AEとX線CTを用いたレンガの凍害発生プロセスの詳細観察

Detailed observation of frost damage process of bricks using acoustic emission and X-ray Computed Tomography

北見工業大学	工学部	社会環境工学専攻	○学生員	宮川郁朗	(Ikuro Miyakawa)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正会員	中村 大	(Dai Nakamura)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正会員	川口貴之	(Takayuki Kawaguchi)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正会員	山下 聡	(Satoshi Yamashita)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正会員	川尻峻三	(Shunzo Kawajiri)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科		渡邊達也	(Tatsuya Watanabe)

1. はじめに

寒冷地において、レンガのような多孔質材料を建築、 土木材料として使用する場合には、必ず凍害という問題 が付きまとう.北見市内でも、複数箇所において、凍害 が原因と思われるレンガのひび割れが確認された.写真 -1 にその例を示す.写真-1(a)のレンガは花壇に使用さ れていたもので、地表面付近にレンガを二分する大きく 開口したひび割れを確認することができる.このような レンガのひび割れは花壇でのみ発生するわけではなく、 レンガで構築された構造物でも確認することができた. 写真-1(b)は JR 北見駅駐車場において発生したレンガ 壁のひび割れの様子である.写真から確認できるように、 レンガ壁の最上部には亀甲状のひび割れが多数発生して いた.以上のようなレンガのひび割れは北見市内に限ら ず、北見市より寒冷な陸別町でも確認されている.

多孔質材料の凍害現象に関する研究は、古くから多く の研究者によって行われており、様々な説が存在してい る.ここでは、代表的なものとして、コンクリートの凍 害機構を説明した Powers ら¹⁾の説について述べる. Powers らはコンクリートの凍害を、間隙中の水分が凍 結する際に発生する 9%の体積膨張が、未凍結の水分を 移動させ、これに伴う圧力(水圧)がクラックを生じさ せると説明している.これは一般に水圧説と呼ばれるも ので、コンクリートの凍害機構の基本となる説である. しかしながら、Powers らの説は多孔質材料内部の凍害 発生メカニズムについて詳細に検討しているものの、実 際の寒冷地で発生する冬期の気温変動については、全く 考慮がなされていない.

上記を踏まえ、中村らは現地調査と暴露実験²⁾,室内 における再現実験^{3),4)}を行って、レンガおよびレンガ構 造物のひび割れ発生メカニズムを明らかにした.中村ら は上記の研究で明らかにしたレンガのひび割れ発生メカ ニズムを閉塞型の凍結融解現象と定義している.このメ カニズムでは寒冷地における冬期の気温変動についても 十分な考慮がなされており、筆者らはこのメカニズムで、 様々な多孔質材料で発生する凍害現象を説明することが 可能であると考えている.閉塞型の凍結融解現象につい ては、後で詳細に述べる.

本研究ではこれまでの研究をさらに進め, AE (Acoustic Emission) 計測システムと X 線 CT (X-ray Computed Tomography) を用いて、レンガの凍結による ひび割れ発生プロセスの詳細を明らかにすることに取り



図-1 レンガのひび割れ発生プロセス

組んだ.具体的には,AE 計測システムを用いてレンガ 内のひび割れ発生源の推測および破壊の規模の計測を行 い,X線CTを用いてレンガ内に発生したひび割れの詳 細な観察を実施した.

2. 閉塞型の凍結融解現象によるレンガのひび割れ

ここでは、花壇に設置されたレンガを例に、中村らが 明らかにしたレンガのひび割れ発生メカニズムについて 説明する.

中村らは、現地調査の結果から、日当たりの良い場所 に設置されたレンガにひび割れが多く発生すること、ひ び割れは地表面から突き出したレンガの上部において発 生することを明らかにした.また、暴露実験の結果から、 レンガのひび割れが2月下旬から3月上旬にかけての晩 冬に発生することも明らかにした.

また、暴露実験²⁾と室内における再現実験³⁾の結果か ら、ひび割れの発生プロセスについても明らかにした. 図-1 にレンガのひび割れ発生プロセスを模式的に示す. 晩冬、夜間の寒気によって最深部まで完全に凍結してい たレンガは、日中の日差しや暖気によって表面から融解 していく.ただし、晩冬は日差しが弱いため、レンガは 完全には融解しない.レンガの上部は融解しているが、 下部は凍結したままである.この状態で夜を迎えると、

平成27年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第72号

表-1	レンガの物性値
10 1	

吸水率(%)	12.2	
空隙率(%)	24.7	
かさ比重	1.98	
見かけ比重	2.63	
弾性波速度(km/s)	乾燥	2.49
	湿潤	2.97
圧縮強度(MPa)	乾燥	51.6
	湿潤	45.4
引張強度(MPa)	乾燥	3.64
	湿潤	3.73

日中に発生した融解部分は夜間の寒気によって閉じこめ られるように再凍結することになる.このため、レンガ の上部に存在する水分は閉塞するように凍結し、内部圧 力が高まり、レンガが割れる.本研究では上記の凍結融 解現象を、閉塞型の凍結融解現象と定義する.

3. 実験概要

本研究では花壇で発生したレンガのひび割れを模擬し て室内実験を実施した.レンガを凍結融解させることに よって発生するひび割れを,AE 計測システムと X 線 CT を用いて詳細に分析した.

3-1. 供試体

実験には市販の普通レンガを用いた. 表-1 にその物 性値を示す(物性値の計測方法等については中村ら³⁾を 参照). レンガは密度が大きく X 線の透過が困難であ ったため,通常のレンガの寸法の1/2(縦10cm,横5cm, 厚さ3cm)にカットしたものを使用した. このレンガを 蒸留水中で真空ポンプを用いて 24 時間かけて脱気し, 数日間放置して,重量変化がなくなるまで湿潤させた. 以上のように,強制的に湿潤させるため,実験に用いた 供試体はほぼ含水飽和状態である.

3-2. 実験装置

図-2 に実験装置を示す.図のように、プラスチック 製コンテナ内に2本のレンガを設置して実験を行った. 2本のレンガの周囲には北見市内で採取した風化火山灰 を敷き詰め、上部が地表面から出るようにしている.図 -2 左側のレンガはAE計測用で、AE センサを4つ取り 付けており、再凍結時にはひび割れていく様子を一眼レ フカメラで撮影した.また、実験後にはX線CTを用い て形成されたひび割れの内部観察を行った.図-2 右側 のレンガは温度計測用で、15本の温度センサを設置し ている.この温度センサから得られたデータを用いて、 供試体温度分布図を作成した.この温度分布図は供試体 断面を 5mm メッシュに分け、センサ間の温度を単純な 比例配分で算出して作成したものである.

3-3. AE 計測システム

AE とは固体が変形あるいは破壊時に発生する音を弾 性波として放出する現象のことである. 岩盤の分野では, 古くから利用されている技術であり, AE を測定するこ とで, 岩盤の破壊を予知することが試みられてきた.

本研究では4 つのセンサで計測された AE 波(図-3) をオシロスコープで記録する. AE 波のうち, しきい値 2.0V を超えるものを AE イベントとし, しきい値を超



図-4 レンガの融解及び再凍結方法

えた回数を積算したものを AE count とした. また, 各 センサで計測された AE 到達時刻差から AE の発生位 置を推定でき, AE 最大振幅から破壊の規模を計測する ことが可能である.

3-4. 凍結融解方法

凍結融解は、上記で述べた実験装置を恒温装置に入れ て行った.まず、恒温装置の温度を北見市の晩冬の気温 を模擬して-15℃ に設定し、レンガ全体を凍結させる. その後、設定温度を+15℃ とし、レンガ全体を融解させ る.融解は、図-4 のように、融解領域を小さくしたケ ースと大きくしたケースの2ケースで行った.融解を確 認した後、レンガを再凍結させる.このように再凍結さ せると、融解領域を小さくしたケースではレンガ上部の 上面付近に、融解領域を大きくしたケースでは未凍結部



分が地表面付近に形成されることとなる. レンガ全体の 凍結を確認した後,設定温度を+15℃とし,再度融解さ せて実験を終了させる.

4. 実験結果と考察

本研究では凍結時の恒温装置の設定温度を-15°C とし て、融解領域を小さくした実験を1回、融解領域を大き くした実験を2回行った.ただし、融解領域を小さくし たケースでは、これまでの研究結果と同様、再凍結時に おいてレンガにひび割れが発生したものの、融解領域を 大きくしたケースでは2回中、1回においてひび割れが 発生しなかった.以降、融解領域を小さくしてレンガに ひび割れが発生した実験をケース(a)、融解領域を大き くしてひび割れが発生した実験をケース(b)、ひび割れ が発生しなかった実験をケース(c)として、それぞれの 結果について述べていく.

4-1. 供試体の内部温度と AE count の経時変化

図-5 に各ケースにおける供試体温度と AE count の経時変化を示す.図には,供試体に設置した 15 本の温度 センサのうち供試体中央の CH5, CH8, CH11 の値と, 4 つの AE センサで計測された AE count の平均値を示し ている.図-5(a),(b)から,ひび割れが発生したケース (a),ケース(b)では再凍結時および再凍結後の融解時に AE count が大幅に増加していることが確認できる.こ の再凍結時の AE count の急増加はひび割れの発生に起



因しているが、その詳細については後に述べる. 再凍結 後の融解時における AE count の大幅な増加は、再凍結 時にひび割れ中に存在する氷が融解し、開口していたひ び割れが閉塞したためだと考えられる. 図-5(c)のひび 割れが発生しなかったケース(c)に着目すると、再凍結 後の融解時には AE はほとんど発生していないことが確 認できる. このことから、再凍結後の融解時に発生する AE は、再凍結時に発生したひび割れの閉塞が原因であ るという確証が得られた.

次に、再凍結時における AE count の急増加について 考察するため、図-5(a).(b)の赤枠で囲った箇所を拡大 して, 図-6(a), (b) に示す. ただし, 融解領域を大きく したケース(b)で発生したひび割れはヘアクラックであ り、一眼レフカメラの撮影画像からは目視確認すること ができず、ひび割れの発生時刻を特定できなかった.こ のため、図-6(b)にはひび割れ発生時刻を示していない. 両図から、ケース(a)、ケース(b)ともに、再凍結開始か ら約 10 分後には, 温度センサ CH5 および CH8 が 0℃ 付近で一定となっている.この時間以降,レンガ上部中 央付近の水分は氷へ相変化しており、体積膨張により内 部圧力が高まっていると考えられる. レンガ上部中央の 温度が 0℃ 付近で一定となった後,ケース(a)では 9 分 後,ケース(b)では 20 分後から, AE count が急増加して いることが確認できる.この時、レンガ内部では微細な クラックが発生、伸展していることが推測できる.融解 領域が大きいケース(b)では、小さいケース(a)に比べて、 AE count が急増加するまでにかかる時間が長いが、こ れは融解領域が大きい場合, レンガ中の水分が多く凍結 し始めるまでに時間を要するからだと考えられる. その 後,ケース(a)では 21 分後(27.43 時間) にレンガ表面 にひび割れが確認できた.ひび割れ発生後,ケース(a)

では供試体温度が下がり始め, AE count が急増加して から約 15 分後にはその変化は小さくなり安定した. こ の時,温度センサ CH5 および CH8 の温度が-5℃ に達 しており,レンガ上部の水分が概ね凍結し終えたと考え られる.このため,新たなクラックも発生しなかったと 思われる.このような AE count の変化は,ひび割れの 発生時刻を特定できなかったケース(b)においても同様 であると考えられる.

4-2. 実験終了後の供試体の CT 画像と AE 発生位置,ひ び割れ発生時の温度分布

図-7 にケース(a),ケース(b)における実験終了後のレンガ上部の写真と供試体の奥行き方向中央(1.5cm)の断面における X線 CT 画像,この X線 CT 画像と AE 発生位置を重ね合わせた画像,ひび割れ発生時の温度分布図を示す.ただし,ケース(b)ではひび割れの発生時刻を特定できなかったため,温度分布図については AE count の急増加時のものを示している.また,このケースでは正面から目視できた写真右下の水平方向のひび割れの他に,背面にも縦方向にひび割れが入っていることが確認できたため,それらが確認できる断面(背面より0.1cm)の X線 CT 画像についても示している.

図から, AE が密集している部分とひび割れが概ね良 い一致を示していることが確認できる.また,重ね合わ せた画像と温度分布図を比較すると,未凍結部分と AE の密集している部分も概ね一致していることが確認でき る.これらのことから, AE の密集している部分が内部 圧力の発生源であると推測できる.

それぞれのケースの内部圧力の発生源と自由面までの 距離に着目すると、融解領域を小さくしたケースでは上 面までの垂直距離の方が側面までの水平距離より短く, 融解領域を大きくしたケースでは側面までの水平距離の 方が上面までの垂直距離より短いことがわかる.このこ とから、いずれのケースにおいても、クラックは内部圧 力の発生源から自由面までの距離が短い方向へと伸展し やすかったと考えることが妥当である.

5. まとめ

レンガが凍結融解する際に発生する AE と内部温度の 変化を計測することで、凍害によってレンガがひび割れ るプロセスを詳細に観察することができた.また、AE 計測により内部圧力の発生源を特定することが可能とな り、これと X線 CT 画像を重ね合わせることで、クラッ クの伸展プロセスを合理的に説明することができた.

参考文献

- T. C. Powers and T. L. Brownyard: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Journal of the American Concrete Institute, 18 (1947), 933-969
- 中村大、後藤隆司、伊藤陽司、山下聡、鈴木輝之、 山崎新太郎:北海道北見市において発生した煉瓦の 凍害現象、Journal of MMIJ, Vol.127, No4/5, pp.219-229, 2011
- 中村大、後藤隆司、伊藤陽司、山下聡、鈴木輝之、 山崎新太郎:煉瓦の凍害機構に関する検証実験、 Journal of MMIJ, Vol.127, No6/7, pp.256-266, 2011
- 中村大、後藤隆司、川口貴之、伊藤陽司、玉井啓博、 千葉貴久:レンガ構造物の凍害メカニズムの解明 資源・素材学会北海道支部、平成 25 年度春季講演会 講演要旨集, pp.13-14, 2013



図-7 実験後のレンガ上部の写真とX線CT画像,AE発生位置の重ね合せ画像,ひび割れ発生時の温度分布図