

鉄筋コンクリート造骨組のオンライン地震応答実験

——アンダーシュートが応答に及ぼす影響——

On-Line Tests on Reinforced Concrete Frames

——Effects of Undershooting on the Responses——

梶 山 健 二*・豊 嶋 学**・隈 澤 文 俊*

中 埜 良 昭*・岡 田 恒 男*

Kenji KABAYAMA, Manabu TOYOSHIMA, Fumitoshi KUMAZAWA,
Yoshiaki NAKANO and Tsuneo OKADA

1. は じ め に

オンライン地震応答実験（以下オンライン実験）は部材や構造物の複雑な地震応答を振動台実験よりも簡便に把握するために考案されたもので、試験体の加力実験とコンピュータによる数値計算を組み合わせた実験手法である。オンライン実験では、一般的に、加力装置により試験体に変形を強制し、そのときの復元力に基づいてコンピュータの数値計算により運動方程式を解き応答を計算するという操作を各ステップごとに繰り返すことにより、試験体の地震時における挙動をシミュレートしていく。しかし、試験体に変形を強制するとき、加力装置の位置決め精度、治具のゆるみや変形などに起因して、試験体の実際の変形は必ずしも目標の変形と一致せず、多少のずれを生じる。本研究では、上記の要因により試験体の実際の変形が目標の変形よりも小さくなる現象をアンダーシュート、逆に目標よりも大きくなる現象をオーバーシュートと定義する。実験において、塑性化する試験体を対象とする場合、試験体の応答特性を損なう恐れがあるために、オーバーシュートが生じてても試験体を引き戻すことはできない。したがって、アンダーシュートとなる方が望ましい。しかし一方で、アンダーシュートは試験体の応答を増幅させることが指摘されている¹⁾。

筆者らはオンライン実験において運動方程式中に仮定する粘性減衰の影響を調べるために、図-1に示す実験システムにより減衰定数をパラメータとし、鉄筋コンクリート造骨組を試験体として、3セットのオンライン実験を実施した²⁾。本実験は変位制御で行い、試験体の塑性化が予想されていたことから、オーバーシュートを生じないように制御した。その結果、実験中各ステップごとに一定値以下の範囲でアンダーシュートが発生した。

* 東京大学生産技術研究所 第1部

** 東急建設(株) 技術研究所

そこで本報告においては、加力の制御方法に基づき、アンダーシュートが発生したメカニズムを明らかにする。さらに、発生したアンダーシュートが試験体の応答に及ぼす影響に関して、実験結果ならびに質点モデルの断塑性応答解析から検討を行う。

2. アンダーシュートの発生

2-1 アンダーシュートが発生するメカニズム

本研究におけるオンライン実験は、4本の鉄筋コンクリート造柱を鋼製治具により一体化した骨組を試験体として実施した。そして、図-1に示すように、加力装置として電気油圧式アクチュエータ（以下アクチュエータ）を使用し、試験体の変位を試験体頂部に設置した外部変位計によりモニターしながら制御した。制御の基準としては、アクチュエータの有効ストローク（60cm）とD/Aボードの分解能（12ビット）から下式のように定まる最小制御変位 δ_{\min} を設定した。

$$\delta_{\min} = 60 \div 4096 = 0.0146 \text{ (cm)} \cdots (1)$$

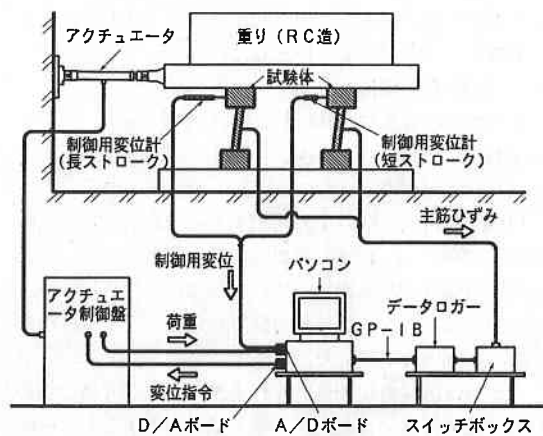


図-1 実験システム

本実験では、治具のゆるみや変形などにより、一般的にアクチュエータの出力変位増分に対して試験体の実際の変位増分が小さくなることを考慮して、図-2に示す制御方法を用いた。図中において、現在の変位から次のステップの目標変位までの増分を Δx_0 とする。加力は以下の手順に従い実施した。

- ① アクチュエータの出力変位増分が Δx_0 に到達するまで $4\delta\text{min}$ ずつ加力する。
- ② $j=1$ とする。
- ③ 試験体の変位を外部変位計により測定し、目標変位までの差分 Δx_j を求める。このとき、試験体の変位が図中の斜線で示す範囲に入っていれば、そのステップの加力を終了する。
- ④ アクチュエータの出力変位増分が Δx_j に到達するまで $2\delta\text{min}$ ずつ加力する。
- ⑤ $j=j+1$ として③に戻る。

目標変位を目指して加力しており、試験体の実際の変位増分はアクチュエータの出力変位増分よりも一般に小さくなることから、最終的には試験体の変位が斜線部分のうち目標変位以下の範囲に入ったところで加力を終了する。つまり、各ステップごとに $2\delta\text{min}$ (0.0292cm) 以下のアンダーシュートが発生することとなる。

2-2 実験で生じたアンダーシュート

本研究で実施した3セットの実験中に実際に発生したアンダーシュートの波形を図-3(a), (b), (c)に示す。この中で、減衰定数3%の実験においては、アクチュエータの挙動がやや不安定であったことから、アンダーシュ

ートの波形が多少乱れてオーバーシュートが生じている場合もある。また、減衰定数1%の実験では、応答時刻3.6秒付近と5.7秒付近において波形が大きく乱れている。これは制御用に設置した外部変位計の不調が原因であった。以上の点を除外すれば、各実験とも各ステップごとに約0.03cm以下、つまり、 $2\delta\text{min}$ 以下のアンダーシュートが発生していたことがこれらの図から確認できる。また、発生したアンダーシュートの平均値はすべての実験についてはほぼ等しく、約0.014cmであった。

3. アンダーシュートが応答に及ぼす影響

3-1 履歴ループの変化

オンライン実験においては、実測した試験体の復元力を基に、そのステップでの各応答を数値計算により求める。アンダーシュートが発生すると、目標変位に達しない時点で加力が終了し、その点に関して復元力が測定さ

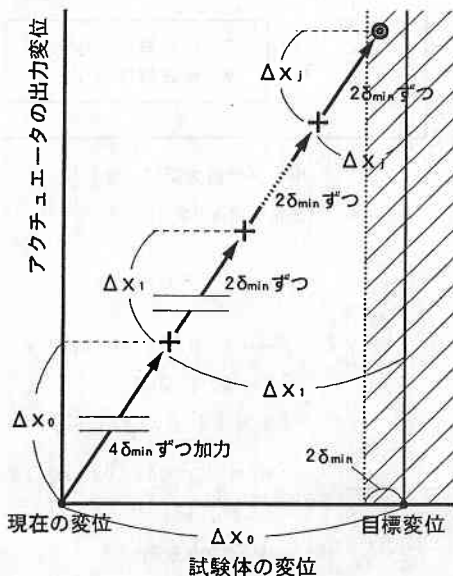


図-2 制御方法の概略

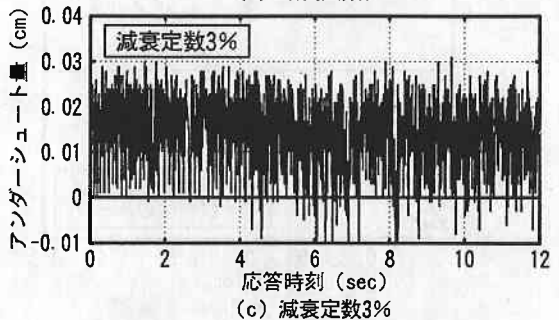
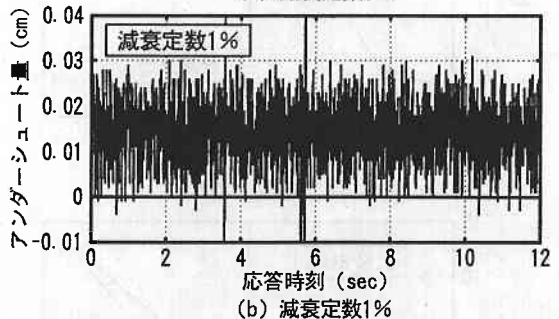
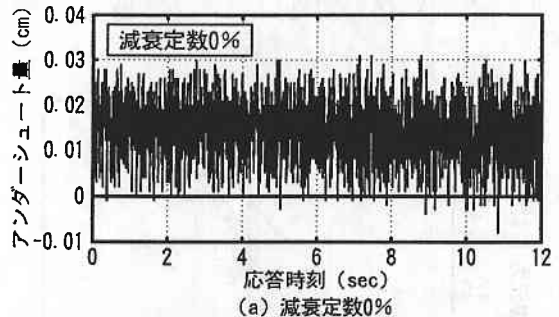


図-3 アンダーシュートの波形

研 究 速 報

れる。しかし、数値計算上はその測定された値を目標変位点での復元力と見なすため、そのステップでの試験体の復元力はアクチュエータが試験体を押す加力方向の場合は過小評価され、逆に引く方向の場合は過大評価されることとなる。その結果、数値計算上の履歴ループは試験体の実際の履歴ループと異なることとなる。減衰定数 0% の実験における、初期の小変形時と応答が進んだ後の大变形時に関して、数値計算上の履歴ループと試験体の実際の履歴ループを図-4(a), (b) に示す。図からわかるように、変形が小さく試験体の応答が弾性に近い場合には、数値計算上の履歴ループは試験体の実際の履歴ループから大きくずれ、反時計回りの逆ループとなっている。一方、変形が大きくなり塑性化が進むと、変位に対してずれは相対的に小さくなり、2つの履歴ループはほぼ一致しており、アンダーシュートの影響はほとんど表れていない。したがって、アンダーシュートは試験体の応答が小さい範囲で顕著に作用することがわかる。

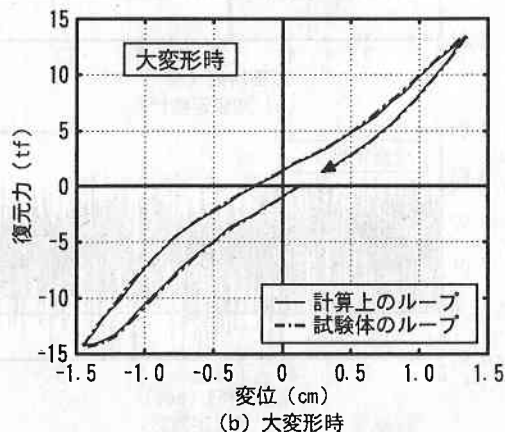
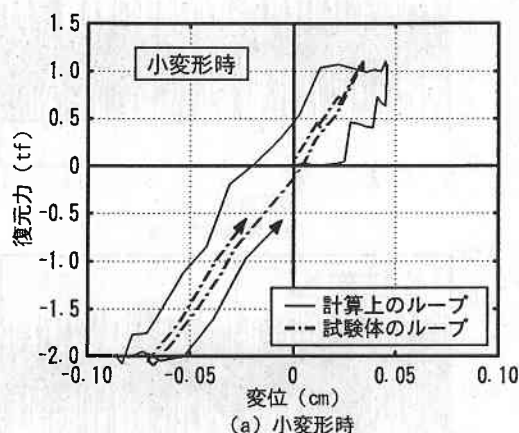
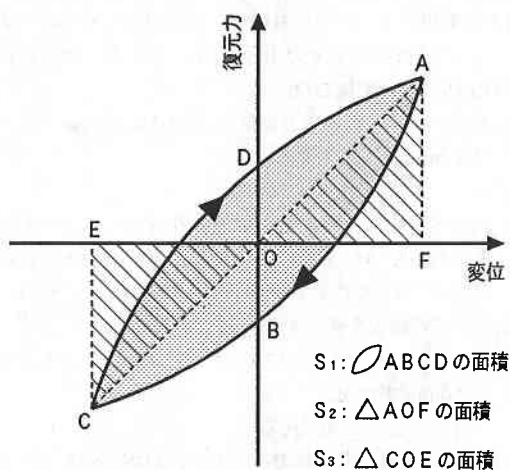


図-4 履歴ループの変化

3-2 負の減衰の発生

履歴ループの変化が試験体の応答に及ぼす影響を調べ



$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{S_1}{S_2 + S_3} \dots (2)$$

図-5 等価粘性減衰定数 (heq) の算定方法

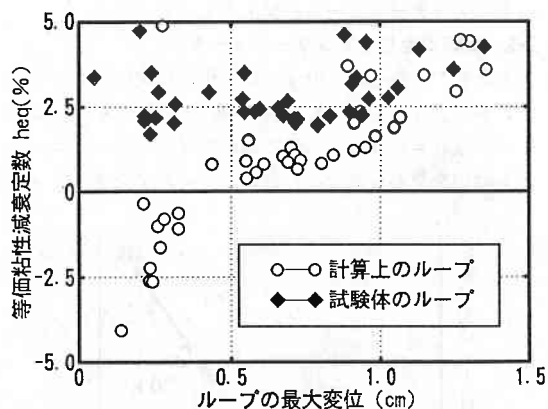


図-6 等価粘性減衰定数と最大変位

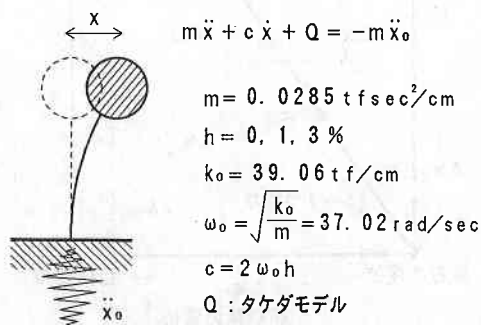


図-7 解析のための質点モデル

るために、数値計算上と試験体の実際の各履歴ループについて、図-5に示す算定方法に基づき、等価粘性減衰定数 (heq) を算出した。その結果を履歴ループの最大変位との関係として図-6に示す。図からわかるように、変位が小さく試験体の応答が弾性に近い場合、図-4(a)に示したように数値計算上の履歴ループは逆ループとなっていたために、等価粘性減衰定数は負の値となっている。そして、変位が大きくなり、試験体の塑性化が進むにつれて値が大きくなり、試験体の実際の履歴ループから求めた等価粘性減衰定数に接近している。つまり、実験においてアンダーシュートが発生すると、試験体の応答が小さいほど、数値計算から求めた応答による履歴は試験体の実際の履歴からずれを起こし、その結果、負の減衰が発生することとなる。

3-3 応答の増幅

アンダーシュートにより負の減衰が発生すると、試験体の減衰は過小評価され、その結果、数値計算により算出される試験体の応答は増幅されるものと思われる。この点に関してより詳細に検討するために、アンダーシュートを考慮しない場合と実験結果の平均値である 0.014cm の一定のアンダーシュートを与えた場合について、質点モデルの弾塑性応答解析を実施した。質点モデルは図-7に示すように、実験骨組を 1 質点系に置換したもので、復元力特性はタケダモデルに従うものとし、地動加速度にはオンライン実験で入力した加速度を用いた。減衰定数 0 % の場合について、オンライン実験とそれぞれの解析の変位波形を比較し、応答時刻に応じて 3 つの区間に分割して図-8(a), (b), (c) に示す。実験結果の波形はアンダーシュートを考慮しない解析の波形に比べ振幅が大きく、アンダーシュートを与えた解析の波形と比較的良好な対応を示していることがわかる。したがって、本研究のオンライン実験ではアンダーシュートが発生したことにより、試験体の応答が増幅されていることが確認できる。

4. ま と め

本研究におけるオンライン実験では、加力の制御方法の特性から約 0.03cm 以下のアンダーシュートが発生していた。そして、アンダーシュートが試験体の応答に及ぼす影響を検討した結果、以下の知見を得た。

- ① アンダーシュートは試験体の応答が小さい範囲で顕著に作用し、数値計算から求めた応答による履歴と試験体の実際の履歴の間にずれを起こさせる。
- ② アンダーシュートが発生すると、数値計算において

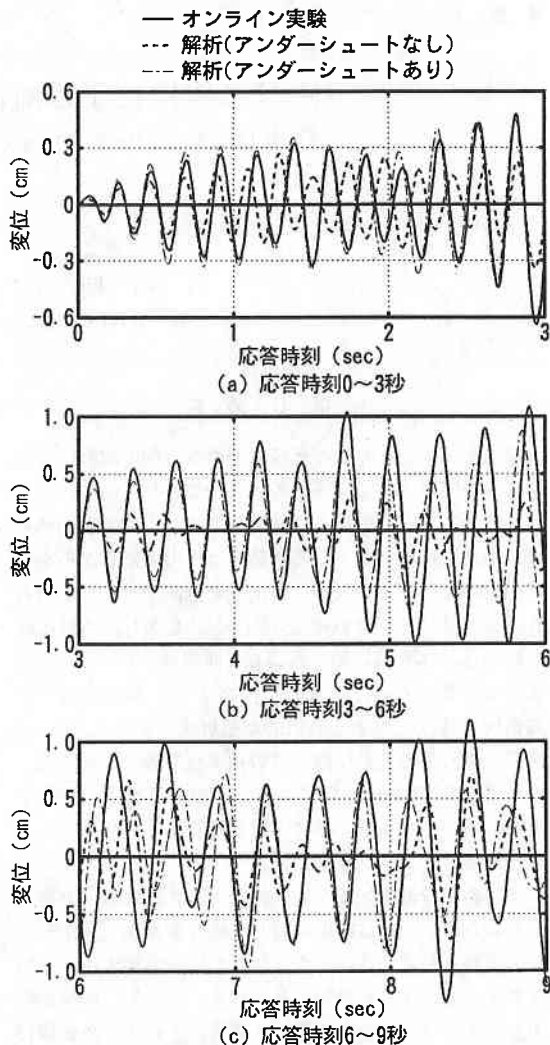


図-8 実験と解析の変位波形

負の減衰が作用し、試験体の減衰は過小評価される。

- ③ アンダーシュートは試験体の応答を増幅させる。

(1993年5月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 加藤・中島・上之園：仮動的実験手法による地震応答性状 (その1～2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 951-954, 1984.10.
- 2) 桃山・豊嶋・隈澤・中埜・岡田：鉄筋コンクリート造フレームのオンライン地震応答実験, 生産研究44巻10号, pp. 59-62, 1992.10.