

# 3次元波動伝播シミュレーションを用いた コンクリートひび割れの自己治癒評価手法の検討

奥出 信博\*, Gerlinde Lefever\*\*, 麻植 久史\*, 塩谷 智基\*\*\*

## Evaluation method of self-healing state on concrete cracks using three-dimensional wave propagation simulation

Nobuhiro Okude\*, Gerlinde Lefever\*\*, Hisafumi Asaue\*, Tomoki Shiotani\*\*\*

\*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 202, Innovation Plaza Kyoto, Nishikyo, Kyoto 615-8245

E-mail: okude.nobuhiro.2w@kyoto-u.ac.jp, E-mail: asaue.hisafumi.7a@kyoto-u.ac.jp

\*\*ブリュッセル自由大学 Department of Mechanics of Materials and Constructions, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussels, Belgium, E-mail: Gerlinde.Lefever@vub.be

\*\*\*京都大学経営管理大学院 Consortium of Innovative Technique for Infrastructures, Kyoto University, 202, Innovation Plaza Kyoto, Nishikyo, Kyoto 615-8245, E-mail: shiotani.tomoki.2v@kyoto-u.jp

キーワード: コンクリート, 自己治癒評価, 弾性波, 3次元波動伝播シミュレーション

Key words: concrete, evaluation of self-healing, elastic wave, 3D numerical simulation

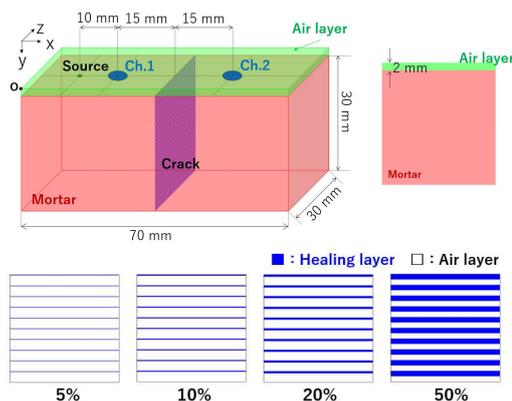
### 1. はじめに

従来、コンクリート構造物に生じたひび割れは、エポキシ樹脂などの有機系あるいは無機系の補修材料を用いて補修（注入あるいは充填）される。近年、コンクリート自らがひび割れを修復する、いわゆる“自己治癒コンクリート”の開発が活発に進められている。例えば、超吸水性ポリマー（SAP: super absorbent polymer）を混入させたコンクリートでは、ひび割れに伴う外部からの水の供給により SAP が膨潤し、ひび割れを閉塞するとともに炭酸カルシウムの析出を促す。また、細菌を用いた方法（H.M. Jonkers, 2011）も提案されており、その代謝反応により析出した炭酸カルシウムによりひび割れを閉塞させるなど、自己治癒のメカニズムは多様である（岸, 2015）。このような人手を要さない構造物のメンテナンスは、財源の削減に大きく寄与するものと期待される。その一方、ひび割れ内部の自己治癒が期待どおりなされているのか？ または、どの程度なされているのか？ を非破壊かつ定量的に評価する手法は未だ確立していない。そこで、著者らは弾性波の伝播特性に着目し、基礎実験をとおして弾性波の速度および振幅値が自己治癒過程の評価に有効であることを示してきた（G. Lefever, 2022）。

本研究では、ひび割れの自己治癒状態を、治癒層の剛性ならびにその充填率として定量的に評価する手法について検討すべく、自己治癒の各過程をモデル化し、それらに対し3次元波動伝播シミュレーションを行った。各モデルにおける治癒層の条件と弾性波伝播特性の関係から、定量評価手法への適用性について考察した。

### 2. 3次元波動伝播シミュレーション

3次元波動伝播シミュレーションソフトウェア（Wave3000, CyberLogic社）を用いて解析を行った。第1図および第1表に解析モデルと各物性値を示す。解析モデルは角柱のモルタルとした。ひび割れの自己治癒過程を想定し、幅0.2mmのスリット内に、種々の弾性係数（0.01～70 GPa）を有する材料を満たした。さらに治癒層の充填度合いの影響を確認するため、0.01 GPaと10 GPaについては、スリット面に対する治癒層の充填率を5～100%に変化させた。これら各モデルについて、スリットから25mm離れたモルタル表面から、450 kHzの正弦波1波長分を発生し、そのとき Ch.1 及び Ch.2 で得られる表面変位の経時変



第1図 解析モデル

化を記録した。これらの波形を基に式(1), (2)で示す *Velocity* と *Attenuation* を算出した。*L* はセンサ間距離(mm), *t<sub>Ch.1</sub>*, *t<sub>Ch.2</sub>*, *A<sub>Ch.1</sub>*, *A<sub>Ch.2</sub>* はそれぞれ *Ch.1*, *Ch.2* における到達時間 (s) と最大相対変位を示す。なお、シミュレーションにおいて、*x*, *y*, *z* 軸の全ての境界は無境界とした。

第1表 解析の各物性値

	モルタル	空気	治癒層の弾性係数 (GPa)				
			0.01	0.1	1	10	70
密度 ρ (kg/m <sup>3</sup> )	2170	1.293	1600				
ラメ第一定数 λ (MPa)	16100	0.147	5.77	57.7	577	5770	40400
ラメ第二定数 μ (MPa)	10700	0.000	3.85	38.5	385	3850	27000

$$Velocity = \frac{L}{t_{Ch.2} - t_{Ch.1}} \quad (1)$$

$$Attenuation = -\frac{20}{L} * \log \frac{A_{Ch.2}}{A_{Ch.1}} \quad (2)$$

### 3. 結果および考察

第2図および第3図に、治癒層の剛性に対する *Velocity* および *Attenuation* を示す。治癒層の剛性が増加するに伴い、*Velocity* は増加し、*Attenuation* は減少する傾向が示される。この傾向は剛性が小さい場合に顕著である。

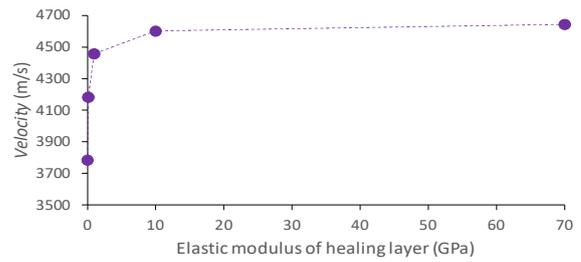
第4図にひび割れ面に対する治癒層の充填率と *Velocity* の関係を示す。治癒層の剛性の違い (10 GPa と 0.01 GPa) により *Velocity* の値に大きな差がある。どちらの剛性の場合も充填率の増加に伴い *Velocity* が速くなる傾向が見られる。しかし、剛性の違いと比較し、充填率の違いによる変化はわずかである。治癒層の充填率が5%から100%に変化した場合の *Velocity* の変化率を見てみると、剛性が10 GPaの場合で約4% (4400 → 4600 m/s)、剛性0.01 GPaの場合で約8% (3500 → 3800 m/s) といずれも10%に満たない。一方、第5図に示すとおり、治癒層の充填率が5%から100%に変化した場合の *Attenuation* の変化率は、剛性0.01 GPaの場合で約-4% (1.4 → 1.3) とわずかであるが、剛性10 GPaの場合は約-50% (0.8 → 0.4) と大きく変化していることが分かる。*Velocity* とは異なり、*Attenuation* の場合は、特に剛性が大きい場合、治癒層の充填率の影響を大きく受けることが分かった。

### 4. おわりに

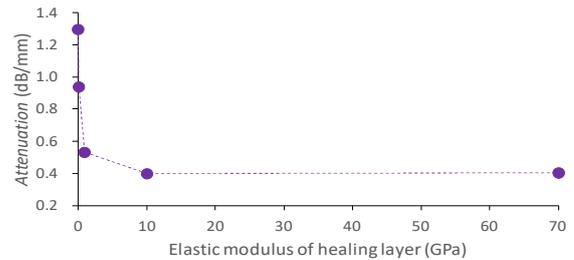
以上のシミュレーション結果より、①②を確認した。

- ①ひび割れを満たす治癒層について、その剛性が増加するに従い *Velocity* は増加し、*Attenuation* は減少する。この傾向は低い剛性で著しい。
- ②治癒層の充填率について、*Velocity* への影響は小さく、*Attenuation* への影響は大きい。剛性が大きい場合、その影響は著しい。

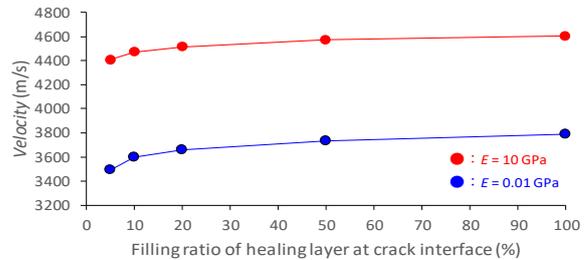
①より、治癒層がひび割れを満たす場合、*Velocity*, *Attenuation* のいずれかを指標とすることで、その剛性を推定できると考えられる。②より、治癒層がひび割れを満たさない場合でも、*Velocity* と *Attenuation* の異なる振る舞いを利用することで、治癒層の剛性およびその充填率を推定することが可能と考えられる。例えば、*Velocity* は治癒層



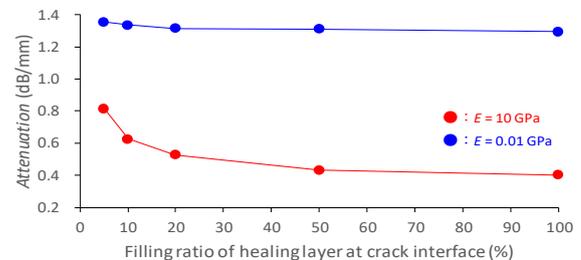
第2図 治癒層の剛性と *Velocity*



第3図 治癒層の剛性と *Attenuation*



第4図 治癒層の充填率と *Velocity*



第5図 治癒層の充填率と *Attenuation*

の充填率の影響を受けにくいことから、実際の測定で得られた *Velocity* により剛性を概ね評価することが可能であり、さらに各剛性において、充填率と *Attenuation* の関係をシミュレーションにより明らかにしておけば、治癒層の充填率を推定できると考えられる。

### 文 献

H. M. Jonkers (2011) Bacteria-based self-healing concrete, HERON, Vol. 56, pp.1-12  
 岸利治 (2015) コンクリートのひび割れ自己修復/自己治癒, 日本画像学会誌, 第54巻, 3号, pp.236-242  
 G. Lefever, D. Van Hemelrijck, D. Snoeck, D.G. Aggelis (2022) Self-healing assessment of cementitious mortars through ultrasonic monitoring, Cem Concr Compos, 133, 104683