

# 論文 超音波を用いた超高サイクル圧縮試験によるセメント系材料の破壊メカニズムの考察

高橋 駿人<sup>\*1</sup>・橋本 勝文<sup>\*2</sup>・高橋 徹<sup>\*3</sup>

**要旨:** 超音波技術を用いた超高サイクル圧縮試験を実施した時のセメント系材料の破壊メカニズムについて、装置の出力データや X 線 CT 観察を用いて考察した。その結果、加振時に超音波装置に生じる電流負荷の出力ピーク（パワー）が生じた際に、骨材の界面を通じて微細なひび割れが生じ、そのパワーの大きさがひび割れの発生機構に影響を与えることがわかった。また、生じるパワーが大きくなるに伴い、供試体の一部が崩壊するような大きなひび割れが生じることが明らかになった。更に、ひび割れが生じた供試体に超音波加振をした場合、ひび割れが生じていない供試体より半分以下の低エネルギーで破壊が発生することがわかった。

**キーワード:** 超音波, 超高サイクル圧縮試験, 疲労破壊, ひび割れ, X 線 CT 法

## 1. はじめに

道路や鉄道の枕木などに代表されるように、多くのコンクリート構造物は荷重の繰返し作用を受け、場合によっては耐用期間中に作用する回数が 1000 万回以上に達することもある。金属材料などは一般的に、実際の静的圧縮強度以下の応力条件でも、応力を繰返し受けた場合には疲労破壊が発生することが知られているが、セメント系材料においても疲労破壊は発生することが知られている<sup>1)</sup>。古くは、コンクリートの疲労破壊強度、応力振幅、平均応力それぞれと疲労寿命の対数値とは、直線関係にあり、コンクリートの疲労破壊ひずみは、載荷応力、疲労寿命、荷重振動周波数によらず、コンクリート種類により一定となると報告されている<sup>2)</sup>。また、現行のコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>でも、疲労寿命および応力度の関数として設計疲労強度式は提示されているが、一方で設計基準強度が 50 N/mm<sup>2</sup>を超える場合や、疲労寿命が 2 × 10<sup>6</sup> 回を超える場合は十分なデータがないことも指摘されている。近い将来にはカーボンニュートラル実現に向けて、コンクリート構造物の材料・構造形式が大きく変化する可能性が高く、それに迅速に対応するためにもこれらの知見の拡充が必要であることが見込まれる。

疲労破壊は時間に依存する破壊とも考えられているが、従来の試験では数 Hz 程度の繰返し荷重で行われることが多い。コンクリートを始めとするセメント系材料では、応力度-疲労寿命の曲線（S-N 曲線）を取得する際に、サイクル数は前述の通り 2 × 10<sup>6</sup> 回を最大として試験をす

ることが多い。しかし、例えば 2 Hz で試験を実施した場合を想定すると、試験期間は 10 日を超えてしまう。そのため、疲労破壊の効率的な試験方法についても検討する必要があると考えられる。

コンクリートに繰返し荷重が導入されるときは、軸応力の伝播による粗密波が発生し、破壊ゾーンの局所化を生みやすいことが既に知られている<sup>4)</sup>。また、弾性波が伝播する固体材料中では、波方向に振動する P 波が共振を伴う粗密波となる。そのため、周波数が kHz オーダーの超音波領域の弾性波を用いて、高サイクル・超高サイクル疲労試験が適用される場合がある<sup>5)</sup>。これにより従来よりもはるかに短時間で材料内部の破壊特性を評価するための加速試験となる。例えば、後述する本研究で使用する装置では、15 kHz で発振することにより累積 134 s で 2 × 10<sup>6</sup> 回に達する試算となる。この（超）高サイクル疲労試験は主に金属材料を対象として適用されることが多いが、近年はセメント系材料に適用されている事例が増えている<sup>6)</sup>。以上より、超音波技術を用いることで、これまで未解明であったサイクル数でのセメント系材料の疲労破壊特性も解明できると期待される。

本研究では、疲労破壊を目的とした超音波技術の基礎的な適用段階として、超音波技術を用いた超高サイクル圧縮試験を実施し、セメント系材料の破壊メカニズムについて、装置の出力データや X 線 CT 法を用いて、内部のひび割れ機構から考察することを目的とする。

表-1 コンクリートの配（調）合

| $G_{\max}$<br>(mm) | $W/C$<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |
|--------------------|--------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|
|                    |              |            | $W$                      | $C$ | $S$ | $G$ |
| 15                 | 50           | 48         | 175                      | 350 | 829 | 987 |

\*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 特任助教（研究） 工博（正会員）

\*2 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門 准教授 工博（正会員）

\*3 精電舎電子工業（株） 技術部工作グループ 振動技術チーム 工博

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

Φ50×100 mm のコンクリート供試体を、プラモールド型枠を用いて JIS A 1132 を参考にして作製した。供試体寸法は、後述する Φ70mm の鋼製ホーンで供試体端面を覆えるように Φ50mm とした。コンクリートの配（調）合を表-1 に示す。使用材料は、練混ぜ水に上水道水（密度：1.00 g/cm<sup>3</sup>）、セメントに普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm<sup>3</sup>）、細骨材に多摩産砕砂（表乾密度：2.60 g/cm<sup>3</sup>）、粗骨材に多摩産砕石（表乾密度：2.86 g/cm<sup>3</sup>）を使用した。粗骨材は 5~15 mm の粒径のものを使用している。今回は 1mm 以上の粗大な空隙（以降、粗大空隙と称する。）が破壊メカニズムに与える影響を考慮するため、化学混和剤は添加しなかった。打設後は 28 日間の水中養生をして、アセトンによる水和停止処理および供試体の打設面を約 2~5 mm 研磨して、後述する 2.2 の試験開始まで湿潤状態で保管した。なお、28 日後のコンクリートの圧縮強度は 3 体平均で 45.33 N/mm<sup>2</sup> であった。

### 2.2 超音波加振試験

#### (1) 試験機概要

超音波加振試験に使用した装置は、精電舎電子工業製の超音波溶着機 SONOPET J II 3600S / J II P80S である。装置の概観写真を図-1 に、加振時のホーン-供試体の間の挙動の概要を図-2 に示す。装置の仕様は、発振周波数 15 kHz、最大振幅 32 μm、最大出力 3600 W、プレス加圧力 100~3200 N、ホーン有効ストローク 30~121 mm であり、波形は正弦波である。また、時間分解能 1 ms、出力分解能 1 W、ストローク分解能 1 μm となっている。使用したホーンは Φ70 mm の超硬溶射ホーンである。なお、装置による温度制御は出来ないが、ホーンと供試体端面には摩擦による熱が発生する。

加振時に供試体が動かないように土台側に固定治具を設置した。また、破壊時の破片の飛散防止のため、内径 Φ94 mm の円筒アクリルを設置すると同時に、供試体をポリ袋に覆った状態で加振を実施した。試験時は、精電舎電子工業製の溶着管理ソフトウェア J-Tool を用いて、発振中の装置の出力（パワー[W]）、荷重[N]、ホーン先端位置[mm]について、それぞれ 1ms 単位で測定した。パワー[W]は、加振時の加圧およびホーン下降時に、加振対象物が存在することにより定常振動が妨げられた時の負荷に対する電流に依存しているものと考えられる。また、ホーン先端は供試体が破壊されると同時に破壊領域まで追従して降下するため、ホーン先端位置[mm]については破壊深さ[mm]と定義して、後述する実験結果ではそのように表記する。また、後述する実験結果では、パワー[W]、荷重[N]、破壊深さ[mm]をまとめて“測定データ”として称することとする。

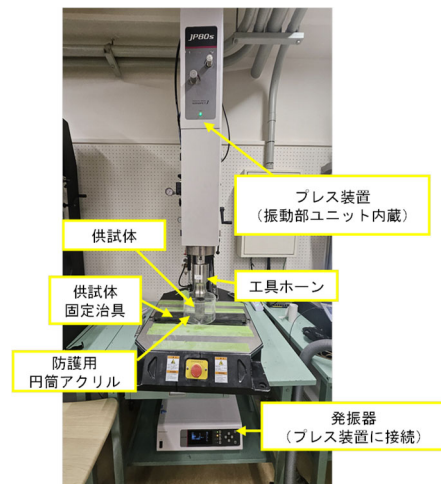
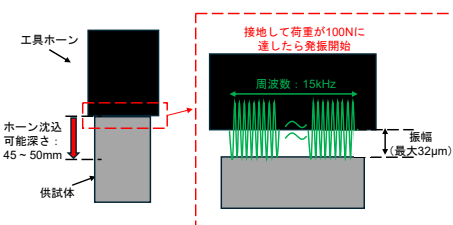


図-1 超音波溶着機の概観



※加振終了条件：加振開始から10秒後 or ホーン先端が50mmまで達した時

図-2 加振時のホーン-供試体間の挙動概要

#### (2) 破壊試験

供試体の完全な破壊、ここでは自立していた供試体が形状を保てなくなった状態になること、を意図した超音波加振試験を行った。加振条件は、著者らの既報<sup>7)</sup>と同様に、最大振幅を 32 μm に設定し、ホーン先端を供試体先端に接地するよう降下させ加圧し、プレス加圧力が 100 N に達した時に加振を開始する。加振開始後も 2 秒で 2500N に達するように加圧は継続され、2500 N に達した場合はその値を保持するように機械的に制御した。加振終了の条件は、加振後 10 秒経過またはホーン先端が鋼製台座より 50mm 高さまで達した時とした（すなわち供試体上面から約 45~50mm まで沈む）。このように制御した理由は、装置附属のケーブル等が、破壊時に巻きこまれることを防ぐためである。この試験では、供試体の個体差を検討するため 3 体で実施し、それぞれ供試体 a, b, c と称する。

#### (3) 加振時間制御試験

破壊の途中経過を観察するため、加振時間を制御した超音波加振試験を行った。加振条件は 2.2(2) と同様に設定し、加振時間をケース A : 0.5 s、ケース B : 1.0 s、ケース C : 1.5 s、と制御して実施した。またケース B については、供試体の個体差を検討するため 3 体で実施し、それぞれ B - i) ~ iii) と称する。

#### (4) 再加振破壊試験

詳しくは後述するが、装置に過電流アラームが生じて

供試体が破壊せずに加振が終了する場合が見られた。それらの供試体に対し、直後に再加振して破壊試験を実施した。加振条件はアラーム発生時および再加振破壊試験時で 2.2(2)と同様に設定し、供試体は 2 体で実施した。供試体はそれぞれ  $\alpha$ 、 $\beta$  と称する。

### 2.3 X 線 CT 測定

2.2(2)および(3)で実施した試験体の内部ひび割れの発生箇所を幾何学的に観察するため、X 線 CT 法を行った。撮影条件は、管電圧を 100 kV、管電流を 200  $\mu$ A とした。低エネルギーの X 線を除去および取得画像に発生するアーチファクトの低減を意図して、0.2 mm 厚さの Cu フィルタを使用した。また、ノイズ低減と供試体端面の補正を意図して、供試体上部にアルミ治具を設置して撮影した。解像度は 24.86  $\mu$ m/voxel、1 断面の画像サイズは 2864  $\times$  2864 pixel とし、供試体の全長を範囲とした断面連続画像を取得した。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊試験

図-3 に破壊試験時の測定データと破壊時の静止画の様子を示す。これによると、供試体 a および b は、微小

なパワーのピークが数回発生した後に、約 4000 W の大きなパワーのピークが発生した時に破壊深さの進展が発生している。荷重は約 2000 N に達した直後に破壊している。これらは筆者らの既報<sup>7)</sup>と傾向は一致している。一方、供試体 c は、同様に微小なパワーのピークが発生した後に、大きなパワーが生じている最中に、装置に過電流が発生するアラームが生じ、破壊せずに加振が終了した。このようにアラームが生じた原因としては詳細には不明だが、供試体中の粗骨材同士の噛み合わせが生じることで加振時により大きな負荷が作用したこと等が考えられる。なお、供試体上層部を目視で観察すると、表面から剥離やひび割れが発生していることが確認された。

そこで、内部のひび割れの存在やその形状等を確認するため、供試体 c に関して X 線 CT 測定を実施した。図-4 に供試体高さ方向の CT 断面画像について、加振面から供試体高さの半分程度までを示す。これによると、内部でも加振面からひび割れが多数発生していることがわかる。その多くは、粗骨材とモルタルの界面を通じて発生しており、粗大空隙を通じて発生していることはほとんど確認できない。また、ひび割れおよび終局的な破壊は、図中の右側の方に集中している様子が見て取れる。

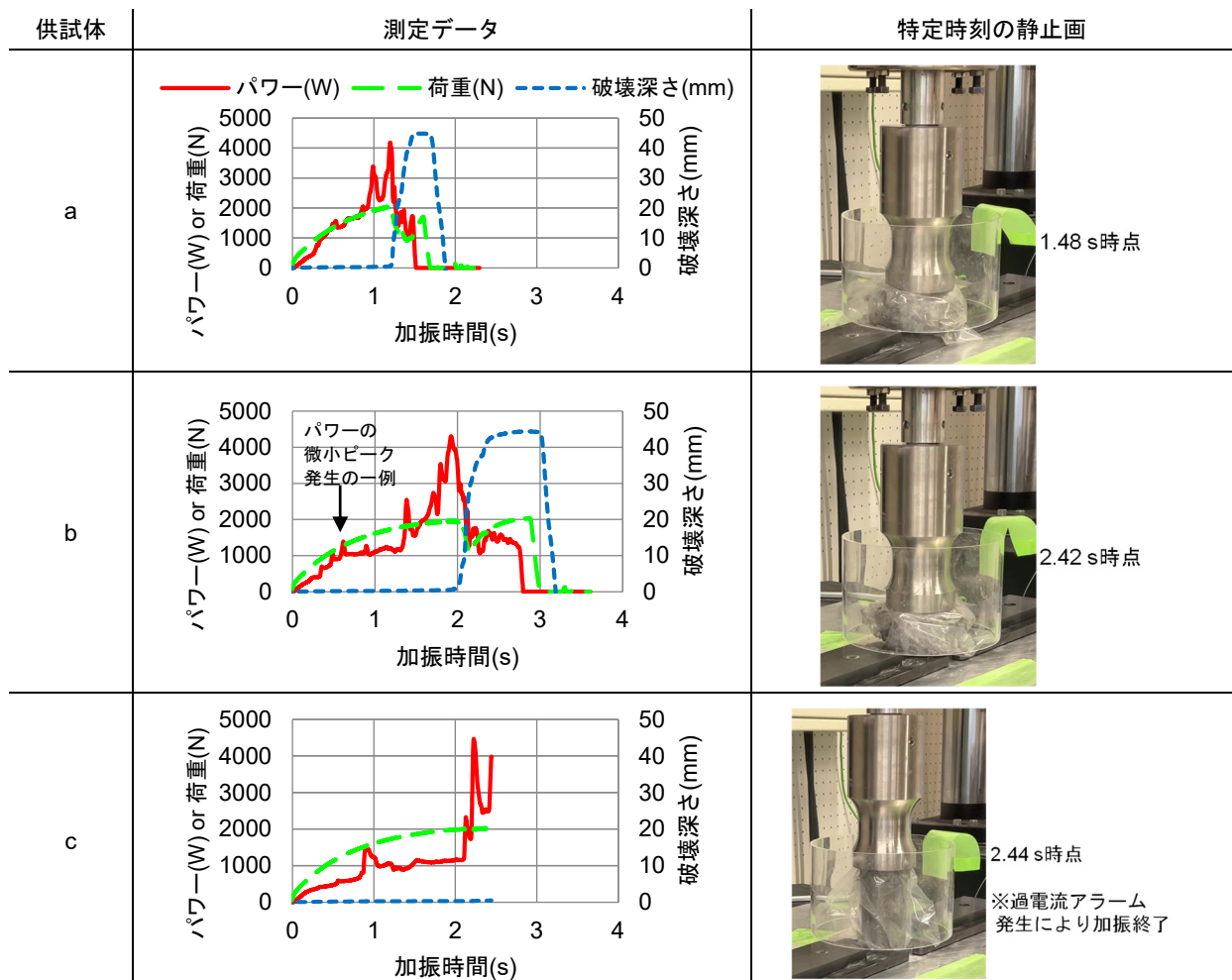


図-3 制御試験時の測定データおよび加振時の静止画

これは、図中の右側に存在していたマトリクス中に粒径の大きな骨材が密接しており、骨材同士が加振時に干渉しあったため、大きなひび割れおよび骨材の剥落が生じたためと推察される。なお、ひび割れは加振面から約 40 mm までの範囲に発生している。これは筆者らの既報<sup>7)</sup>で考察したように、台座から固定端反射をすると仮定した際の縦波が局所化している領域において、破壊が集中しているものと考えられる。

### 3.2 加振時間制御試験

図-5~図-9 に、ケース A、ケース B - i)~iii), ケース C における測定データおよび供試体高さ方向の CT 断面画像を合わせて示す。なお、ひび割れを検出できた領域から判断して、アルミ治具と供試体上端を合わせた 42.9 mm の範囲までを表示している。なお、CT 断面画像中のひび割れは目視により判断した。これによると、ケース A では、加振時間 0.5 s 時点で約 800 W のパワーの最大ピークが生じている。CT 断面画像からひび割れの形態

を見ると、供試体外縁部に位置している骨材の、供試体外縁側の骨材とモルタルの界面に微細なひび割れが数か

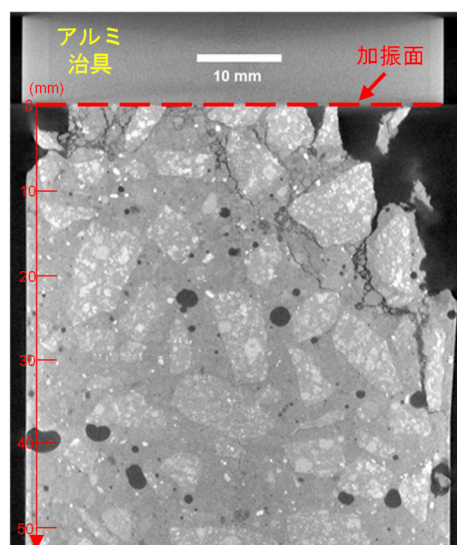
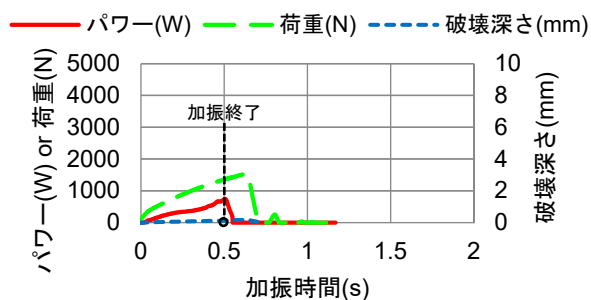
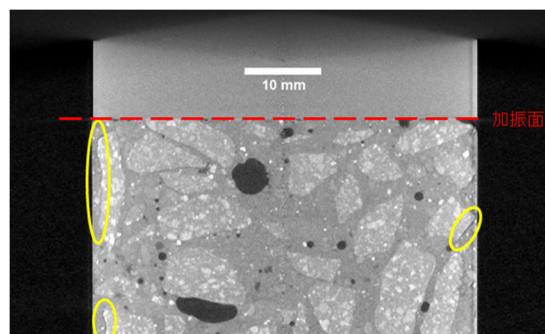


図-4 破壊試験-供試体 c の加振後の CT 断面画像

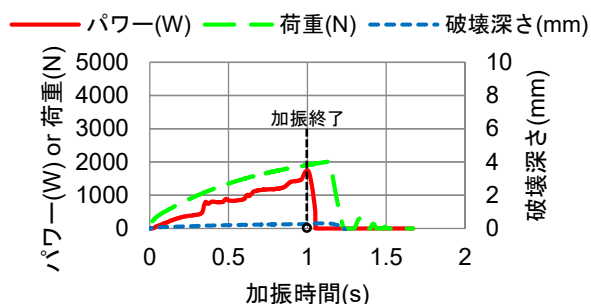


測定データ

図-5 加振時間制御試験の測定データおよび供試体 CT 断面画像 (ケース A : 加振時間 0.5 s)

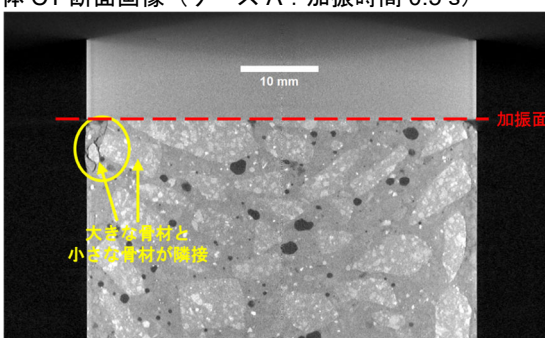


CT 断面画像 (図中丸は、微細ひび割れ)

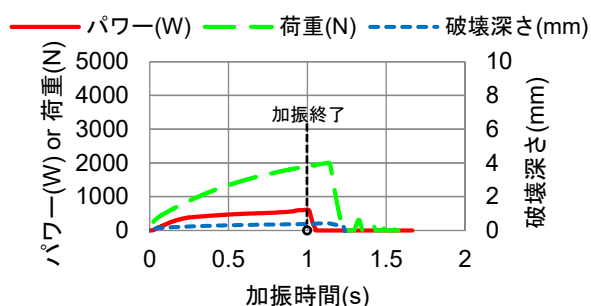


測定データ

図-6 加振時間制御試験の測定データおよび供試体 CT 断面画像 (ケース B- i) : 加振時間 1.0 s)

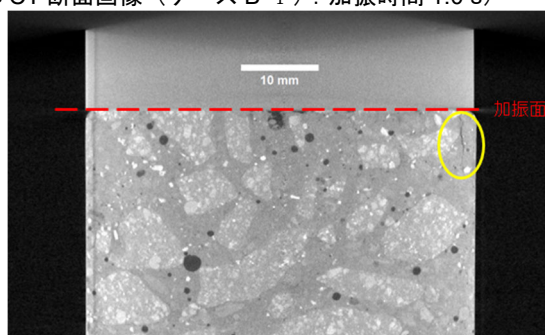


CT 断面画像 (図中丸は、微細ひび割れ)



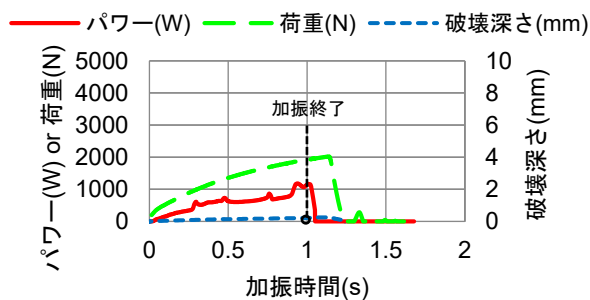
測定データ

図-7 加振時間制御試験の測定データおよび供試体 CT 断面画像 (ケース B- ii) : 加振時間 1.0 s)



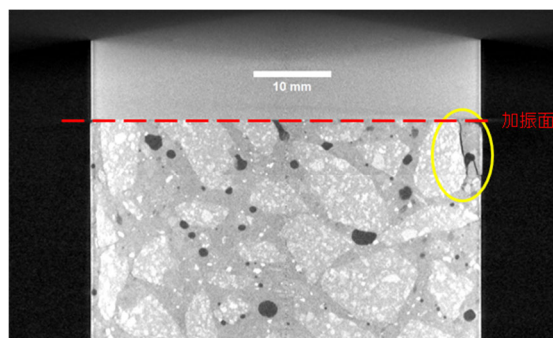
CT 断面画像 (図中丸は、微細ひび割れ)



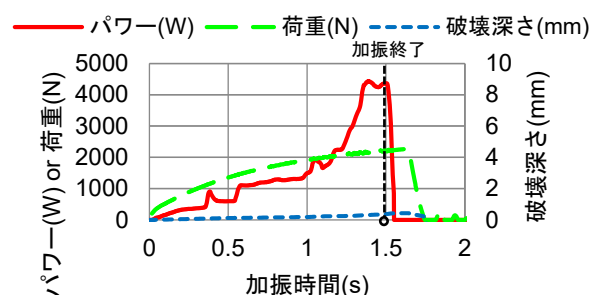


測定データ

図-8 加振時間制御試験の測定データおよび供試体 CT 断面画像（ケース B-iii）：加振時間 1.0 s

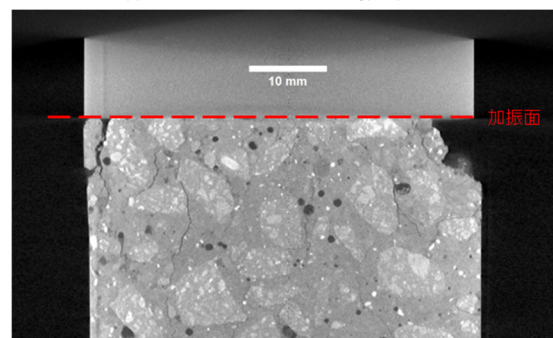


CT 断面画像（図中丸は、微細ひび割れ）



測定データ

図-9 加振時間制御試験の測定データおよび供試体 CT 断面画像（ケース C：加振時間 1.5 s）



CT 断面画像

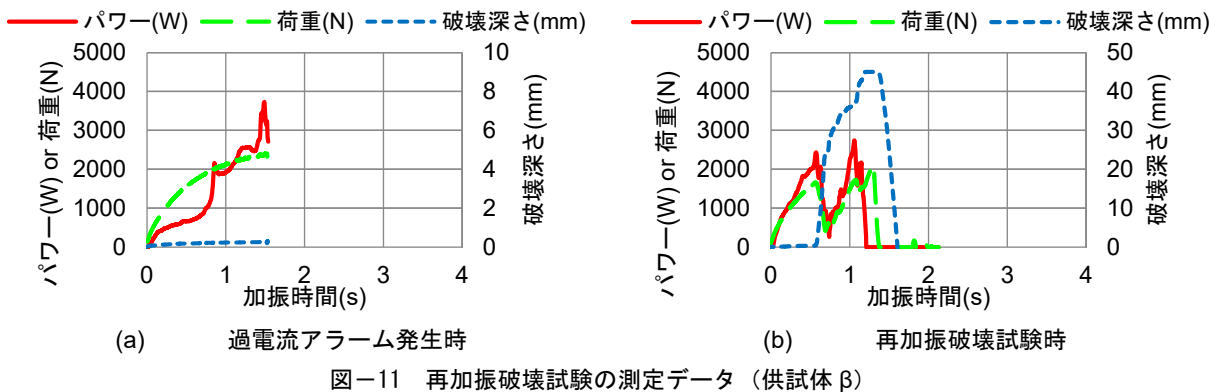
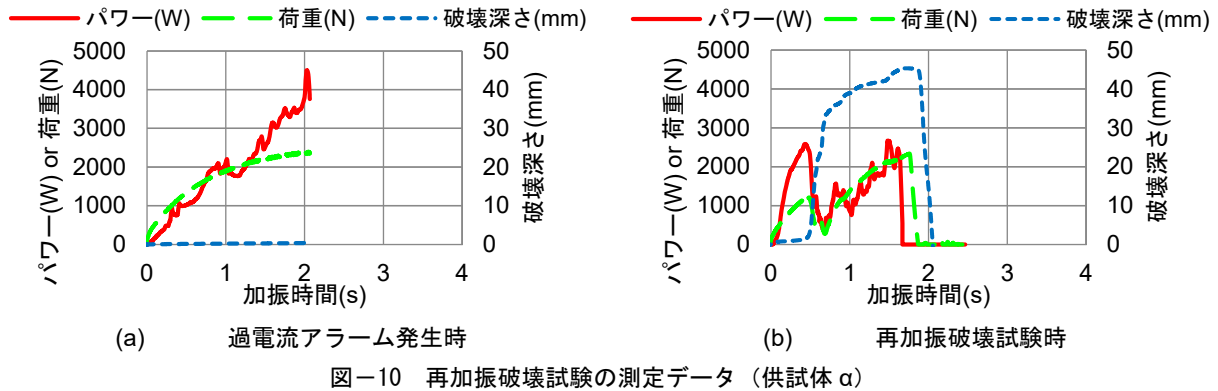
所生じていることが見て取れる。ケース B では、ケース A と同様に、加振時間 1.0 s 時点でパワーの最大ピークが生じているほか、i)およびiii)では、パワーの増幅過程で微細なピークが生じている。パワーの最大ピークはi), ii), iii)でそれぞれ約 1800 W、約 600 W、約 1100 W である。CT 断面画像については、特にケース B-i)や B-iii)では、ケース A より幅の大きなひび割れが生じているように見られ、B-i)ではひび割れ箇所で大きな骨材に小さな骨材が隣接しており、骨材同士で加振時に干渉があったため、他の供試体と比較して大きなパワーの出力と同時に大きなひび割れが生じたと考えられる。ケース C では、加振中にパワーが微細なピークを生じながら増幅していき、加振時間が 1.1 s を超えるとパワーの増幅の傾きが急激に大きくなり、加振時間が約 1.4 s になった時点で約 4300 W のパワーのピークが生じている。その後、1.5 s 時点でも同程度のパワーが再度生じて加振が終了している。CT 断面画像を見ると、供試体外縁部では一部のマトリクスが崩壊しており、供試体中心部でも骨材界面を通じて生じたひび割れが多数確認できる。既往の文献<sup>9)</sup>においても、繰返し荷重による破壊は骨材とペーストとの界面の破壊が支配的であることが指摘されており、その傾向と一致している。なお、荷重に関しては、全ての加振ケースにおいて、加振終了時間から約 0.2 s は荷重が増加してから載荷が終了しているが、これは装置の機械的な制御により、加振終了後も即時に減圧が出来なかったためと考えられる。一方で、破壊深さは全ての場合で 0.5 mm 以

内であり、破壊は生じていないと言える。

以上より、パワーのピークが生じることで骨材とセメントペーストの界面に微細なひび割れが生じ、生じるパワーの大きさはひび割れの発生や進展に影響を与えることが示唆された。

### 3.3 再加振試験

図-10 および図-11 に過電流アラーム発生時および再加振試験時の測定データについて、供試体  $\alpha$ ,  $\beta$  についてそれぞれ示す。これによると、過電流アラームの発生時に関して、供試体  $\alpha$  では、加振時間が約 2 s 経過後に発生しており、その際のパワーのピークは約 4500 W である。供試体  $\beta$  では、約 1.5 s 経過後に過電流アラームが発生し、その際のパワーのピークは約 3800 W である。しかし、両供試体とも、破壊深さは 0.5 mm 以内と大きな変化はないため、3.2 の考察から、供試体に破壊は発生せず内部にひび割れのみが発生しているものと推察される。一方、直後の再加振試験に関しては、供試体  $\alpha$ ,  $\beta$  共に、加振時間約 0.5 s で破壊深さの急激な変化が開始しているが、発生しているパワーは約 2500 W である。また、その後も破壊が進展し、再度パワーが約 2800 W に達した後に破壊が終了している。ここで、初期の破壊深さの急激な変化時のエネルギーを、パワーの値を加振時間で積分して算出したところ、供試体  $\alpha$ ,  $\beta$  共に約 700 J であった。一方、図-3 と比較すると、供試体 a, b では、初期の破壊で生じたパワーは 4000 W を超えており、加振時間は 1.2 秒を超えていることがわかる。同様にエネ



ルギーを算出したところ、供試体 a, b でそれぞれ約 1800 J, 約 2500 J であった。したがって、初期に生じているひび割れの存在は、ひび割れが存在していない場合よりも半分以下の低エネルギーで超音波加振による破壊を発生できることが示唆された。

#### 4. 結論

本研究では、超音波技術を用いた超高サイクル圧縮試験を実施した場合のセメント系材料の破壊メカニズムについて、ひび割れの機構やその発生条件を、装置の出力データや X 線 CT 観察を用いて考察した。その結果、装置の電力負荷のパワーが生じた際に、骨材の界面を通じて微細なひび割れが生じ、大きなパワーが生じた際には供試体の一部が剥落するようなひび割れが生じることが明らかになった。また、一度ひび割れが生じた後に超音波加振を行うと、ひび割れが生じていない場合よりも低エネルギーで破壊が発生することが示唆された。

**謝辞：**本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号 23K13387）の助成を受けて実施した。また X 線 CT 測定は、北海道大学大学院 工学院 環境フィールド工学専攻 博士課程 1 年 中瀬皓太君に協力いただいた。

#### 参考文献

- 1) 徳光善治, 松下博通：繰返し荷重を受けるコンクリ

ートの疲労強度, コンクリート工学, Vol.17, No.6, pp.13-22, 1979.6

- 2) 畑野正, 渡辺啓行：周期的圧縮荷重によるコンクリートの疲労破壊, 土木学会論文集, 第 185 号, pp. 51-60, 1971.1
- 3) 土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.232-233, 2023.3
- 4) 渡辺健, 二羽淳一郎, 横田弘, 岩波光保：圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.197-211, 2003.2
- 5) Fitzka, M. et al.: Usability of Ultrasonic Frequency Testing for Rapid Generation of High and Very High Cycle Fatigue Data, Materials, Vol.14, No.9, 2245, 2021.4
- 6) Fitzka, M. et al.: Ultrasonic Fatigue Testing of Concrete, Ultrasonics, Vol.116, 106521, 2021.9
- 7) 高橋駿人, 橋本勝文, 高橋徹：コンクリート構造物の解体を目的とした超音波技術による破壊メカニズムに関する一考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集第 24 巻, pp.131-136, 2024.10
- 8) Assimacopoulos, B. M., Warner, R. F., Ekberg, C. E. Jr.: High speed fatigue tests on small specimens of plain concrete, J. Prestressed Concr. Inst., Vol.4, pp.53-70, 1959