

平成21年 5月20日現在

研究種目：基盤研究(C)	
研究期間：2007～2008	
課題番号：19560487	
研究課題名（和文）	パッシブソーラー加熱を適用したサーモグラフィ法による 損傷診断指標の構築
研究課題名（英文）	CONSTRUCTION OF DAMAGE DIAGNOSIS INDEX BY THE THERMOGRAPHY METHOD USING PASSIVE SOLAR HEAT
研究代表者	
柳内 睦人 (MUTSUHITO YANAI)	
日本大学・生産工学部・教授	
研究者番号：10060039	

研究成果の概要：

2007年度は、太陽光の集熱効果を利用し、どの程度の熱量が供給されれば進展したひび割れが抽出できるのか、その集熱材料の選定や評価方法について基礎実験及び熱伝導解析から検討した。その結果、実験に使用した吸熱材料の種類によって吸熱効果に差異が生じ、最も温度上昇が大きかったのはエアークャップの粒径 32mm・粒高 13mm と黒色アルミシートの組み合わせで、標準試験体よりも 22.0℃の有意差が得られた。一方、2008年度は、降雨後のコンクリート診断への影響について検討を行った。その結果、降雨によってコンクリート表面が濡れている場合には日射吸収率が大きくなり、乾燥しているよりも大きな温度上昇が得られ、欠陥検出においても高含水率の影響から蓄熱性が向上し、より大きな温度差となることが分かった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
年度			
総計	800,000	240,000	1,040,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・非破壊検査

キーワード：サーモグラフィ法、パッシブソーラー、ひび割れ検出、熱伝導解析

1. 研究開始当初の背景

サーモグラフィ法から連続したコンクリート壁面の損傷診断を行う場合、太陽光を利用したパッシブ法が有効である。しかし、太陽エネルギーからの熱源では表面近傍部の変状は検出可能でも深く進行したひび割れや内部損傷については熱拡散から評価できない可能性がある。その解決方法としては、パッシブソーラー法と同様に太陽エネルギーの促進利用と、壁面構造では日射面から反

対面への透過熱の利用が考えられる。

一方、測定時の気象条件は晴れ、曇り、雨の繰り返しで日々変化するため日射量が異なり、また、構造物の方位や角度によっても日射吸収量が異なるため得られた熱画像が最適な診断結果であるのかという疑問があり、この点を明らかにしなければ精度良く内部診断を行うことができない。パッシブサーモグラフィ法による欠陥検出については、これまでも多くの研究が行われており、例

えば診断する時間帯では、外気温が最高となる時刻 10:00~14:00 の範囲で温度差が最も大きく、その後外気温が低下すると表面温度差も減少するようになり、時刻 15:00~21:00 になると、空隙部の表面温度は日中とは逆に周辺部の表面温度よりも低くなることなどが明らかにされている。しかし、日射量は雲量によって日射波形が時々刻々変化するものと思われ、また、降雨後にはコンクリートへの含水が上昇温度に影響を及ぼすことになる。

2. 研究の目的

本研究(2007年度)では、コンクリート面への施工性及び経済性を考慮した太陽光の集熱効果を高める集熱材料(エアークャップ、ビニールシート、凸型レンズシートなど)及びコンクリート表面を覆うアルミ箔の選定によって、どの程度の日射量が供給されればコンクリート面がどの程度温度上昇し、どの程度の大きさの変状部が評価できるのかを室内及び屋外実験から検討した。さらに、二次元非定常熱伝導解析によるひび割れ評価では、日射側に発生及び日陰側に発生したひび割れ部の温度変化を明らかにした。また、ひび割れ評価では RC 梁を作製してパッシブソーラー加熱の有効性について検討した。実験は、静荷重載荷実験後に RC 梁上面を黒色アルミで密着させ半透明のエアークャップで密封し、上面から熱伝達されて得られた反対面の表面温度変化と発生したひび割れ進展状況との関係からひび割れ評価について明らかにした。

一方、測定時の気象条件は晴れ、曇り、雨の繰り返しで日々変化するため日射量が異なり、また、構造物の方位や角度によっても日射吸収量が異なるため得られた熱画像が最適な診断結果であるのかという疑問が残る。

そこで、本研究(2008年度)では、入手した日射量とコンクリート温度データ及び二次元非定常熱伝導解析から最適な診断結果を得るための気象条件や撮影時間を明らかにした。特に、降雨後の影響については、乾燥試験体と水中浸漬試験体から健全部及び欠陥部の温度上昇変化の違いについて検討した。さらに、方位の異なるコンクリート壁面にはどの程度の熱量が供給され、損傷部がどの程度の温度差が得られるかを二次元非定常熱伝導解析から算定して、水平面全天日射量と入力日射量との関係から各方位別に最適な診断予測を試みた。

3. 研究の方法

〈2007年度〉

太陽光を利用したコンクリート表面の集熱材料は、材料の熱特性や色の違いあるいは

その設置方法によって日射吸収率や放射率に差が生じることになる。その吸熱量及び温室効果(断熱効果)を期待する集熱材料には、空気層を有するエアークャップ、ビニールシート、凸型レンズシート及び赤外線を完全に吸収する黒色アルミ箔を利用してコンクリート表面の上昇温度を確認した。基礎実験では、ハロゲンランプを利用してエアークャップの粒径・粒高の相違による集熱効果を、また、屋外実験では太陽光を利用して日射量の測定値から各種集熱材料と集熱材料を設置しない標準試験体との温度上昇差を明らかにした。

一方、静荷重の載荷によって曲げ及びせん断ひび割れを発生させた RC 梁試験体では、基礎実験と同様の集熱材料を用いてコンクリートの温度上昇とひび割れ温度との関係を明らかにした。さらに、二次元非定常熱伝導解析を用いたシミュレーションでは、実験で得られた日射量を入力して、パッシブソーラー法で得られるコンクリート表面の再現性について検討を行った。特に、その再現では集熱材料の日射透過率、黒色アルミシートの吸収率及びコンクリート表面を覆う日射面の熱損失を考慮した熱伝達係数値を算定した。

〈2008年度〉

本研究では、横浜市港北区役所から入手した日射量とコンクリート温度の関係より、その日射波形の特徴から最大温度となる時刻の相違を明らかにした。また、降雨後の診断への影響については、ハロゲンランプによる室内実験ならびに太陽光を利用した屋外実験で検討した。さらに、二次元非定常熱伝導解析では、計測されたコンクリート温度との比較を行い、降雨後の温度変化の再現性について検討した。

4. 研究成果

2007年度の研究では、実験に使用した吸熱材料の種類によって集熱効果に差異があり、最も上昇温度が大かったのはエアークャップの粒径 32mm・粒高 13mm で、標準試験体よりも 22.0℃の有意差が得られた。太陽光の集熱効果に共通していることは、集熱材料が半透明であることと黒色アルミの併用である。試験体に生じた温度上昇の差は、エアークャップとアルミ箔との間に介在する空気層の対流がエアークャップでは密着したエアークャップの隔壁によって熱損失が抑制され集熱効果が得られたものと考えられる。また、RC 梁の実験(9月14日)では、エアークャップからのコンクリートの温度上昇は、12:50に 47.6℃となっており、外気温より約 15℃ほど大きい。この温度上昇は、屋外実験で行った基礎試験体の結果とほぼ一致している。一方、RC 梁の底面温度の最

大値は、15:30に34.1℃となり測定開始時よりも約8℃ほど上昇している。その壁面構造を想定したRC梁の実験では日射面から反対面への透過熱によってひびわれ進展状況を温度差から評価できることも確認された。そのひび割れ評価は、発生したアーチ状のひび割れ及び底面付近で枝分かれしたひび割れから熱移動が遮断されて健全部と比較すると放物線状に0.35℃程度の低温域が確認された。底面の温度変化は、測定開始時からの外気温の上昇によって底面には熱が蓄積されるが、13:30以降は上面からの熱伝達からひび割れ部は健全部よりも低温域を示すことになる。

今後、晴天から曇りになった場合の影響、集熱材料を外した後の日陰面への熱伝達量、構造物の方位及び角度の影響を検討する必要があるが、エアークャップの取り扱いが簡単であり広範囲の検査に適用できるものと考えられる。

次に、二次元非定常熱伝導解析では、エアークャップの日射吸収率は0.85、熱伝達係数は促進材料面を太陽光発電パネルシステム(水平空気層)とほぼ同様の $6\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 、直達日射量のみを変化させて実験値の温度上昇変化になるようにシミュレーションを繰り返し日射量を同定した。

その結果、日射面からのひび割れ領域評価は2次曲線状の温度分布変化が現れ、その領域から判断することになるが、枝分かれしたひび割れ水平面に蓄積された熱量がよどみ点を中心とした熱拡散から実際の領域よりも温度変化領域が50mm程度大きくなっている。しかし、その温度分布変化は日射面からもひび割れ発生位置を精度良く評価することができる。また、深さの評価は温度差となって現れているが、あくまで日射面から近いから遠いかの相対比較となり、枝分かれした水平面までの寸法を評価することは困難である。

実務のひび割れ評価では、ひび割れの発生は目視から可能であっても、内部での枝分かれなどの進展状況は分からないため、測定時刻には何らかの目安が必要となる。最大温度差を示した時刻と日射量と外気温の最大値が示す時刻とを比較すると、日射側は枝分かれしたひび割れ面の位置が表面から離れるほど最大温度差が遅れて現れてくることから、最大日射量及び外気温を示す時刻(12:00)よりも1~2時間程度遅らせて促進材料を外して測定することが望まれる。

一方、2008年度の研究では、降雨後のコンクリート診断への影響について検討を行った。その結果、降雨によってコンクリート表面が濡れている場合には日射吸収率が大きくなり、乾燥しているよりも大きな温度上昇が得られ、また内部の欠陥検出においても

高含水率の影響から蓄熱性が向上し、より大きな温度差となることが分かった。特に、欠陥部の温度は、含水量が大きいほど熱伝導率及び比熱が大きくなり欠陥部前面に熱が蓄積されたものと思われ、含水試験体の方が大きな上昇温度を得ていることが温度差から確認できた。一般に、コンクリートの比熱は $0.88(\text{kJ}/\text{kgK})$ 、水は $4.2(\text{kJ}/\text{kgK})$ で内部に残っている水分が熱媒として蓄熱されたものとする。その日射受熱による水分蒸発量の経時変化は、欠陥部が浅いほど欠陥部上面の含水率低下が著しく、深さ40mmまでの健全部の含水率低下は極僅かである。日射受熱による水分蒸発量の経時変化は時刻7:00から17:00まで積算日射量 $6,851\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ を受けている場合、僅か0.6%程度の減少である。また、翌日の含水率変化の減少は見られなくなる。このようにパンプサーモグラフィ法による内部診断は、太陽エネルギーによって欠陥部(空洞・空隙)の前面に蓄積される熱量を期待するもので、降雨によって吸水された水分分布が蓄熱量に影響するものと考えられる。

港北区役所屋上で測定された8月のコンクリート温度は、前日あるいは前々日が雨天の場合には同積算日射量と比較すると5℃以上も大きい特異な上昇を示した。その特異な温度上昇を示す気象条件は、降雨後の積算日射量は $2,000\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 以上、日射波形の割合は0.75以上である。コンクリート表面の温度上昇変化の理由は、表面が濡れている方がコンクリート表面の濃淡が乾燥時の灰色よりも濃く日射吸収率が大きくなること、また表面部に水分を含んでいる方が乾燥している場合よりも反射率が小さくなることが要因と思われる。従って、このような特異な温度上昇はコンクリート表層部の水分状態に影響を受けているものと思われ、気象条件によっては降雨後2日目に現れる場合がある。コンクリート表面の温度上昇は、積算日射量が $3,000\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 以上の場合には積算日射量と比例関係にあり、温度上昇量及び最大温度となる時刻が積算日射量から精度良く推定できる。欠陥部が最大温度を迎える時刻は、積算日射量が $3,000\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 以上の場合には13:30~14:26の範囲、 $2,000\sim 3,000\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 未満の場合には12:11~14:41の範囲、また $2,000\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 未満では10:28~15:42の範囲と日射量が弱くなるほどばらつきが大きくなる。また、降雨の影響では同積算日射量に対して1時間ほど早くなることが確認された。

熱伝導解析で得られた健全部の温度変化は、雨天日では実測との間に温度差が生じるものの、降雨後では熱特性が一定にも拘わらず最大温度は良く一致した。日射受熱による

水分蒸発量の経時変化は僅かであり、蒸発潜熱による温度低下はみられない。解析からの表面温度変化は、熱パラメータ(c, ρ, λ)が大きくなるほど健全部の表面温度は低下する。実験では乾燥しているよりも濡れている方がアルベードは減少し、日射吸収率が増加して温度上昇量が大きくなったものと考えられる。欠陥部の温度変化は健全部の温度変化とは異なり、高含水率の方が温度差上昇量が大きくなり欠陥検出に有効である。その最大温度差は熱拡散率に比例して大きくなり、最大温度差が現れる時刻は遅くなる。

また、構造物の方位別による影響では、最大温度時刻及びその日射積算量も推定が可能で、その値から温度上昇を予測することができる。さらに、その方位と最大上昇温度となる時刻との間には良好な相関性があることが明らかにできた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

- (1) 金光寿一, 柳内睦人 : 降雨を利用したパッシブサーモグラフィ法によるコンクリート内部診断への有効性に関する研究, セメントコンクリート論文集, No. 62, pp. 205-212, 2009. 2(査読有り)
- (2) 金光寿一, 柳内睦人, 江藤 亮 : パッシブサーモグラフィ法による降雨後のコンクリート診断への有効性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 751-756, 2008. 7(査読有り)
- (3) 江藤 亮, 柳内睦人, 金光寿一 : パッシブソーラーの吸熱効果を利用したサーモグラフィ法によるコンクリートの損傷診断予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 673-678, 2007. 7(査読有り)

[学会発表] (計 7件)

- (1) 金光寿一 : パッシブサーモグラフィ法による欠陥診断に及ぼす降雨の影響, 第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2009. 3. 14, 千葉工業大学
- (2) 金光寿一 : パッシブサーモグラフィ法による欠陥検出と降雨の関係, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008. 9. 10, 東北大学
- (3) 金光寿一 : サーモグラフィ法の役割と課題, (社)日本非破壊検査協会・鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会・赤外線サーモグラフィによる非破壊評価特別研究委員会セミオープン合同特別研究委員会, 2008. 7. 17, 東京理科大学森戸会館

- (4) 金光寿一 : パッシブサーモグラフィ法による降雨後のコンクリート診断への有効性に関する研究, コンクリート工学年次大会 2008, 2008. 7. 9, 福岡市
- (5) 金光寿一 : パッシブサーモグラフィ法に影響を及ぼす気象条件と最適診断, 第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2008. 3. 10, 芝浦工業大学
- (6) 江藤 亮 : 熱伝導解析によるコンクリート壁面の方位別診断予測, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007. 9. 13, 広島大学
- (7) 江藤 亮 : パッシブソーラーの吸熱効果を利用したサーモグラフィ法によるコンクリートの損傷診断予測, コンクリート工学年次大会 2007, 2007. 7. 11, 仙台市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳内 睦人 (MUTSUHITO YANAI)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号 : 10060039