

# 論文 石炭灰を混入した小型 RC 部材の減衰性能

青木 健剛<sup>\*1</sup>・荒木 秀夫<sup>\*2</sup>・椛山 健二<sup>\*3</sup>

**要旨**：石炭灰を建築構造用材料として有効利用し、環境保全へ貢献することを目指して、本研究では石炭灰を混入した RC 部材の減衰性能を把握することを目的とする。そこで RC 構造物をモデル化した縮小鉄筋補強モルタル柱の動的加振実験および静的載荷実験を実施し、減衰力の簡便な抽出方法を提案して、石炭灰混入と無混入の実験結果を比較することで、石炭灰を混入した RC 部材を模した試験体の減衰性能を検討した。

**キーワード**：石炭灰，動的加振，減衰性能，RC 部材

## 1. はじめに

資源循環型社会への移行にともない、産業廃棄物を有効的に再利用する動きが加速している。その中で、石炭灰をコンクリートの骨材として活用して建物の構造躯体に実用化するための研究が進められており、各種 RC 部材の静的載荷実験から、石炭灰混入の場合も普通コンクリートの場合と同等の構造性能を実現できることが確認されている<sup>1)</sup>。一方、石炭灰混入により、コンクリート構造体中の粒子分布が影響を受け、局所的な材料特性が変動する可能性が示されている<sup>2)</sup>。代表的な動的特性である減衰性能は構造体内の粒子分布に依存する可能性があり、石炭灰を活用した RC 建物の地震挙動を検討するためには、石炭灰の混入が減衰性能に及ぼす影響を把握する必要がある。しかし、減衰性能は建物の地震応答を左右する主要な因子にもかかわらず、定量的な解明が十分に成されていない<sup>3)</sup>。そこで本研究では、RC 構造物に加えて鋼構造物をモデル化した小型試験体を用いた動的加振実験および静的載荷実験を行い、減衰力の簡便な抽出方法を提案し、弾塑性域にわたる減衰性能の定量的評価を目指す。RC 構造物を模した試験体では、石炭灰の混入を変数として、石炭灰の混入が試験体の減衰性能に及ぼす影響を検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 減衰性能の評価方法

提案する減衰性能の評価方法を図-1 に示す。建物をモデル化した試験体の動的加振実験と静的載荷実験を組み合わせ、運動方程式中の減衰力の抽出を行う。まず動的加振実験を行い、試験体をせん断型の 1 質点モデルと見なし慣性力と応答変位の関係を把握する。次に同一仕様試験体の静的載荷実験を行う。静的載荷は変位制御として動的加振で得た変位履歴を強制することで動的加振時の各応答変位点における慣性力に対応する復元力を同定する。以上から、運動方程式中の慣性力と復元力が既知となり、力のつり合いから減衰力を直接求めることができる。

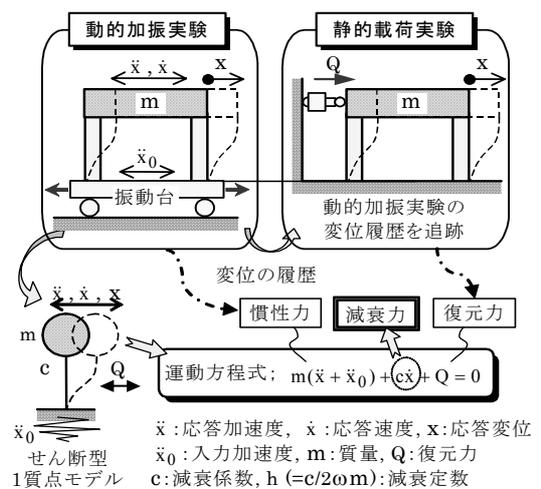


図-1 減衰性能の評価方法

\*1 広島大学大学院工学研究科 大学院生 (正会員)

\*2 広島大学大学院工学研究科 助教授・工博 (正会員)

\*3 広島大学大学院工学研究科 助手・博(工) (正会員)

## 2.2 試験体の概要

試験体は図-2 に示す通り、使用する振動台（寸法 850 mm 角、積載容量 1ton、水平加振能力 3G）の性能とせん断型 1 質点モデルへの置換を考慮し、4 本の柱を剛な錘で固定したテーブル状の小型模型とした。鋼構造物と RC 構造物を想定し、柱を鋼板または鉄筋補強のモルタル柱とした。柱の中間部 200mm が変形区間となる。試験体は表-1 に示す計 6 体で S-D と S-S、PM-D と PM-S、CM-D と CM-S はそれぞれ同一仕様である。RC を模した柱のモルタル調合表を表-2 に示す。CM シリーズでは細骨材体積の 20% を石炭灰で置換した。使用した石炭灰は原粉であるが、表-3 に示す通り、JIS フライアッシュ II 種にほぼ匹敵する物理性状を有している。実験実施時におけるモルタルの力学的特性を表-4 に示す。

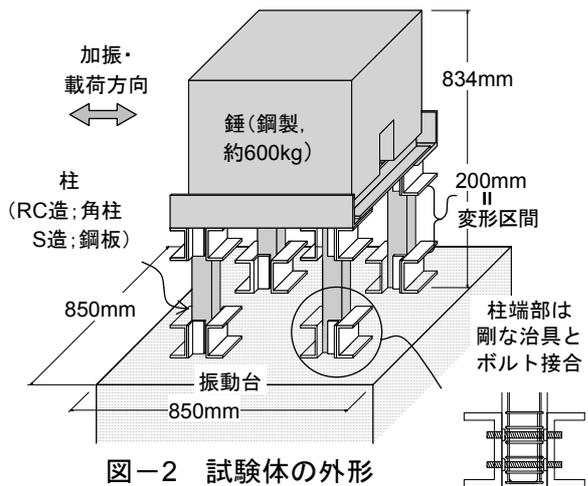


図-2 試験体の外形

表-1 試験体一覧

試験体名	想定した柱の構造	実験方法
S-D	鋼構造 (鋼板)	動的加振
S-S	鋼構造 (鋼板)	静的載荷
PM-D	RC造 (補強モルタル柱)	動的加振
PM-S	RC造 (補強モルタル柱)	静的載荷
CM-D	石炭灰混入RC造 (補強モルタル柱)	動的加振
CM-S	石炭灰混入RC造 (補強モルタル柱)	静的載荷

備考 鋼板：断面8×50mm，材質SS400

降伏強度 675 (N/mm<sup>2</sup>)

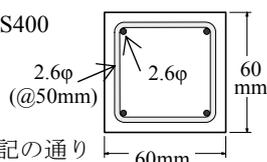
引張強度 742 (N/mm<sup>2</sup>)

補強モルタル柱：断面等は表記の通り

補強筋：2.6φ

降伏強度 613 (N/mm<sup>2</sup>)，引張強度 684 (N/mm<sup>2</sup>)

モルタル：F<sub>C</sub>=30N/mm<sup>2</sup>



## 2.3 動的加振および計測方法

加振に先立ち、試験体の固有周期を調べた。振動台にセットした試験体の錘部分をハンマーで軽く叩き、微振動を与えて頂部の加速度時刻歴を計測した。その記録の分析から S-D で 0.17 秒，PM-D で 0.06 秒，CM-D で 0.07 秒の固有周期を得た。動的加振実験では弾塑性域にわたるよう、この周期と振動台の性能を考慮して、S-D では 1 周期を 0.2 秒，CM-D、PM-D では 0.1 秒とし、変位制御型の振動台を目標振幅 2mm の正弦波で加振した。計測時のサンプリング周波数は 500Hz で、試験体および振動台上各所において変位、速度、加速度を各種センサーを用いて計測した。なお、加振中に振動台自体のロッキングが生じており、その傾きによる影響は試験体の変位から除去した。この試験体をせん断型の 1 質点モデルと想定し、試験体重心位置における水平方向の加速度から算定した応答加速度に柱中央位置以上の全質量を乗じて慣性力を得る。また、減衰効果に直接的に関連すると予測される応答速度を速度計により高精度で記録している点は本システムの特色である。

表-2 モルタル調合

試験体名	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	
			砂	石炭灰
PM-D, S	476	281	1,427	
CM-D, S	467	278	1,157	244

表-3 使用した石炭灰の物理性状

湿分(%)	強度減量(%)	ブレン値(cm <sup>2</sup> /g)
0.1以下	37.2	3,200
比重	フロー値(%)	MB吸着量(mg/g)
2.13	101	0.44

表-4 モルタルの力学的特性

試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度時ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
PM-D, S	37.2	2,420	2.70
CM-D, S	30.5	2,720	2.27

## 2.4 静的载荷および計測方法

静的载荷では変位制御とし、動的加振実験で得られた応答変位の履歴を追跡するよう载荷した。载荷方法は、試験体上部中央に固定した2台のロードセルに取り付けたボルトを水平方向に引っ張ることにより载荷した。この際ロードセルの記録する値を試験体の復元力と見なした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 初期の減衰定数

動的加振前に与えた微小な加振から自由振動の加速度時刻歴波形を得た。この波形の減衰性状より、文献<sup>4)</sup>に基づき初期状態での減衰定数( $h_0$ )を算出した。その結果、石炭灰混入のCM-Dの初期の減衰定数は4.0%で、石炭灰を混入していないPM-Dの3.1%よりやや大きな値が得られた。またS-Dでは1.6%であった。文献<sup>4)</sup>では微振動から算出する減衰定数はRC造建物で2~7%、

S造建物で0.5~3%程度とされており、いずれの値もその範囲内の値となった。

### 3.2 動的加振実験の結果

振動台上で計測された入力加速度と試験体の加速度、速度、変位の各応答値の時刻歴波形をS-D、PM-D、CM-Dについて図-3に示す。この波形はいずれもローパスフィルタを用いて高周波成分を除去している。フィルター周波数25, 50, 100Hzで検討し、応答波形の最大値に差異がないことから、原波に近い100Hzの結果を採用した。試験体は、すべて加振終了まで大きく損傷することなく、ほぼ一定の周期で応答している。ただし、RC造を模したPM-DおよびCM-Dでは柱の両端に類似した曲げひび割れが全周に入ったことを加振終了後に確認した。なお、静的実験のPM-S、CM-Sにおいても同様の損傷が生じた。動的加振、静的载荷にかかわらず、損傷性状に石炭灰混入の影響は見られなかった。

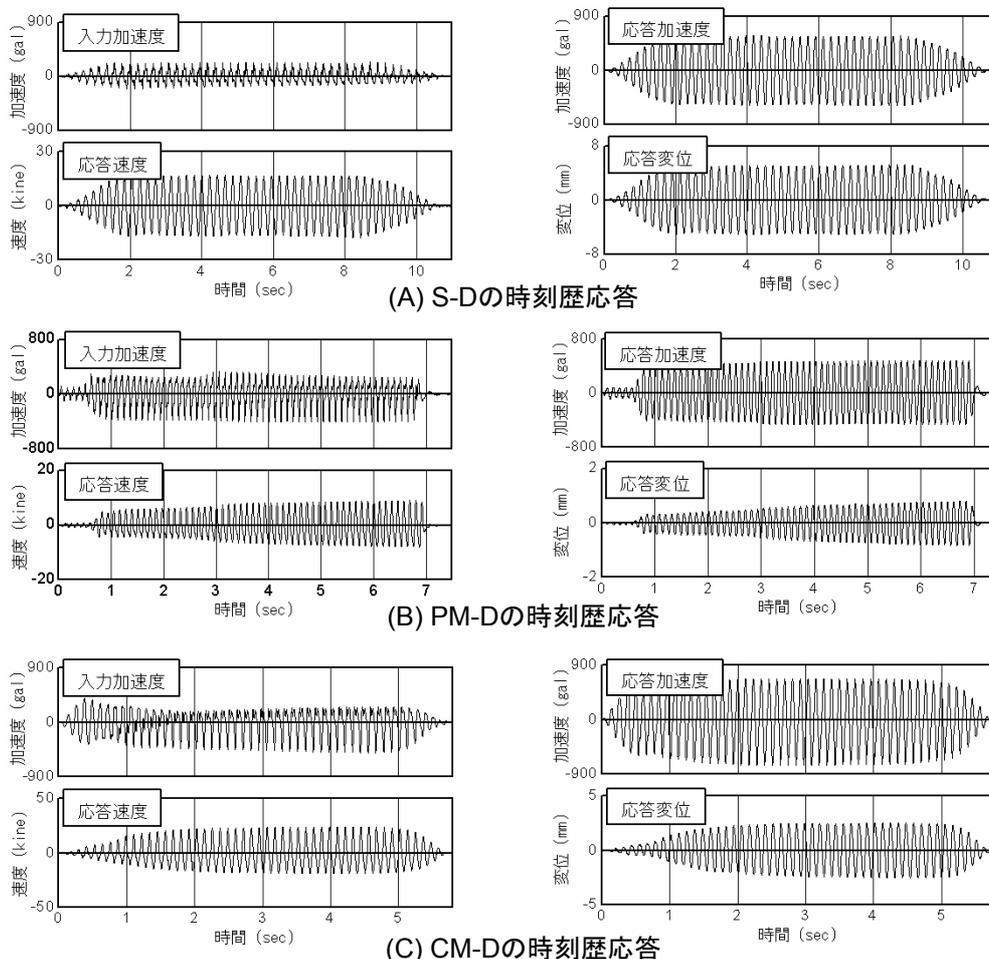


図-3 入力加速度と応答

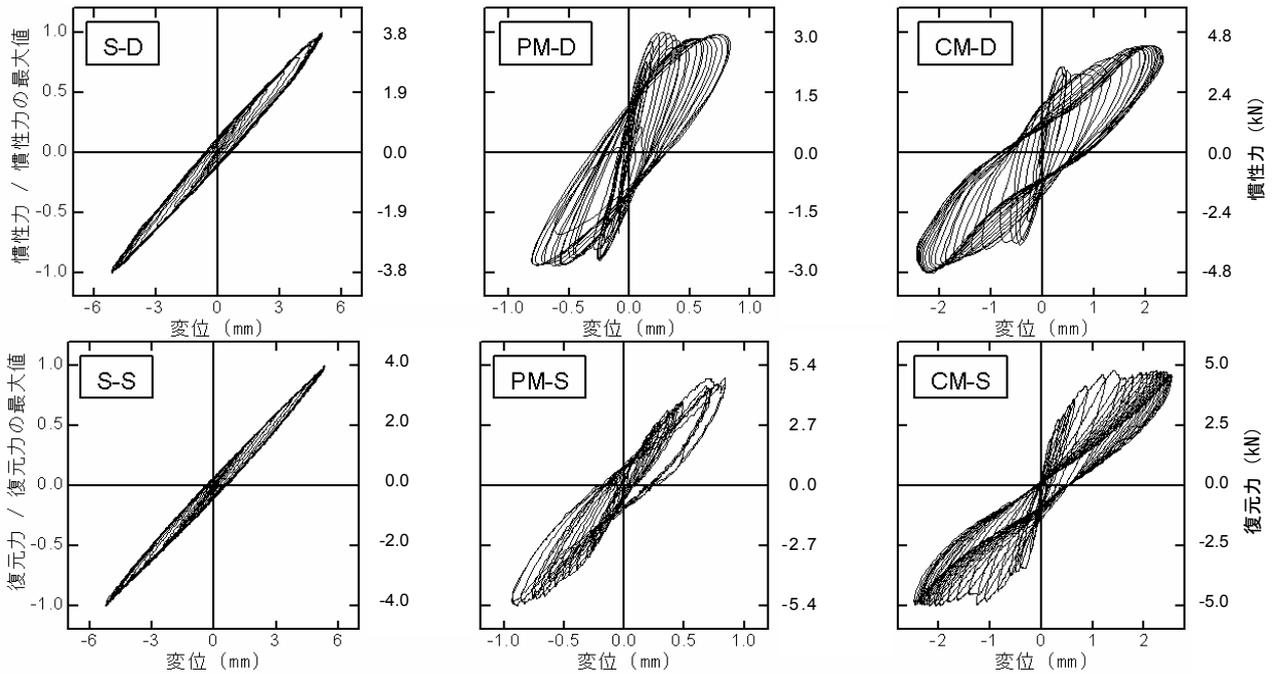


図-4 復元力と慣性力の履歴曲線

### 3.3 慣性力と復元力の履歴曲線

動的加振実験より得られた応答加速度から算出した慣性力と応答変位の関係、および静的載荷実験より得られた復元力と応答変位の関係を、各試験体について図-4にそれぞれ示す。なお、比較のために、いずれのグラフについても縦軸を最大値で除して基準化している。図より S-D では柱の鋼材が降伏に達しておらず、弾性的に挙動していることがわかる。一方、PM および CM の柱は変位量に差があるが、曲げひび割れにより徐々に剛性が低下し、主筋の引張降伏に至ったことが推測される。なお、PM-D と CM-D では降伏点を過ぎたあたりで慣性力の最大値が低下する現象が見られた。また、PM と CM では同一変位に対して復元力よりも慣性力の値が小さくなる傾向がある。

### 3.4 減衰力の抽出

本研究の動的加振実験で生じる減衰作用の主因として、試験体内部のひずみや摩擦による粘性減衰と、試験体・振動台間の相互作用による逸散減衰、試験体の履歴減衰が挙げられる。本論分では、減衰性能を評価する試案として、試験体を図-1の質点モデルと見なし、図-5に示す簡便な方法により減衰力の抽出を試みた。図

-1の運動方程式に従い、減衰力は速度に比例と見なし、復元力の各ループの頂点を慣性力の値に一致させた。従って、履歴減衰の影響は除去してあるが、慣性力と復元力の履歴頂点のずれは考慮していない。以上に示す方法により抽出した各試験体の減衰力の時刻歴波形を図-6に示す。弾性的な挙動の S-D は値が小さく、慣性力の履歴が正側でやや膨らんでいるため正側の値が大きい。また、変位量が異なることから直接の比較は難しいが、石炭灰を混入した CM の減衰力が PM に比べ大きい結果となった。減衰力と応答速度の関係を図-7に示す。相関係数はすべての試験体において 0.8 程度の値を示した。

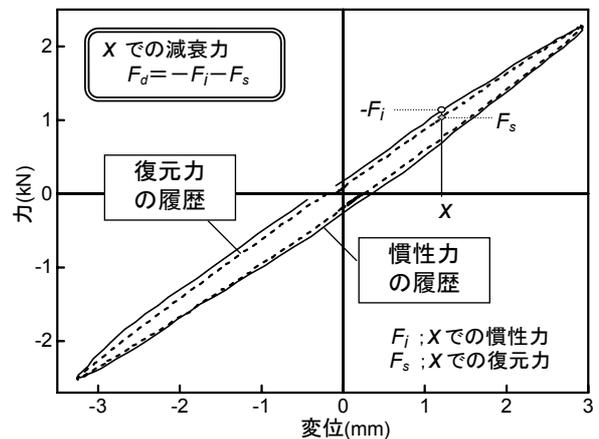


図-5 減衰力の抽出方法

### 3.5 減衰定数

前項の減衰力を速度で除して減衰係数( $c$ )を算出し、(1)式より試験体の質量( $m$ )と復元力履歴から求めた各点の瞬間剛性( $k$ )に基づく固有円振動数( $\omega = \sqrt{k/m}$ )で除して減衰定数( $h$ )を推定した。

$$h = c / 2m\omega \quad (1)$$

減衰定数と減衰力の関係を図-8に示す。図よりすべての試験体で減衰力に応じて減衰定数の分布が広がる傾向にあることが判る。S-Dでは1~4%の範囲に集中しており、平均値をとると1.7%となり、一般的な設計用の減衰定数2%に近い値となった。RC造モデルでは、PM-Dでは1~5%、CM-Dでは2~6%の範囲に集まっているが、S-Dに比べ広範囲に分布している。平均値はそれぞれ4.7%、5.4%となり、いずれも一般的な設計

用の減衰定数3%よりも大きな値となった。変位量の差があるが、石炭灰混入の場合がやや大きいという結果が得られた。

さらに、履歴曲線のループごとの減衰定数の平均値( $h_{LD}$ )をとり、そのループの最大変形時の塑性率( $\mu$ )との関係として図-9に示す。弾性的な挙動を示したS-Dでは、初期の減衰定数 $h_0$ の値を上回る2~3%の間を推移した。RC造モデルのPM-DとCM-Dでは、ともに初期の値は $h_0$ にほぼ等しく、塑性率が1.0以降では約5%と同程度の値となった。石炭灰を混入したCM-Dでは、塑性率1.0付近で大きな減衰定数となった。石炭灰混入が影響を及ぼした可能性が考えられるが、今後の詳細な検討が必要である。

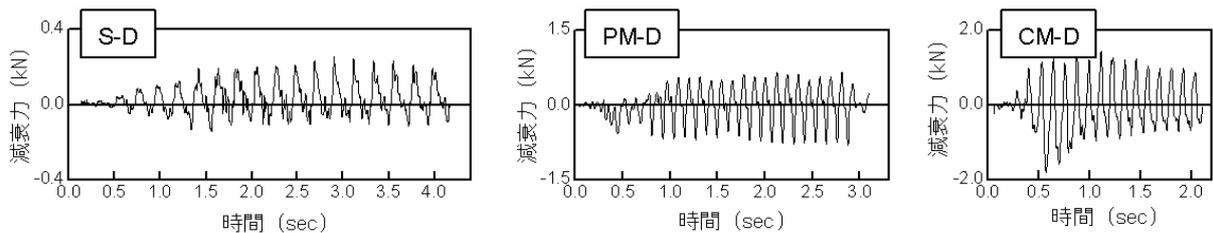


図-6 減衰力の時刻歴波形

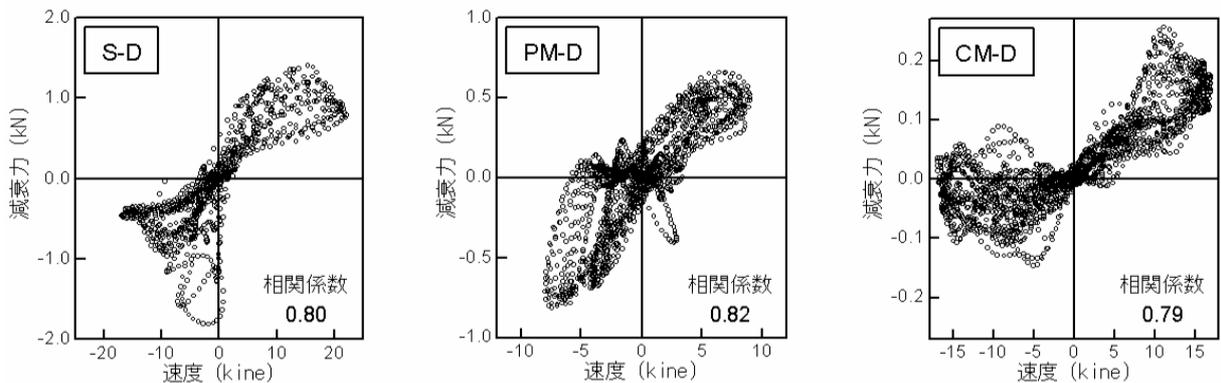


図-7 減衰力と速度の相関関係

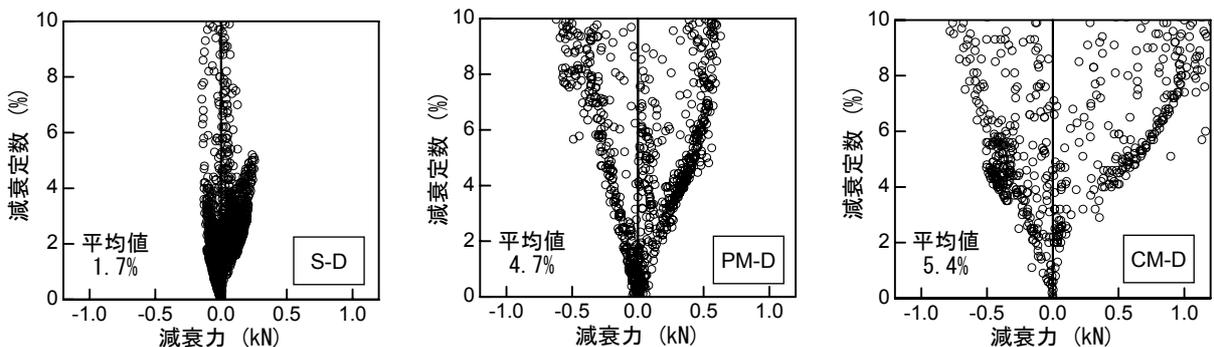


図-8 減衰定数の分布

#### 4. まとめ

石炭灰を混入した RC 部材の減衰性能を把握することを目的として、RC 構造物と鋼構造物をモデル化した小型模型の動的加振実験と静的載荷実験を行い、結果を比較検討した。また試験体を質点モデルと見なして運動方程式に従い簡便に減衰力を抽出する手法を提案し、適用を試みた。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 微少な加振から得た初期の減衰定数  $h_0$  はいずれの場合も既往の研究と同程度であった。
- (2) 提案する手法を用いて動的加振時の減衰力を数値評価することができた。
- (3) 減衰力から推定した減衰定数の平均値は初期減衰定数  $h_0$  を上回った。
- (4) RC 造を模した試験体において、ループごとの減衰定数の平均値は初期で  $h_0$  にほぼ等しく、塑性化後はともに 5%程度であった。
- (5) 石炭灰の混入により RC 部材の減衰性能が影響を受ける可能性があることを示した。

なお、本実験では動的加振でロッキングが発生したことなど、実験システムに改善の余地があるため、今後は課題の克服と更なるデータの蓄積を行い、減衰性能を解明するための基礎的資料を整備していくことが望まれる。

#### 参考文献

- 1) 梶山健二, 中谷誠, 荒木秀夫, 菅野俊介: 石炭灰を有効利用した実大鉄筋コンクリート柱の耐震性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp.241-246, 2003 年 7 月
- 2) 小林正和, 梶山健二, 荒木秀夫, 前川晴郁: 石炭灰を活用した実大コンクリート柱の材料特性分布, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp.193-198, 2004 年 7 月
- 3) 日本建築学会: 建築物の減衰, 丸善, 2000 年 10 月
- 4) 柴田明德: 最新 耐震構造解析, 森北出版, pp14-15, 1981 年 6 月

**謝辞** 本研究は科学研究費補助金(課題番号 15710062)の援助を受け実施した。実験に際しては、小林正和氏(現、鹿島建設(株))を始め、広島大学耐震工学研究室の皆様のご多大な協力を得た。ここに記し謝意を表す。

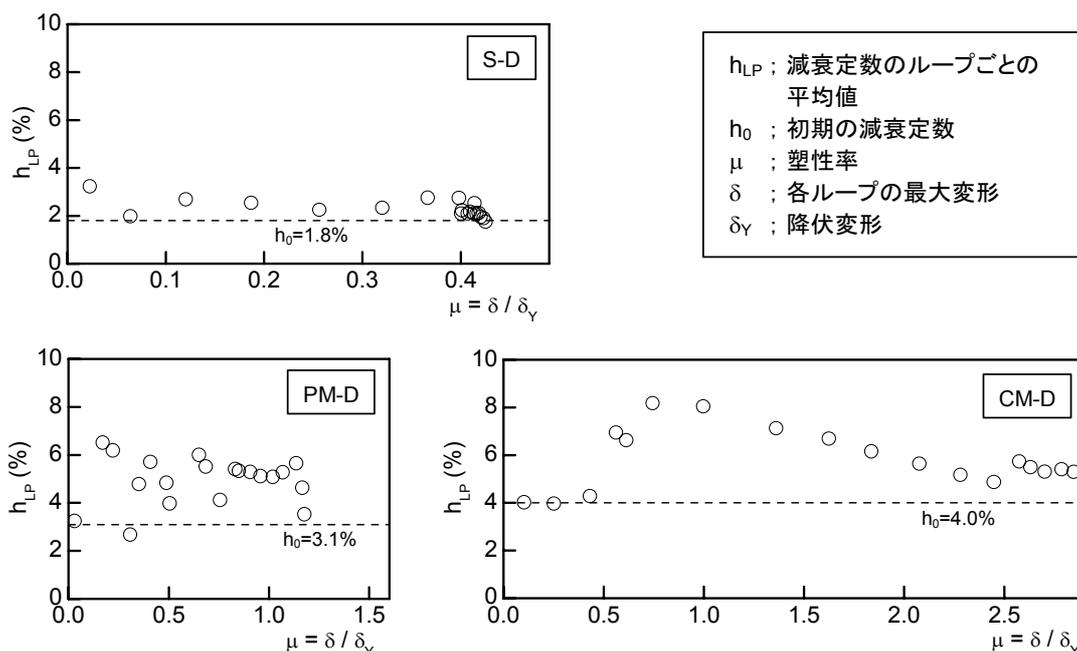


図-9 ループごとの減衰定数の推移