

三次元非定常熱伝導解析を用いたコンクリートの内部欠陥形状の推定

長崎大学大学院 学生会員 ○野田真平

長崎大学 正会員 山口浩平

1. 背景および目的

本研究はコンクリートの損傷の一つであるうきに着目した。うきの発生過程は、図1に示すようにコンクリート内部の鉄筋が腐食、膨張することによりひび割れが発生し、コンクリート内部と一体性が失われ、最終的には、はく離・はく落に至る。写真1にうきの損傷、写真2に2021年7月に起きたコンクリート片のはく落事故を示す²⁾。うきの特徴である、外観からうきの有無が判別困難かつ危険性が高いことがわかる。定期点検でうきが確認された場合は、ういた箇所を点検ハンマーでたたき落して露出した鉄筋を防錆処理後、モルタルなどにより断面修復が施される。こうした補修部は、再劣化の事例が多く確認されている³⁾。これは、うきの発生メカニズムが十分に明らかになってことが主な原因であると考えられる。この背景として、①鉄筋の腐食だけでなく車両の通行による繰り返し荷重を起因とした疲労などを含めた複数の要因から起きた複合劣化であること、②コンクリート内部でのひび割れ発生進展の状況が未解明であることなどが挙げられる。

そこで本研究は、うきの発生メカニズムの解明を目的とし、新たな非破壊検査技術の開発と効率的な維持管理手法の提案を目指す。現在、うきの検出には主に打音法が用いられているが、うきの有無は判別できるものの、そのうきの深さ、幅、形状などは推定できない。うきの発生メカニズムを解明するために本研究では、非破壊検査技術の一つである、赤外線法と同条件の三次元非定常熱伝導解析を用いて、コンクリートの内部欠陥形状の推定を行う。解析は非線形ソフトウェアの Marc を用いて行った。

2. 欠陥形状の推定

図2および図3にうきを模したモデルを示す。モデルサイズは、幅、奥行き 600mm、高さ 200mm である。欠陥はうきを誘発するコンクリート内部のひび割れを想定した円錐、斜めであり、角度 30, 45, 60°, 厚さ 0.1, 0.2, 1mm, 幅 75mm 深さ 10, 20, 30mm, 熱流束 190, 380, 950W/m²としてパラメータ解析を行った。熱流束はモデル上面に 30 分間与え、1 分間ごとに表面温度の計測を行った。解析条件は田中らの研究⁴⁾を参考に設定した。材料条件は、コンクリート、空気それぞれ熱伝導率を 2.55, 0.0257W/mK, 比熱を 1050, 1005J/kgK, 密度を 2200, 1.166kg/m³とした。初期条件は、節点温度を 293K とした。境界条件は、熱流束を 190W/m², 熱伝達係数を 10W/m²K とした。

図4に、加熱 30 分後の健全部との温度差の一例を示す。同図(a)は水平、同図(b)は円錐、同図(c)は斜めにうきを埋設したモデルである。同図(a)および同図(b)は左右対称な外形であるのに対し、同図(c)は左右非対称な外形となった。このことは、斜めの欠陥形状の推定が可能であることを示唆し

ている。図5に、加熱 10 分後の健全部との温度差を、加熱 30 分間で最大となる健全部との温度差で除した値である、各計測地点の最大温度差との比の一例を示す。同図(a)は頂点付近が平らな外形、同図(b)は凹んだ外形、同図(c)は左右非対称な外形となった。このことは、水平、円錐、斜めをグラフの外形から判断でき、欠陥形状が推定可能であることを示唆している。また、両図のようなグラフの外形は欠陥の角度、厚さ、深さ、熱流束のパラメータを変更しても同様の傾向を示した。

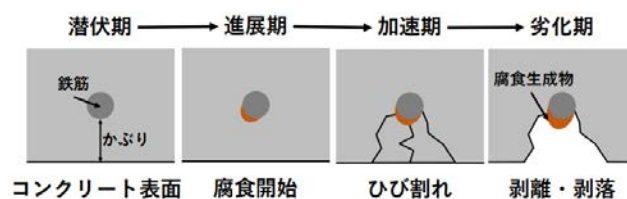


図1 うきの発生過程



写真1 うきの損傷



写真2 はく落事故

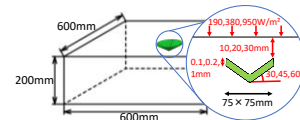


図2 円錐欠陥のモデル

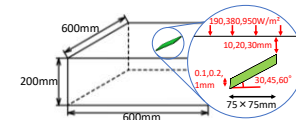


図3 斜め欠陥のモデル

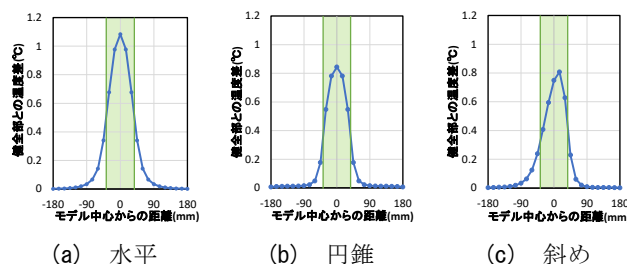


図4 加熱 30 分後における健全部との温度差

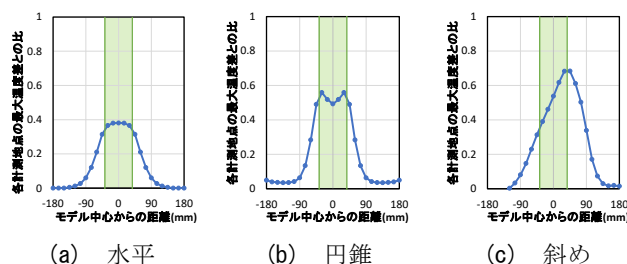


図5 各計測地点の最大温度差との比

キーワード 維持管理 橋梁定期点検 コンクリート うき 赤外線法 三次元非定常熱伝導解析

連絡先 〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学大学院工学研究科構造工学コース 電話 095-819-2591

3. 欠陥範囲の推定

図 6(a)に円錐，同図(b)に斜めのモデルにおける熱流束の違いによる健全部との温度差を示す。緑色の範囲は欠陥範囲を示す。同図より円錐，斜めどちらのモデルについても，健全部との温度差は熱流束の影響を受けることがわかる。図 7(a)に円錐，同図(b)に斜めのモデルにおける各計測地点の最大温度差との比を示す。各計測地点の最大温度差との比で評価することにより，熱流束の影響を除外できることがわかる。また円錐においては，同図(a)より，グラフの増減が変化する点が欠陥端部となった。また欠陥深さ 20, 30mm でも同様の結果が得られ，欠陥範囲の推定が可能であることがわかった。斜めにおいては，同図(b)より，欠陥の浅い側についてグラフの増減が変化する点が欠陥端部となり，欠陥深さ 20, 30mm でも同様の結果が得られ，欠陥の浅い側について欠陥範囲の推定が可能であることがわかった。

4. 欠陥深さの推定

図 8(a)に円錐，同図(b)に斜めのモデルにおける欠陥厚さの違いによる健全部との温度差を示す。同図より円錐，斜めどちらのモデルについても健全部との温度差は欠陥厚さの影響を受けることがわかる。図 9(a)に円錐，同図(b)に斜めのモデルにおける最大温度差との比と欠陥深さの関係を示す。ここでは欠陥が最も浅くなる位置のコンクリート表面で最大温度差との比を求めた。同図より，欠陥角度が異なると最大温度差との比は異なる値となったが，同じ角度であれば，グラフはほぼ同一の直線と見なすことができ，欠陥厚さの影響を除外できることがわかる。同図(a)より，例えば欠陥角度が 30° で欠陥端部の最大温度差との比が 0.4 の場合，欠陥深さが約 18mm であると推測できる。同図(b)についても同様に，欠陥深さを推測できることがわかる。

5. まとめと今後の展望

図 10 に欠陥形状・範囲・深さの推定についてまとめる。健全部との温度差のグラフの外形が非対称であれば，欠陥は斜めと推定できることがわかった。各計測地点の最大温度差との比のグラフの外形が凹んでいれば欠陥は円錐，平らであれば欠陥は水平と推定できることがわかった。各計測地点の最大温度差との比のグラフの外形より，斜めの欠陥の浅い側は頂点が欠陥端部であり，欠陥範囲の推定が可能であることがわかった。最大温度差との比と欠陥深さのグラフより，円錐，斜めについて角度がわかれば欠陥深さの推定が可能であることがわかった。

今後は，斜めのモデルについて欠陥の深い側について欠陥範囲の推定の方法を検討する。また円錐，斜めのモデルについて角度の推定の方法を検討する。

参考文献

- 1) 松岡弘大，田中伸幸，貝戸清之：かぶりコンクリートの剥離・剥落および鉄筋腐食過程の推計，第 46 回土木計画学研究・講演集，No.14，pp.1103-1108，2012。
- 2) 国土交通省，国道 228 号 松前町白神 コンクリート片落下による通行止めについて（第 2 報），2021。
- 3) 元売正美，里隆幸，岸利治：コンクリート構造物の補修後の再劣化に及ぼす各種要因の影響，土木学会第 58 回年次学術講演

会，Vol.109，pp.217-218，2003。

- 4) 田中寿志，鳥取誠一，仁平達也：アクティブ赤外線法における照射条件に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.28，No.1，pp.1937-1942，2006。

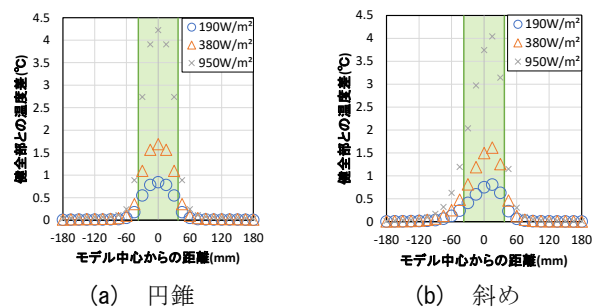


図 6 熱流束の違いによる健全部との温度差

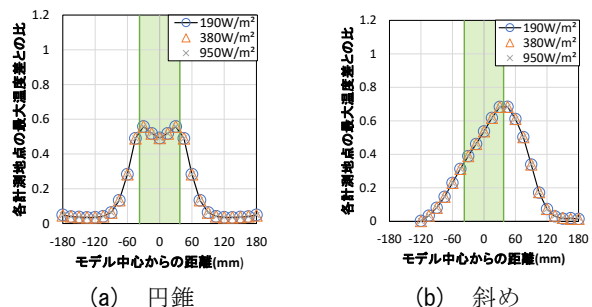


図 7 熱流束の違いによる各計測地点の最大温度差との比

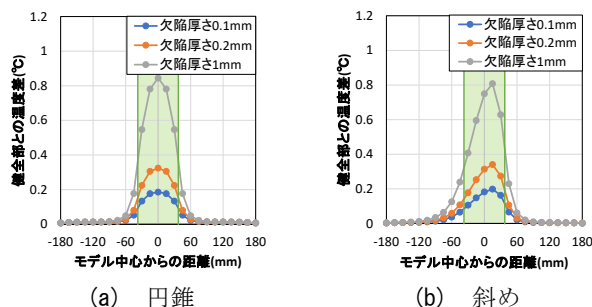


図 8 欠陥厚さの違いによる健全部との温度差

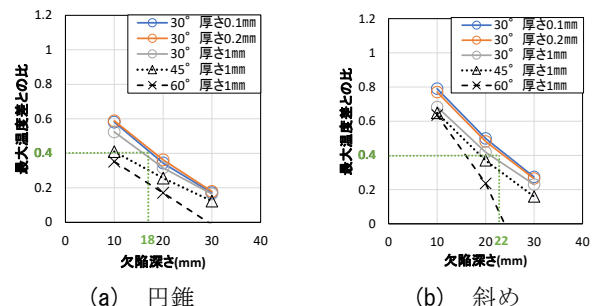


図 9 欠陥厚さの違いによる最大温度差との比と

欠陥深さの関係

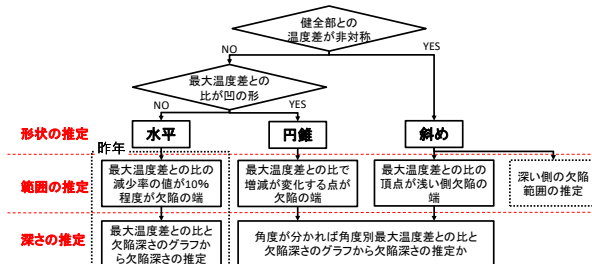


図 10 欠陥形状・範囲・深さの推定フロー