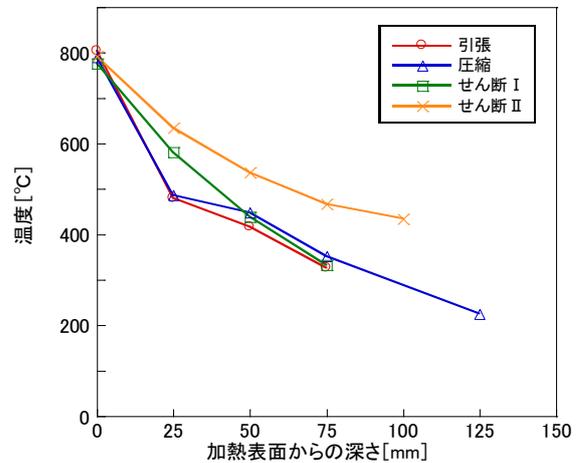


図-6 RC はり内部における受熱最高温度

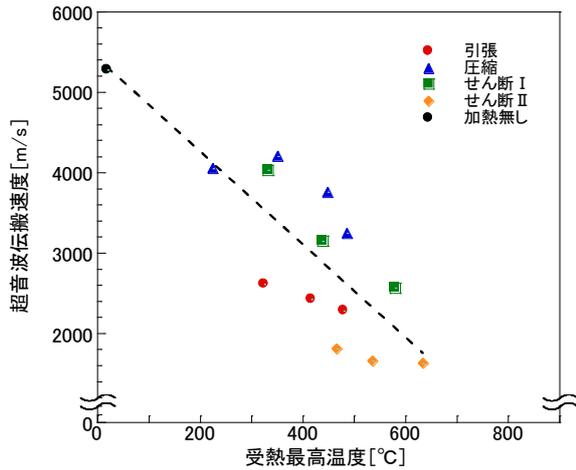


図-8 超音波伝搬速度と受熱温度の関係

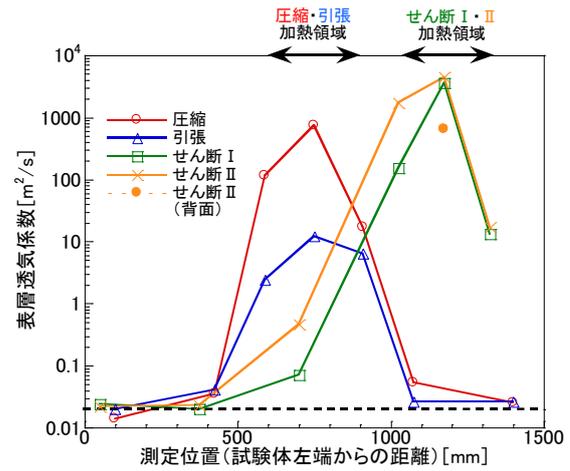


図-9 加熱後の表層透気係数の分布

好な直線関係を示しており、受熱最高温度の上昇に伴い超音波伝搬速度が低下することが確認された。また、図-4と併せて考えると、超音波伝搬速度が2000m/s程度を示す位置の圧縮強度は、加熱前の約50%程度となることが推察される。

(2) 表層透気試験による損傷評価

図-9に加熱後のRCはりに対して行った表層透気試験の分布を示す。図中の破線は、加熱無し試験体の透気係数を示している。また図中上端には、各試験体の加熱領域を併せて示している。これより、各加熱条件いずれも、表層透気係数は加熱領域中心で最も高い値を示し、加熱領域からの距離に伴って低下し、加熱領域から離れた箇所では、加熱無しと同程度の表層透気試験を示すことが把握された。この関係は、前述の超音波伝搬速度の結果とも一致するものである。

ここで、表層透気係数と超音波伝搬速度の関係を図-10に示す。図中に示す超音波伝搬速度は、表層透気係数を測定した位置における超音波伝搬速度の平均値で示している。また図中の破線は、両者の関係の近似線を示している。これより、超音波伝搬速度の低下に伴い、表層透気係数が増加することが確認され、また、両者の間には比較的高い相関関係が示されることが確認された。超音波伝搬速度は、図-7および図-8に示されるように、加熱領域に近く、受熱温度が高いほど低い値となることから、良い相関関係にある表層透気係数もまた、加熱に伴う損傷程度の大小を示す一指標として利用が可能であることを示唆するものと考えられる。このことはつまり、加熱に伴う損傷範囲の評価・推定において、表層透気試験の利用が可能であることを示唆するものと考えられる。ただし現段階では、超音波伝搬速度も同様であるが、構造体内部において実際に生じている損傷程度（ひび割れ幅、密度、数など）との詳細な関係性は明らかとなっておらず、測定範囲内での相対的な損傷程度の

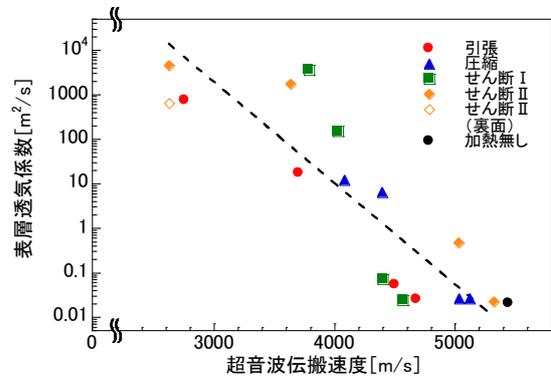


図-10 表層透気係数と超音波伝搬速度の関係

大小を示すのみであることに留意が必要である。これら内部の実際の損傷程度との関連については今後の継続的な検討が必要であると考えられる。

3.4 加熱を受けたRCはりの耐荷力

表-2には載荷試験結果概要を、また図-11には加熱後のRCはりの載荷試験における荷重-変位曲線を示す。引張領域が加熱を受けたものは、載荷に伴い曲げひび割れが進行したが、最終的にせん断破壊を生じた。また、圧縮領域が加熱を受けたものは、曲げひび割れ・せん断ひび割れが進行したが、最終的には加熱領域近傍の圧縮側にひび割れが卓越し、圧壊を生じた。せん断領域を加熱したものについていずれもせん断破壊を生じたが、加熱領域の違いにより破壊面が異なった。つまり、下面加熱を受けたものは加熱領域と逆側でせん断破壊を生じ、側面加熱を受けたものは、加熱側でせん断破壊を生じた。せん断領域が加熱を受けたものについて、加熱方向の違い（下面/側面）によって、せん断破壊箇所が異なる原因については、図-7の結果より加熱方向によって損傷範囲が大きく異なることに起因するものと推察されるが、現段階で詳細は不明であり、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

曲げ載荷試験による最大荷重について、加熱無しの最大荷重が約 49kN に対して、引張領域が加熱を受けたものの最大荷重は約 61kN と増大した。また圧縮領域が加熱を受けたものは、最大荷重が加熱無しとほぼ同程度であったが、剛性が低下する結果を示した。せん断領域が加熱を受けたものについては、加熱面の違い（下面／側面）が最大荷重に及ぼす影響は少なく、いずれも約 45kN と、加熱無しと比較して約 10%程度低下することが確認された。

引張領域が加熱を受けたものにおいて、最大荷重が増加を示した理由として、損傷の発生に伴う耐荷機構の変化によるものと推察される。つまり、図-7または図-9より、スパン中央下部（引張領域）の損傷が著しく付着が大きく低下していることが推察される一方で、加熱領域中央から 300mm 程度以上離れた箇所では損傷が少ないことから、タイドアーチ的な機構を形成（コンクリートが負担するせん断力の増加）し、最大荷重が増加したものと推察される。ただし、この点の詳細については今後の継続的な検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 加熱後の RC に対する非破壊試験（超音波伝搬速度、表層透気試験）結果より、加熱に伴う損傷は加熱領域近傍に限定され、加熱領域から 300mm 程度以上離れた箇所では、損傷が少ないことが示唆された。
- 2) 超音波伝搬速度および表層透気係数それぞれの分布および両者の関係から、表層透気係数を用いることにより、加熱を受けたコンクリートの損傷範囲推定が可能であると考えられる。
- 3) ただし、現段階では、受熱に伴う硬化体内部の実際の損傷状況と表層透気係数の関係性が不明であり、測定範囲内での相対的な比較となる。
- 4) 等曲げ区間における引張領域が加熱を受けた場合、最大荷重は加熱無しと比較して約 20%程度増加することが明らかとなった。
- 5) 等曲げ区間における圧縮領域が加熱を受けた場合、最大荷重は加熱無しと同程度であるものの、剛性が低下する。
- 6) せん断領域が加熱を受けた場合、加熱方向の違いによる影響はあまり見られず、いずれも最大荷重が約 10%程度低い値を示すとともに、剛性が低下する。

謝辞：本研究は、科学技術研究補助金（基盤研究（C）16K06437）の補助を受け実施したものである。ここに記して謝意を表する。

表-2 曲げ試験結果概要

| 加熱条件 | 曲げひび割れ発生荷重 [kN] | 最大荷重 [kN] | 破壊形態 |
|---------|-----------------|-----------|------|
| 引張領域 | 19 | 60.9 | せん断 |
| 圧縮領域 | 35 | 51.7 | 圧壊 |
| せん断領域I | 17 | 45.7 | せん断 |
| せん断領域II | 14 | 44.1 | せん断 |
| 加熱無し | 25 | 49.2 | せん断 |

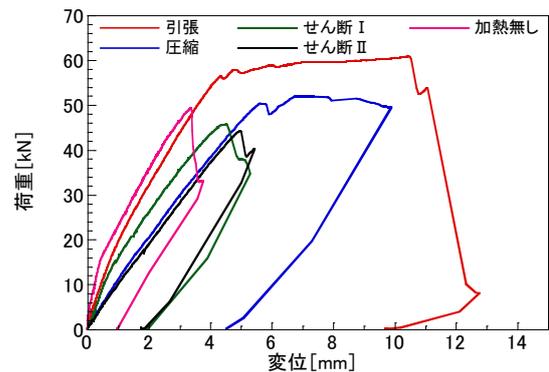


図-11 加熱後 RC はりにおける荷重－変位関係

参考文献

- 1) Munkhtsatsral, D., 小澤満津雄, 周波, 内田裕市: 天然繊維を適用した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1330-1335, 2014
- 2) 川口潤, 小澤満津雄, 周波, 内田裕市: 超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制と加熱後の残存強度に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1153-1158, 2013
- 3) 鉄羅健太, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 藤本謙太郎, 明石孝太: 高温加熱を受けたコンクリートの塩化物の拡散係数による耐久性評価, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 第 16 巻, pp.239-244, 2016
- 4) 赤坂春風, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 鉄羅健太: 火害を受けたコンクリートの透気性による損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1069-1074, 2017
- 5) 迫井裕樹, 小澤満津雄, 川邊清伸, 若林瑠美: 高温加熱によるコンクリートの損傷評価に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 第 15 巻, pp.285-290, 2015