

論文 せん断柱と曲げ柱からなる並列 1 自由度系モデルの擬似動的実験

菅野 秀人*¹・櫻井 真人*²・藤井 賢志*³・西田 哲也*⁴

要旨: せん断降伏が先行する柱と曲げ降伏が先行する柱からなる並列 1 自由度系の擬似動的実験を実施し、等価線形化に関する検討を行った。入力地震波は位相特性の異なる 2 つの模擬波を使用した。半サイクル応答間の等価粘性減衰定数と地震動応答の非定常性を考慮した平均等価減衰の 2 つの評価を行い、耐力低下を生じる架構の等価減衰は、変位ピーク時点の応答変位量だけではなく、前ピーク時からの変位増分量ならびに、それまでに経験する応答サイクル数に依存する性状を示した。等価線形応答解析による応答推定では、応答ヒステリシスのスリップ性状が強い場合は実験結果に対して過大評価となる結果となった。

キーワード: 耐力低下, 擬似動的実験, 等価減衰, 等価線形化法

1. はじめに

現在の既存建築物の耐震診断法は基本的に建築物の保有する強度と変形能力の積を指標とする評価が行われており、この手法では地震時の最大変形量が不明であるため、地震時の損傷状態を評価することが困難である。近年、既存建築物を対象とした耐震診断や損傷度評価において、新築建築物の耐震性能評価法の 1 つとして採用されている地震時の最大応答を推定する手法（等価線形化法）などを用いた方法が提案されている。

せん断降伏が先行する部材などのような脆性部材が混在する鉄筋コンクリート造架構を対象とした等価線形化法による耐震性能評価に関して、松川ら¹⁾はせん断破壊して水平方向に崩壊する架構を対象として、安全限界状態を等価線形化法で合理的に評価する手法を提案している。また藤井ら²⁾は、既存鉄筋コンクリート造・鉄骨鉄筋コンクリート造建築構造物を対象に等価線形化法により地震時最大応答の推定を試み、時刻歴応答解析との対応を検討している。ここではせん断破壊する部材と曲げ破壊する部材が混在する既存建築物の地震応答は、地震応答スペクトルが同一であっても位相特性により大きく異なり、特に継続時間の短い地震動に対しては、既往の等価線形化法による推定値は過大評価となる可能性があることが示されている。

これら既往の研究では、数値解析的な検討や脆性部材のモデル化を目的とした静的漸増載荷実験が主流であり、地震応答性状を実験的に検討した事例は少ない。そこで本研究では、せん断降伏が先行する鉄筋コンクリート造柱試験体 1 体と曲げ降伏が先行する柱試験体 1 体か

らなる並列 1 自由度系モデルを対象とした擬似動的実験を行った。擬似動的実験ではスペクトル特性が同一で、位相特性の異なる 2 種類の入力地震波を使用して、等価線形化法による地震時最大応答推定の観点からその応答性状の違いについて検討した。

2. 擬似動的実験の概要

2.1 試験体

試験体は、破壊性状の異なる 2 体の鉄筋コンクリート造柱試験体とし、ひとつはせん断降伏が先行する柱（以後、RCS 試験体と呼ぶ）、もうひとつは曲げ降伏が先行する柱（以後 RCM 試験体と呼ぶ）とした。柱断面寸法は両試験体で同一の 300mm×300mm とし、柱内法寸法は、RCS 試験体で 600mm（せん断スパン比 1.0）、RCM 試験体で 1,100mm（せん断スパン比 1.8）とした。実験は両試験体を 1 体ずつ用いた 2 体同時加力の擬似動的実験である。両試験体の形状および配筋図を図-1 に、試験体の構造諸元と材料特性を表-1, 2 に示す。両試験体でせん断補強筋量は同一とし、柱内法寸法と主筋量、柱軸力により、2 つの破壊性状の異なる試験体を設計した。

RCS 試験体では、せん断降伏後の急激な耐力低下に対して安定した加力制御を補償するため、試験体の加力方向両側面に平バネ 2 枚（以後、補剛バネと呼ぶ）を設置した。補剛バネには板厚 32mm、幅 600mm の平鋼 (SM490A) を用い、補剛バネの内法高さは 900mm とした。補剛バネの水平剛性は、擬似動的実験に先立ち実施した補剛バネのみの加力試験（水平変位 20mm までの静的交番載荷）の結果より 8.1kN/mm となっている。

*1 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*2 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 助教 博士（工学）（正会員）

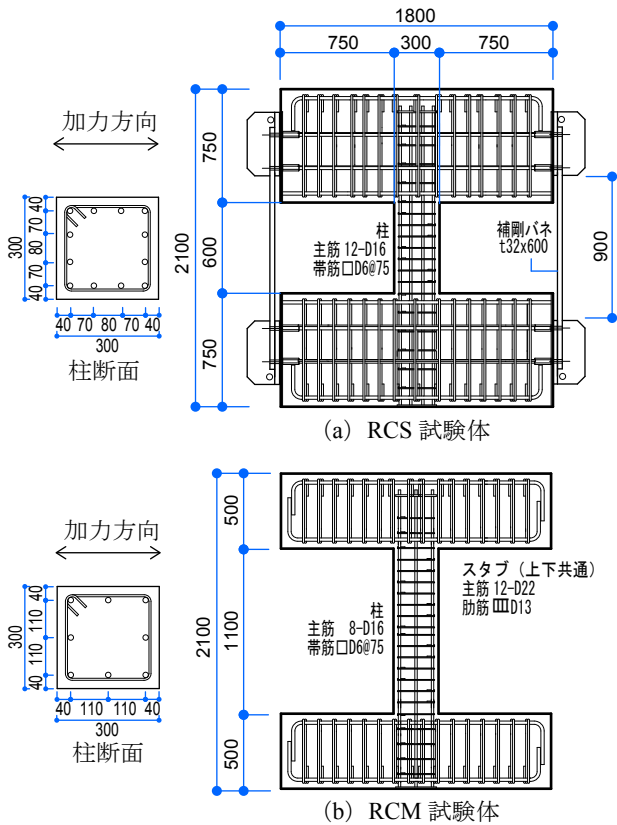
*3 千葉工業大学 工学部 建築都市環境学科 教授 博士（工学）（正会員）

*4 秋田県立大学 システム科学技術学部 建築環境システム学科 教授 博士（工学）（正会員）

表一 試験体構造諸元

試験体名	$b \times D^{*1}$	h_0^{*2}/D	$P_w(\%)^{*3}$	$P_g(\%)^{*4}$	軸力比 ^{*5} [軸力]	曲げ強度 ^{*6} 計算値	せん断強度 ^{*7} 計算値	せん断 余裕度 ^{*8}
RCS	300mm ×	2.0	0.28	2.65	0.20 [432kN]	411kN	289kN	0.70
RCM	300mm	3.6		1.77	0.05 [108kN]	125kN	175kN	1.40

*1 $b \times D$: 柱幅 × 柱せい, *2 h_0 : 柱内法寸法, *3 P_w : せん断補筋比, *4 P_g : 主筋比, *5 軸力比 = $N/(bD\sigma_B)$ [N : 軸力, σ_B : コンクリート実強度], *6 曲げ降伏時せん断力, *7 荒川 mean 式による, *8 せん断強度計算値 / 曲げ強度計算値



図一 試験体配筋図 (寸法単位 mm)

表一 材料特性

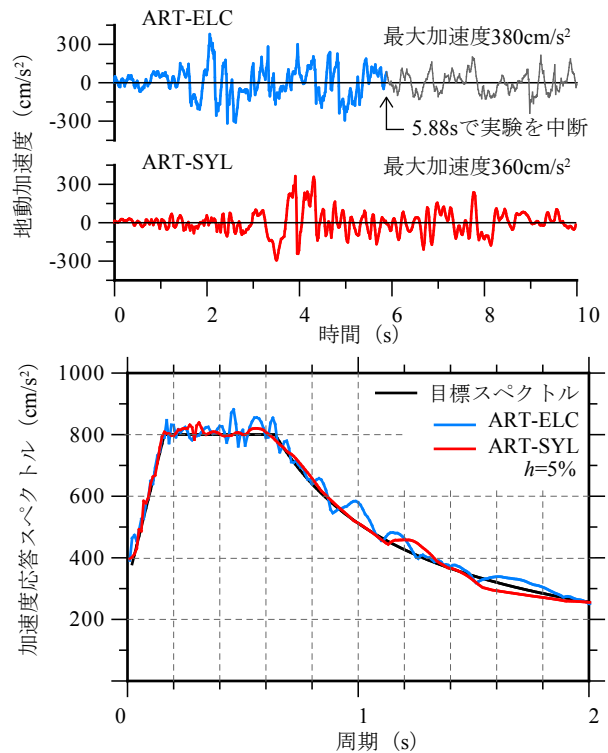
コンクリート ^{*1}		鉄筋		
σ_B^{*2} (N/mm ²)	ϵ_B^{*3} (%)	鉄筋径 [鋼種]	σ_y^{*4} (N/mm ²)	ϵ_y^{*5} (%)
23.2	0.185	主筋 D16 [SD345]	379.1	2.19
		帯筋 D6 [SD295]	358.2	2.00

*1 4 週強度試験結果による, *2 σ_B : 圧縮強度, *3 ϵ_B : 圧縮強度時ひずみ度, *4 σ_y : 降伏強度, *5 ϵ_y : 降伏時ひずみ度

2.2 入力地震波

擬似動的実験に使用する入力地震波には、スペクトル特性において固有周期の影響が応答性状に大きく反映しないケースを検討するため告示波スペクトルに基づく模

擬波を採用した。なお本研究では、表層地盤の周期特性は考慮していない。位相特性の違いによる地震応答性状への影響を検討するため、El Centro (1940) NS 方向と Sylmar (1995) NS 方向の2つの観測波の位相を使用した。図一2に入力地震波の時刻歴と加速度応答スペクトルを示す。どちらも継続時間60秒の告示波を作成し、実験では主要動部分を含む10秒間の波形を抜き出して入力地震波とした。以後、El Centro 観測波位相の模擬波を ART-ELC, Sylmar 観測波位相の模擬波を ART-SYL と呼ぶ。なお ART-ELC を入力地震波とした実験では、後述のとおり 5.88s で実験を中断した。



図一 入力地震波時刻歴波形と加速度応答スペクトル

2.3 実験方法

試験体2体 (RCS 試験体と RCM 試験体1体ずつ) が並列に設置されたせん断1質点系モデルを想定して擬似動的実験を行った。質点重量は1000kNとし、内部粘性減衰については、本実験では耐力低下域までの応答を扱うため、扱いが容易な初期剛性比例型減衰を採用した。

ただし、顕著な剛性低下が生じたときの粘性減衰が応答に及ぼす影響を鑑みて減衰定数は1%とした。

両試験体を図-3に示すような加力装置に各々設置して2体同時加力の擬似動的実験を行った。各加力装置は、水平油圧ジャッキ1台と鉛直油圧ジャッキ3台を用いて、試験体に逆対称曲げせん断力を作用させた。応答計算より算出される目標水平変位へ、水平ジャッキをデジタル式変位計により制御し、鉛直ジャッキ3本によって上スタブの回転を拘束すると同時に一定軸力に制御した。なお、上スタブの回転拘束は変位制御により行った。油圧ジャッキが目標値に到達した時点で、各油圧ジャッキに設置したロードセルによる荷重値を応答計算にフィードバックし、逐次数値計算を行った。なお、RCS試験体ではロードセルの荷重値から補剛バネの負担せん断力(水平変位計測値に補剛バネの剛性を乗じて評価)を差し引いた値を応答計算に使用した。数値積分にはOS法³⁾を用い、積分時間刻みは0.01sとした。

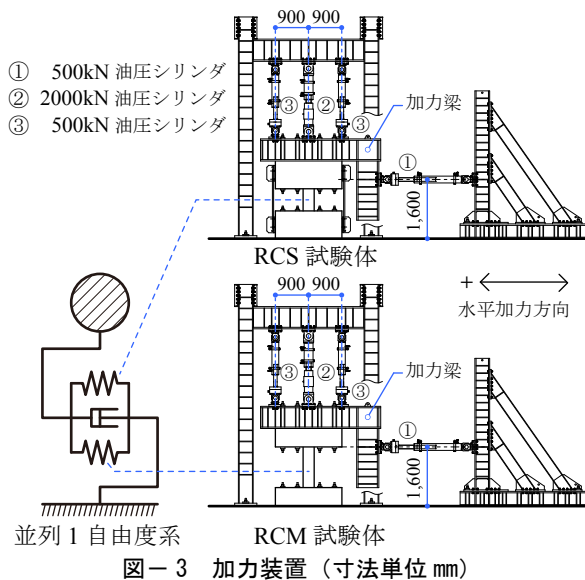


図-3 加力装置 (寸法単位 mm)

3. 実験結果の概要

図-4に変位応答時刻歴, 図-5に各試験体の最終破壊状況を示す。ART-ELCでは、5.06s(水平変位25.4mm)時点でRCS試験体に設置した補剛バネの可撓域上下端のひずみ計測値が1800 μ に達し、補剛バネが降伏すると考えられたため、水平荷重を一度除荷し、補剛バネを取り外して水平変位を5.06s時点(25.4mm)に戻して実験を再開し、その後5.88sで実験を中断した。ただし、実験中断時点でRCS試験体は水平耐力、軸支持能力の喪失には至っていなかった。

RCS試験体は、ART-ELCで1.85s、ART-SYLで3.56sで水平変形が2.4mm(部材角1/250)付近に達し、帯筋(計7段帯筋のうち下から2段目~5段目)が降伏し、せん断ひび割れが確認された。その後ART-ELCでは水

平変形-3.21mm(部材角1/187, 2.09s)、ART-SYLでは-2.85mm(部材角1/210, 3.94s)で最大耐力に達し、その後は変位増大に伴って耐力低下が確認された。

RCM試験体は、ART-ELCで水平変位が6.28mm(部材角1/175)、ART-SYLで6.11mm(部材角1/180)で柱脚引張側主筋が降伏し、その後、どちらも水平変位が7.1mm(部材角1/155)に達するまでに柱頭・柱脚の主筋が曲げ降伏した。

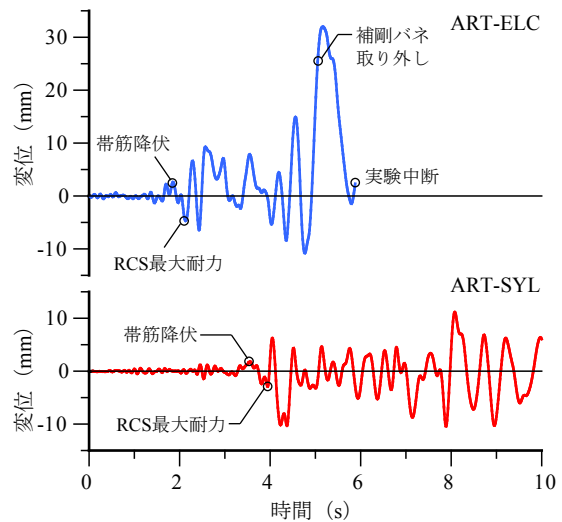
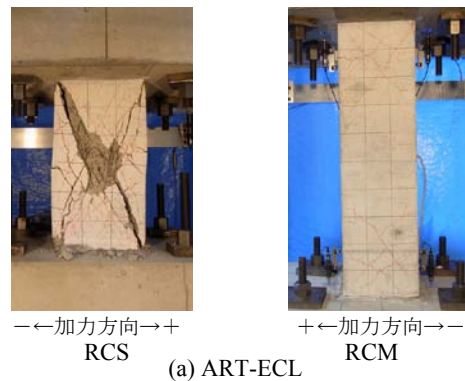
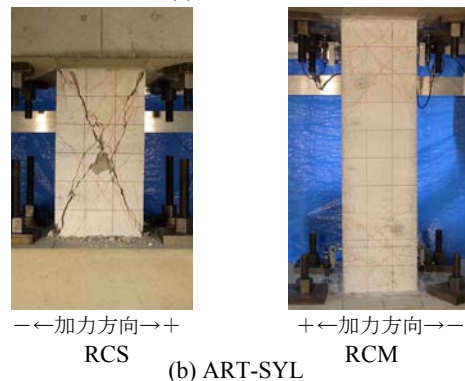


図-4 変位応答時刻歴波形



(a) ART-ECL



(b) ART-SYL

図-5 最終ひび割れ状況

図-6に各試験体の荷重-変位関係を示す。ここで慣性力は、擬似動的実験の応答計算結果の加速度記録から算出した。慣性力-変位関係をみると、ART-ELCでは最大耐力に到達後、耐力低下しながら繰り返し履歴ルー

プを描き最大変位に到達し、ART-SYLでは正側の最大耐力到達時と最大変形時の2度大きな履歴ループを描いており、応答繰り返し回数の違いが確認できる。

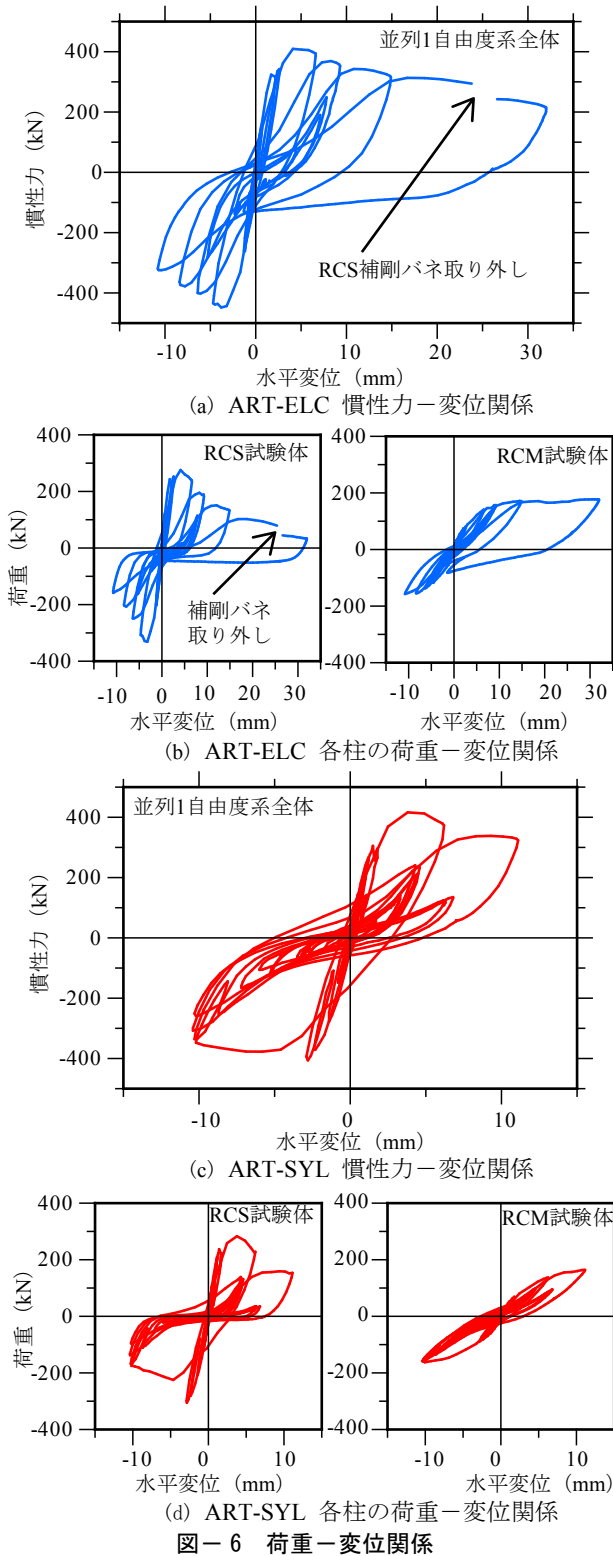
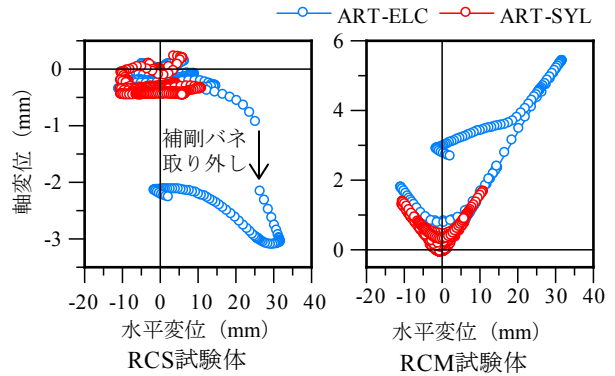


図-7には水平変位と柱軸変位の関係を示す。ここで軸変位は正側が試験体の伸びを、負側が縮みを表す。入力波の違いによらずRCM試験体は、水平変形の増大に伴って、鉛直変位が伸び方向に増大している。RCS試

験体では、ART-ELCにおいて補剛バネを外した時点で軸変位が大きく変化していることがわかる。これは補剛バネにより試験体の軸変形を拘束していたため、補剛バネが軸力の一部を負担していたものと推察されるが、これについて本稿では、十分な検討ができていない。この補剛バネの軸力負担による応答性状への影響については、今後さらに詳しい検討が必要である。



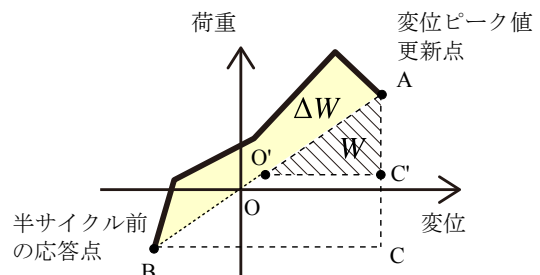
4. 等価減衰の検討

等価線形化法による地震時最大応答推定のための等価減衰について考察を行う。ここでは応答変位のピーク値が更新した時点に着目し、半サイクル間の履歴ループ面積から算出する等価粘性減衰定数 h_{eq} と、柴田ら⁴⁾による平均等価減衰の考え方を参考にした平均等価減衰定数 h_s の2つの方法により等価減衰の評価を行った。なお以後の検討では、ART-ELC入力時において補剛バネを取り外した5.06s以降部分については検討を除外する。

等価粘性減衰定数 h_{eq} は、図-8のように水平変位のピーク値が更新する半サイクル間の履歴ループ面積 ΔW を用いて次式により算出した。

$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

ここで、 W は変位ピーク値の更新点(図-8点A)と、その半サイクル前応答点(同図点B)とA点の中点である点O'、同図中の点Aと点Cの中点である点C'の3点よりなる $\triangle O'AC'$ の面積で定まるポテンシャルエネルギーとした。



等価粘性減衰定数 h_{eq} は、変位ピーク更新時のみの履歴ループを評価しているが、柴田らは地震動に対する応答の非定常性を考慮した平均的な等価減衰 (Substitute Damping) を提案している。本研究ではこの平均等価減衰の考え方を参考にして、各試験体 (RCS 試験体, RCM 試験体) ごとの平均等価減衰を、地震開始 ($t=0$) 時点から変位ピークが更新する時点 ($t=t_{pi}$) までの間に各試験体の履歴吸収エネルギーが、それぞれ等価なダッシュポットの消費エネルギーに等しいと仮定し、そのときの減衰定数を当該変位ピーク更新時までの平均的な等価減衰定数 h_s として次式で定義した。

$$h_s = \frac{\int_0^{t_{pi}} Q \dot{x} dt - \frac{1}{2} Q_{pi} x_{pi}}{2m\omega_e \int_0^{t_{pi}} \dot{x}^2 dt} \quad (2)$$

ここで、 t_{pi} は変位ピーク更新時間、 \dot{x} は応答速度、 Q は各試験体のせん断力、 Q_{pi} 、 x_{pi} は当該ピーク時点のせん断力と応答変位、 m は質点質量、 ω_e は変位ピーク時の割線剛性より定まる等価固有円振動数を表す。

柴田らの平均等価減衰では、式 (2) の積分区間は地震動の全継続時間であり、ひとつの地震動応答に対して1つの平均等価減衰が定まるが、本研究で定義する平均等価減衰では、ひとつの地震動応答に対して変位ピークが更新する度に求まる。なお、時間 t_{pi} での履歴吸収エネルギーは、当該時間までの累積エネルギーからその時点の弾性ひずみエネルギーを引いて評価することとした。

図-9 に各試験体の変位ピーク更新時の h_{eq} と h_s を示す。ここで変位ピークの更新は正負ごとに判定して減衰定数を求めて、図-9 では変位ピークの絶対値を横軸としている。RCS 試験体, RCM 試験体のいずれの場合も h_{eq} と h_s を比較すると h_{eq} の方が高めの傾向となっていることが確認できる。RCS 試験体ではどちらの減衰定数もばらつきは大きい、比較的小さい範囲から変位増大に伴って減衰定数は漸増する傾向にあるが、ART-ELC では変形が 6mm (1/100) を越えると減衰定数は漸減する傾向が見られる。ART-SYL では変形が 10mm (1/100) 程度まで減衰定数は増加し続けるが、その後急激に低下することが確認できる。図-10 には RCS 試験体について ART-ELC, ART-SYL それぞれにおいて h_{eq} が比較的高めの値となる水平変位 6mm または 10mm 付近 (図-9 中の A~C) と、 h_{eq} が漸減し、最大応答変位となる点 (図-9 中の D~F) の半サイクル履歴ループを示す。比較的高めの h_{eq} である図-10 の A~C においては耐力低下しながらも大きな履歴ループを描いているのに対し、D~F は、繰り返し応答によるスリップの影響が顕著に出ていることが確認できる。

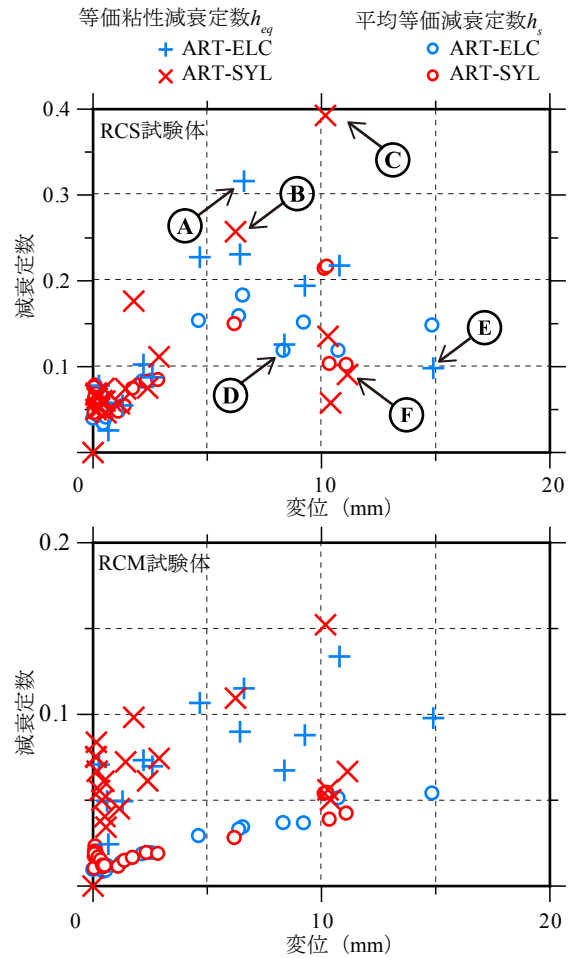


図-9 各試験体の等価減衰定数

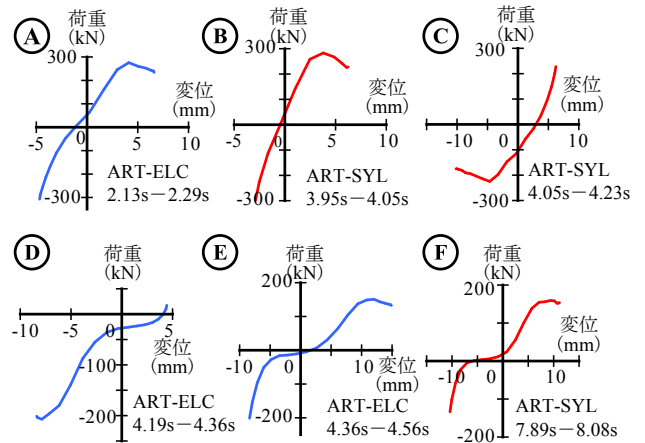


図-10 変位ピーク更新時の半サイクル履歴ループ

図-11 には式 (2) のせん断力 Q を慣性力とした、すなわち変位ピーク更新時点までの地震入力エネルギーに基づく振動系全体の h_s を示す。これには前述の各履歴減衰と系の内部粘性減衰が含まれているといえる。なお、図-11 中の A~F 点は図-9, 10 のそれと対応している。RCS 試験体の履歴減衰性状と同様に、ART-ELC では変形が 6mm 付近から減衰定数が漸減する傾向に対し、ART-SYL では変形 10mm 付近で h_s が急激に低下してい

る。ここで、変位ピーク更新時における前変位ピーク値からの増加量について着目すると、ART-SYLではC点のように変位増加量が大きい場合は h_s も高くなるが、F点のように変位増加量が小さい場合は、前述の図-10で示したように、RCS試験体がスリップ性状の強い履歴形状となるため h_s は低く評価される。また、ART-ELCでは、E点を見ると変位増加量は比較的大きいが、 h_s はART-SYLの傾向と比べてやや低い値となっている。これは、ART-ELCでは、RCS試験体降伏後の応答繰り返し数がART-SYLに比べて多いことが原因のひとつ考えられる。このように h_s の性状はRCS試験体の履歴性状に依存しており、変位ピーク時の応答変位量だけではなく、前ピーク時からの変位増加量ならびに、それまでに経験する応答サイクル数に強く依存していることが推察され、さらに詳細な検討が必要である。

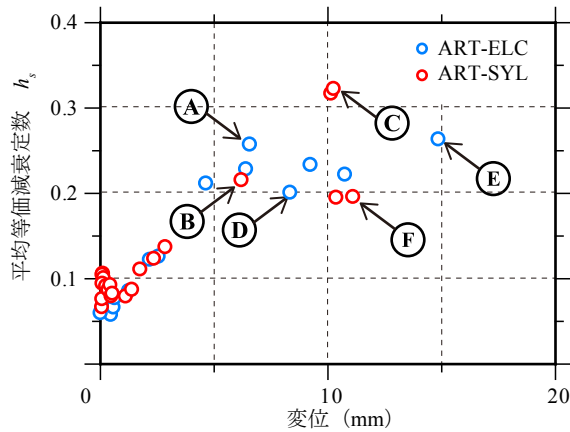


図-11 系全体の平均等価減衰定数

最大応答変位時ならびに h_s が特徴的な傾向を示した図-11中のA~Fにおける h_s と式(2)の ω_e から求める等価周期 $T_{eq} = 2\pi/\omega_e$ を用いて等価線形応答解析を行った。解析における入力地震波は、A~Eは当該変位ピーク到達するまでの時間とし、Fについては全地震動継続時間とした。図-12には等価線形応答解析による最大応答値と、擬似動の実験結果の慣性力-変位関係の包絡線を耐力曲線として加速度変位応答スペクトル上にプロットしたものを重ねて示す。比較的大きな履歴ループを描いていたA~Cは実験結果とおおむね良い対応を示している。しかしスリップ傾向のある履歴形状となっていたD~Fでは実験結果に対して過大評価となっている。また本研究の場合は、ART-ELCよりもART-SYLの方が実験結果と良い対応を示しているが、どちらも全地震動継続時間を入力した最大応答値の推定については、実験結果とよい対応を示すことができなかったため、等価周期ならび等価減衰についてさらに詳細な検討が必要である。

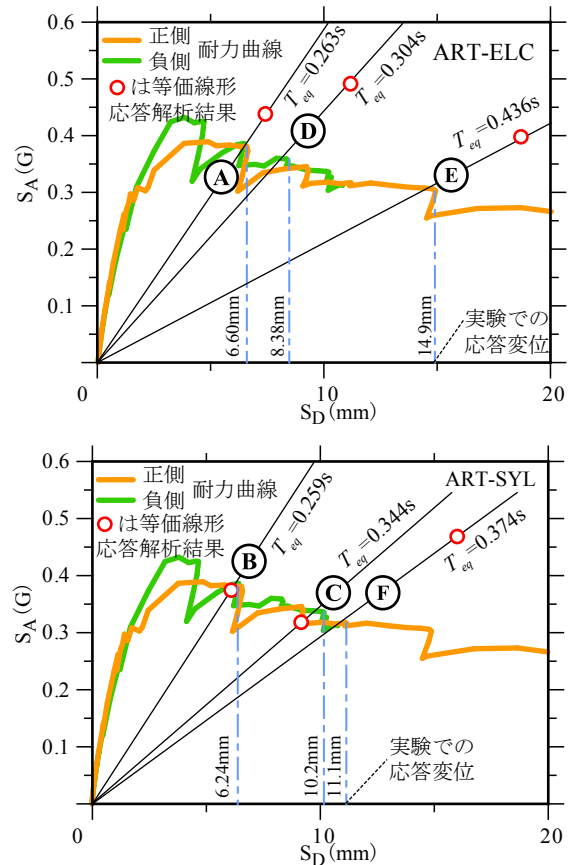


図-12 加速度変位応答スペクトル

6. まとめ

せん断柱と曲げ柱からなる並列1自由度系の擬似動の実験を実施し、等価減衰の評価と等価線形応答解析を実施した。耐力低下を生じる架構の等価減衰が地震動による損傷過程の影響を受けることは確認できたが、等価線形化法による最大応答推定を行うには、等価周期ならび等価減衰についてさらに詳細な検討が必要である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (25420586, 26420556) の助成を受けています。ここに付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 松川 和人, 三浦 耕太, 前田 匡樹: せん断破壊する柱で構成される鉄筋コンクリート造骨組の安全限界変形評価法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, 2011
- 2) 藤井賢志, 倉本洋: 縮約等価1自由度系による既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の地震応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第678号, pp.1227-1236, 2012
- 3) 中島正愛, 石田雅利, 安藤和博: サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学構造系論文報告集, No.417, pp.107-117, 1990
- 4) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981