# コンクリート構造物の方位角および日射量を考慮した ひび割れ検知に関する研究

中央工学校 金光寿一 日大生産工 柳内睦人 日大生産工(院) 江藤 亮

1.はじめに

コンクリート構造物の変状箇所を抽出する 検査手法としては,非破壊で広範囲に診断が 可能なことからサーモグラフィー法が一次検 査として採用されている。しかし,太陽光を 利用したパッシブサーモグラフィー法では、 検出可能となる熱負荷条件が問題となり,表 面近傍部の変状は検出可能であっても,深く 進行したひび割れなどの損傷部については評 価できない可能性がある。このような問題を 解決するためには,コンクリート面への吸熱 量及び熱損失を低減する必要があり,既に筆 者らは熱吸収率の高い黒色アルミシートをコ ンクリート表面に密着させ, さらに軽量で適 度な空気層を有するエアーキャップで覆うこ とによりソーラーハウスと同様の熱量が供給 されることを確認している<sup>1)</sup>。ところが,この パッシブソーラー法を有効に利用する場合に は、季節によって太陽エネルギーが変化する こと,また対象物となるコンクリート面の方 位角及び角度(傾斜)が吸熱量に影響してくる ことから,両者の関係を明らかにしておくこ とが検出精度を高める上で重要となる。

そこで、本研究では非定常熱伝導解析から パッシブソーラー法が利用できるコンクリー トの方位について、入力日射量とひび割れ部 に生じる温度差から予測した。また,赤外線 カメラでの測定時には, エアーキャップを取 り外すことになり,コンクリート方位角別に 最適な時刻を検討した。

#### 2. 解析概要

日射量は、太陽光の高度及び方位角に影響 される。今回入力した日射量は秋分(9月23日) 期で、コンクリート面の方位は日の出側とし て北東面,東面,南東面及び南面の4面とし, 角度は鉛直とした。対象構造物は、コンクリ ート壁(両面日射)を想定したものであるが, 法面(片面日射)への適用についても検討した。



図-1 コンクリートのひび割れモデル

2.1 解析モデル

図-1(a),(b)には想定した2つのひび割れパ ターンを示す。コンクリートの厚さは210mm、 想定したひび割れの角度は、35°とし、幅は 0.2mm, 深さは140mmと180mmの位置から水平な 枝分かれを100mmとした2次元モデルである。 メッシュサイズは,ひび割れ部に向かって要 素密度が高くなるように分割し、ひび割れ内 部は幅0.2mm方向を2分割している。

2.2 入力日射量及び外気温

各方位角を有するコンクリート面への日射 量は、秋分期の太陽高度及び方位角から求め られる全天日射量を黒色アルミの吸収率(0.93 とした)及びエアーキャップの透過率(0.8とし た)を考慮して傾斜面(鉛直面:90°とした)直 達日射量<sup>2)</sup>に換算した(図-2参照)。なお、対象 とする位置は東京(緯度:35°41,経度:139° 46)とした。また,日射を受けない時刻の日 陰面には天空日射量の半分を入力した。図-3 には入力した外気温を,図-4(a)~(d)には各 方位面に入力した日射量を示す。 2.3 解析条件

表-1は解析に用いた熱特性である。エアー

Study of Crack Detection in Consideration of Azimuth of Concrete Structure and Quantity of Solar Radiation Juichi KANAMITSU, Mutsuhito YANAI and Ryou ETOU



(c)南東面-北西面 図-4 コンクリート方位別(面)の入力日射量(図-2に対応)

キャップと黒色アルミシートを用いたコンク リート上面の熱損失は,主にエアーキャップ (ポリエチレン)自体とエアーキャップの隔壁 空気層内の自然対流と考えられるため,対流 熱伝達係数は6 W/(m<sup>2</sup>・K)とし,反対面(日没 面)である南西,西,北西及び北面はコンクリ ートからの強制対流として熱伝達係数を21W/ (m<sup>2</sup>・K)とした。なお,入力する外気温は,日 射面側の相当外気温(雰囲気温度)と日陰とな る外気温とを区別しての入力が望ましいが, 本解析では等しいものとした。また,エアー キャップは図-1の上面に施したものとする。

### 3.解析結果

# 3.1 日射量とコンクリートの上昇温度

図-5(a),(b)は,図-4(c)の日射量で得られ たH140及びH180 のシミュレーション画像(14: 00)である。図-6(a),(b)には,図-4の日射量 から得られた健全部のコンクリート温度を示 す。なお,健全部温度は図-1に示す試験体モ デルの左端節点で得られたものである。

その結果,日射量とコンクリート温度との 関係は,当然のことながら直達日射を受ける 時間が長くなるほど上昇温度も大きくなり, 北面から南面のコンクリート温度は13.6 か ら36.0 まで22 もの温度差が生じている。

# 表-1 解析に用いた熱特性

| 材 料    | 密度                   | 比熱          | 熱伝導率      | 熱伝達係数                   |
|--------|----------------------|-------------|-----------|-------------------------|
|        | (kg/m <sup>3</sup> ) | [kJ/(kg⋅K)] | [W/(m·K)] | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
| コンクリート | 2,200                | 0.876       | 1.4       | 6(エアーキャッ<br>プの)         |
| ひび割れ   | 1.161                | 1.009       | 0.0256    | ノ面)<br>21(反対面)          |



#### (b)H180

図-5 シミュレーション画像(日射量:南北面)

表-2は,図-4の日射量で得られた最大上昇 温度とその時刻,また日の出からの積分日射 量の関係である。なお,実際の北東面の最大 上昇温度は,他の日の出面と比べて日没面よ りさらに遅い17:00に迎えているが,北東面へ の日射量と上昇温度との関係を明らかにする ために8:40分としている(図-6(a)参照)。この 遅くなる理由は,図-4(a)に示す日射量からも



(a) 北東,東,南東,南面(日の出面:モデル上)



(b)南西,西,北西,北面(日没面:モデル下) 図-6日射量とコンクリート温度

| 仏 5 政八上开加及し的の | 表-2 | 最大上 | 昇温度 | と時刻 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|
|---------------|-----|-----|-----|-----|

|              | 最大上昇温度( ) / 積分日射量(W/m <sup>2</sup> ·h) |           |           |           |  |
|--------------|--|-----------|-----------|-----------|--|
| 日の出面<br>(上面) | 北東面(a)                                 | 東面(b)     | 南東面(c)    | 南面(d)     |  |
|              | 8:40                                   | 9:20      | 11:00     | 13:40     |  |
|              | 10.8/622                               | 26.0/1570 | 34.2/2597 | 36.0/3124 |  |
| 日没面<br>(底面)  | 南西面(a)                                 | 西面(b)     | 北西面(c)    | 北面(d)     |  |
|              | 14:40                                  | 15:20     | 16:00     | 15:40     |  |
|              | 27.2/2545                              | 26.3/1906 | 18.8/995  | 13.6/581  |  |

分かるとおり,午後には南西面の方が明らか に大きくなるため蓄熱された南西面からの熱 伝達が影響したものである。北面についても 南面からの熱伝達によって最大上昇温度が遅 くなっている。従って,上昇温度の大きさか らも北面(0°)から北東面(45°)の間に位置す るコンクリート構造物では,日射時間が短い ためにパッシブソーラー法は利用できない可 能性がある。鉛直な壁構造であれば,エアー キャップは反対面となる南西面での設置が有 効となる。このような各面のコンクリート温 度からひび割れが検知できるのかについては, ひび割れ部が示す温度変化から検討した。

3.2 コンクリート温度とひび割れ検知

図-7(a),(b)は,図-1に示すモデルの上面(日の出面)の左端から450mm(H140)と510mm(H180)の位置の健全部との温度差変化である。この





(b)H180(左端より510mm) 図-7 ひび割れ部の温度差変化(上面)



図-8 ひび割れ発生箇所の温度差変化(底面)

位置は、日射量から枝分かれした水平なひび 割れ上部に熱が蓄積されて最も温度差が大き くなる箇所である。その水平なひび割れ上部 とコンクリート上面までの寸法は、H140で70 mm、H180では30mmである。一方、図-8には日 没面でのひび割れ発生箇所(ひび割れ幅の進展 方向境界位置)と健全部との温度差変化を示 す。なお、このH140とH180の時系列温度差変 化はひび割れ幅、角度が同じで水平な枝分か れ位置が140mm、180mmと深いために同じにな っている。このような特徴を有する温度変化 から診断指標を構築するためには、エアーキ ャップを取り外す時刻を方位面別に定量化す ることが必要である。

先ず、日の出面では最大温度差が現れる時



図-9 日の出面側の温度変化(上面)



図-10 日没面の温度変化(底面)

刻はひび割れ面とコンクリート面との距離に よって異なる。従って、エアーキャップを外 して測定する時刻は、可能な限り深い位置ま で潜在するひび割れまでが評価できるように 設定する必要がある。図-9には,図-7(a),(b) の最大温度差が得られた両者の中間時刻での 温度変化を示した。この温度差からひび割れ が評価可能か否かでは、使用する赤外線カメ ラの温度分解能に影響される。最新の赤外線 カメラの温度分解能は0.025 であり,反射及 び機械的ノイズを考慮すると評価には3倍程度 (0.08)の温度差が必要である。日の出面の ひび割れ評価は,図に示すように2次曲線状の 温度分布変化が現れており,内部には水平な 変状部が潜在していることが分かる。特にH18 0では2次曲線の非対象性から図-1に示すひび 割れを想定することができる。しかし,ひび 割れ領域では両者ともに熱拡散から実際の領 域よりも若干大きく評価することになるが, ひび割れ発生位置(200mm)を確認することがで きる。なお,H140(北東)の温度差は0.1 程 度であり、誤診を起こす危険性がある。

一方,図-10は両面日射を受ける場合の日没 面の温度差変化である。この温度差変化は図-8に示す最大温度差が得られた時刻のもので, どの時刻においてもH140とH180はほぼ同じ温 度差変化となり,ひび割れの方向は各方位で 確認可能なものの,図-1のようなひび割れの 形態を評価することはできない。また,この 北西面及び北面の温度差変化(17:40)は,日の 出面日射量からの熱伝達が影響しており,片 面日射では温度差がさらに小さくなるものと 思える。

このパッシブソーラー法による集熱効果は, 標準試験体との比較実験から上昇温度で20 以上の有意差が得られることを確認している (本概要集に掲載)。本報告は秋分期の一例で コンクリートの両面から日射を受ける場合を 想定したものであるが,図-4に示す日射パタ ーンは各地の緯度及び経度,コンクリート方 位,傾斜角が既知であれば算出が可能で,コ ンクリートの上昇温度の大きさ、またその時 刻を予測することができる。

今後,日射量と相当外気温の関係,測定の 途中から曇りになった場合の日射量の推定や ひび割れなど内部変状の形態とエアーキャッ プを取り外す時刻及びその後の温度変化との 関係を明らかにすることで検出精度や評価の 向上につながるものと考える。

# 4.まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

(1)日射パターンは,年間を通して予測可能で あり,コンクリートの方位及び傾斜角別に上 昇温度を予測することができる。

(2)コンクリートの方位と最大上昇温度となる時刻には良好な相関性があり,エアーキャップを外しての測定時刻が事前に予測できる。
(3)秋分期前後の日射パターンでは,北面から北東面は日の出からの日射時間が短く,パッシブソーラー法は利用できない。

(4)東面から南面では,日の出からの日射量から幅0.2mm,深さ70mmの枝分かれしたひび割れ 形態を評価することができる。

(5)ひび割れ発生面である日没面では,ひび割 れ角度が35°,幅0.2mm程度で深く進展したひ び割れは進展方向の評価は可能なものの,領 域を正確に評価することは困難である。

#### 参考文献

- 金光寿一・柳内睦人・江藤亮:太陽光促進 加熱からの熱伝達を利用したコンクリート 内部のひび割れ評価,コンクリート構造物 への非破壊検査の展開論文集,pp.85-94, (社)日本非破壊検査協会,2006.8
- 2) 金山公夫・馬場弘:ソーラーエネルギー利 用技術, pp.26-41, 森北出版㈱