

縮小RC模型16体一斉加振実験による地震応答の 不確定性評価

高橋良和*・小林望**

*正会員 工(博) 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

**正会員 清水建設(株) 土木技術本部 (〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3 シーバンス S 館)

1. はじめに

近年、2011年東北地方太平洋沖地震をはじめ、数多くの巨大地震が発生しており、多くの土木・建築構造物は甚大な被害を受けている。これら地震の教訓として、構造技術者は、耐震設計で想定している以上の地震が発生した際の構造物がどの程度の残余性能を有しているかを把握することに努めなければならない。耐震工学で対象とする問題は、構造物の非線形動的挙動である。このような挙動はカオス的な性質も有しているため、初期条件の違いにより結果が大きく変化することも稀ではない。想定外の地震に対する構造物の残余性能を把握するということは、この動的非線形挙動における不確定性を把握することに他ならない。耐震設計における不確定性について、構造物や入力地震動の不確定性を考慮した地震危険度解析などが実施されてきている。しかしながら、構造物挙動の不確定性に関し、材料の不確定性に関するデータの蓄積はあるものの、構造物の動的挙動の不確定性を評価するためのデータはほとんどない。これらデータは動的実験により得られるものであるが、動的実験は静的実験に比べて実施することは容易ではなく、比較研究に不可欠である同一動的入力を保証すること自体も困難である。

本研究は、防災科学技術研究所兵庫県耐震研究センターの実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)の振動台上に16体のRC柱供試体を設置、一斉加振することで、構造物に入力する動的外力をできるだけ揃え、動的応答の不確定性を評価することを目的とするものである。

2. 震動台実験概要

2.1 実験供試体

本実験で用いる供試体を設計するにあたり、断面が2.4m×2.4mの正方形で、基部から高さ12mに約560t

の桁を支持する橋脚をプロトタイプとし、これを長さの縮尺率が1/7.5となるように縮小したものを模型供試体(図-1)として製作した。供試体の柱部断面は320mm×320mmの正方形で、主鉄筋(軸方向鉄筋)はD10を16本、帯鉄筋(横拘束筋)はD4を40mm間隔で、断面の中央部位置にD4の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、主鉄筋比は1.11%、帯鉄筋体積比は0.86%となる。

また、柱に軸力を作用させるために、鉄筋コンクリートの重錘を製作した。上述の相似則に従い、橋脚基部における軸応力が原型のそれと等しくなるように重錘を設計し、重錘の重心が橋脚基部から高さ1600mmとなるように設置した。重錘は一辺が1600mmの立方体であり、橋脚基部における軸応力は約1MPa、重錘質量は約10tとなる。重錘部と柱部の接合部には、柱部上部の変形を拘束しないように、柱基部を基準とした高さ方向1100mmの位置に発泡スチロールを挿入した。

材料設計強度は、コンクリートの標準基準強度が24MPa、主鉄筋、帯鉄筋、中間帯鉄筋の材質としてはすべてSD345を用いた。

供試体は全て同じ設計により16体製作し、供試体名は、供試体01から供試体16とした。後の実験データの検証などにはこの供試体名を用いる。本実験では16体の供試体を同時に震動させることにより、動的応答のばらつきに関する基礎データを収集することを目的としている。そのため、実験前に生ずるばらつきを極力小さくするため、供試体作成はE-ディフェンスの屋外試験体作成ヤードにおいて、一斉に鉄筋組み立て、コンクリート打設、養生等を行った。

供試体作成後、図-2のように震動台上に設置した。供試体のフーチング部と震動台は、1つの供試体につき16本のボルトにより締め付けられている。加振時の転倒防止用として、重錘部下端の四隅とフーチング部間にワイヤーを設置し、約150mm程度まではワイヤーが動作しないように設計した。

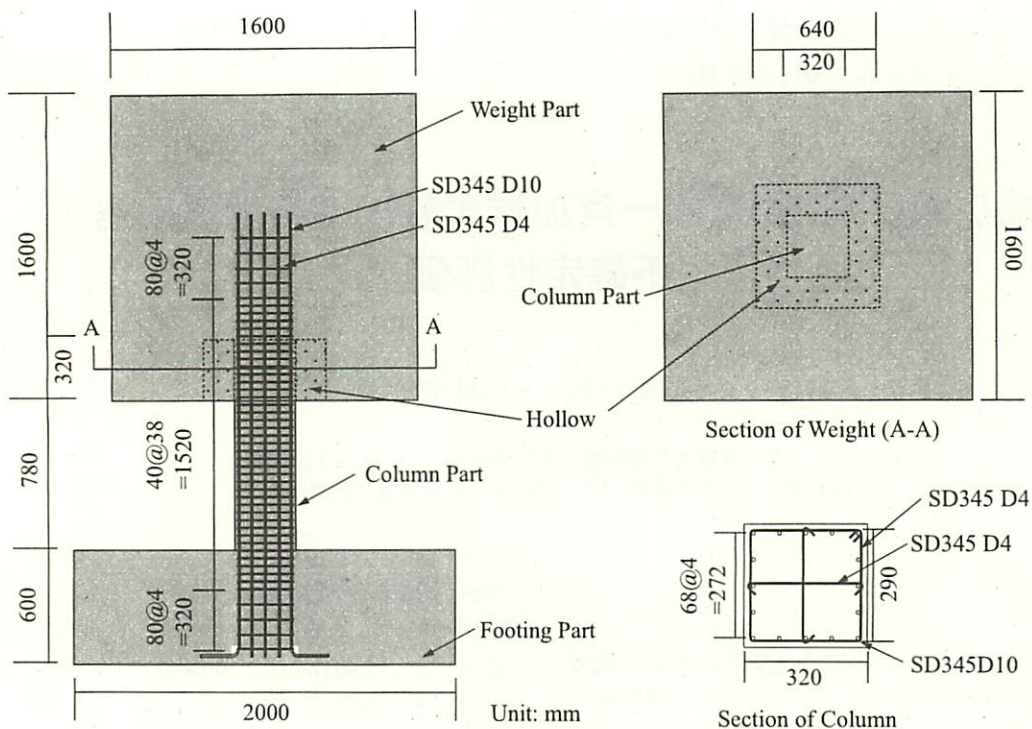


図-1 実験供試体概要

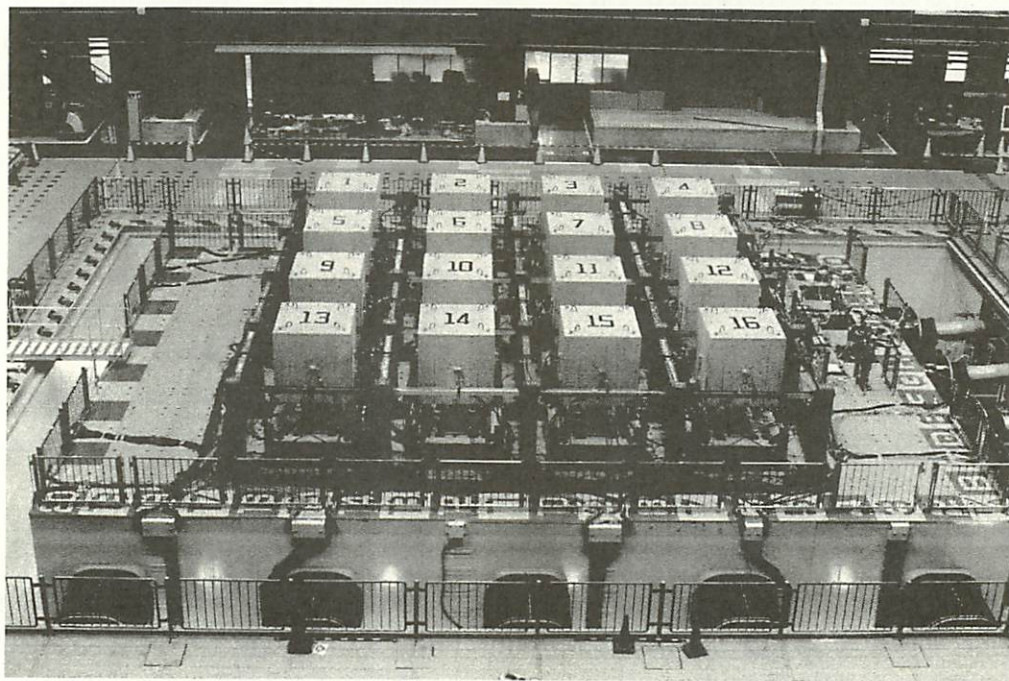


図-2 E-ディフェンス上に設置した16体RC供試体（重錘頂部に供試体番号）

2.2 計測項目

実験では、各供試体の加速度、変位、鉄筋ひずみを計測し、その柱基部の破壊性状について、ビデオカメラをフーチング上に設置し撮影している。各実験ケース後において、柱四面のひび割れ性状も記録している。E-ディフェンスにおける収録装置の最大計測チャンネル数は850であり、震動台の挙動も記録することから、各供試体について51成分、計816成分の

計測を行っている。

各供試体に入力される地震動を計測するため、トキメック製サーボ型加速度計をフーチング上に3成分、供試体重錘部重心位置の応答を計測するために重錘部側面に8成分設置した。

各供試体の変位応答を計測するため、東京測器製ワイヤー式変位計を重錘部側面に設置し、柱基部の抜け出し量を計測するために接触式変位計を4カ所設置した。

表-1 実験ケース

ステップ	線形応答加振							非線形応答加振		
加速度振幅	3 回 random	12.5%	18.75%	10%	15%	18%	18%	100%	100%	150%

2.3 入力地震動と実験ケース

入力地震動として、1995 年兵庫県南部地震で JR 西日本鷹取駅構内において観測された地震動 3 成分 (JR 鷹取駅記録) を用いた。地震動の NS 成分の記録を震動台 Y 方向に、EW 成分の記録を X 方向に、UD 成分の記録を Z 方向にそれぞれ入力した。本実験の供試体は、原型構造物の 1/7.5 に縮小した模型であるため、相似則に従い入力地震動の時間軸を $1/\sqrt{7.5}$ に調整している。

加振は表-1 に示す順番で行った。地震動の加速度の大きさを $n\%$ にした地震動による加振を $n\%$ 加振と記述する。実験ケースを大別し、ランダム波から 18% 加振までを線形応答加振ステップ、2 回の 100% 加振と 150% 加振を非線形応答加振ステップと呼ぶ。

線形応答加振ステップでは、供試体の固有値を計測するためのランダム加振に引き続き、非線形応答加振に向けた震動台制御のための目標波作成を主目的とした実験を、15% 加振まで連続的に行っている。非線形応答加振ステップでは、100% 加振に引き続き、応答のばらつきが大きくなることを期待して 2 回目の 100% 加振では 90 度回転 (NS 成分の記録を X 方向、EW 成分の記録を Y 方向) し、再び方向を元に戻して 150% 加振を実施している。

3. 供試体における不確定性

3.1 概要

本研究は、供試体の動的応答に関する不確定性を評価することを目的としている。動的応答は、地震動 (入力) が作用する供試体 (システム) の出力であるため、入力とシステムの不確定性の影響を受ける。本節では、システムの不確定性を評価するため、供試体の幾何学的形状、材料特性および振動特性に着目する。

3.2 幾何学的形状における不確定性

供試体は現地製作であるため、同じ設計による試験体でも工場製作に比べて、その幾何学的形状にもばらつきが発生しやすい。製作に伴う不確定性を軽減するため、同一業者による同時製作を実施しているが、幾何学的形状における不確定性を把握するため、供試体完成後、重錘の各辺の長さおよび柱基部断面の長さを計測した。RC 柱構造の特性はその断面軸応力が、またその動的応答には振動質量に大きく依存する。幾何学的形状を計測した結果、断面軸応力は平均 0.938MPa、標準偏差 0.00457MPa、重錘質量は平均 9.84ton、標準

偏差 0.00769ton であり、そのばらつきはほぼ無視しえると考えられる。

3.3 コンクリート圧縮試験

柱部コンクリート打設時に、JIS A 1132 に従い、100 $\phi \times 200\text{mm}$ のコンクリート圧縮試験体を 40 個製作し、アムスラー型試験機により圧縮試験を行った。本研究では圧縮強度のばらつきに着目するが、無拘束コンクリートの応力-ひずみ関係のばらつきも評価できるよう、コンプレッソメータを用い、標点距離は 100mm として、ひずみを計測した。また、応力は試験機で得られた荷重を断面積で除して求めている。結果、圧縮強度は平均値 40.36 N/mm²、標準偏差 1.30 N/mm²、変動係数 3.2 % を得た。圧縮試験は、実験全体工程の都合上、材齢 63 日の試験である。

コンクリート圧縮強度特性のばらつきについては、従来より様々なデータを用いて整理されており、例えば日本建築試験所が実施した本実験と同じ呼び強度 24 N/mm² の 28 日強度 (標本数 2949 個) の結果¹⁾では、平均値 35.89 N/mm²、標準偏差 3.84 N/mm²、変動係数 10.7 % である。本実験で用いたコンクリート強度の変動係数は約 3 分の 1 であり、一般的なコンクリート強度よりもばらつきは小さいことが分かる。

3.4 鉄筋引張試験

柱の主鉄筋に用いた D10 の鉄筋について、40 本の引張試験を行った。鉄筋は加工せず、JIS Z 2201 における 2 号試験片として結果を整理した。引張試験機は島津製作所製オートグラフ AG-X(50 kN) を用いた。結果、降伏強度の平均値 367.30 N/mm²、標準偏差 6.07 N/mm²、変動係数 1.6 % を得た。また降伏点と最大引張荷重点を結ぶ傾きを二次剛性と定義し、初期剛性との比を二次剛性比とすると、平均値 0.767 %、標準偏差 0.0033 %、変動係数 4.33 % の結果を得た。

鉄筋降伏強度特性のばらつきについて、日本建築総合試験所による調査²⁾では、本実験と同じ D10、SD345 の鉄筋に関する標本数 81 個の結果は、平均値 372.65 N/mm²、標準偏差 13.73 N/mm²、変動係数 3.68 % である。これより、本実験で用いた鉄筋降伏強度は、一般的なばらつきに比べて約半分程度とみることができる。

表-2 供試体 16 体の初期の固有周期

供試体 番号	X 方向 (sec)	Y 方向 (sec)	供試体 番号	X 方向 (sec)	Y 方向 (sec)
01	0.1854	0.1865	09	0.1870	0.1906
02	0.1938	0.1902	10	0.1879	0.1906
03	0.1834	0.1823	11	0.1840	0.1906
04	0.1822	0.1845	12	0.1856	0.1906
05	0.1876	0.1873	13	0.2045	0.2069
06	0.2029	0.1930	14	0.1925	0.1859
07	0.2025	0.2090	15	0.1876	0.1859
08	0.1989	0.1882	16	0.2059	0.2119

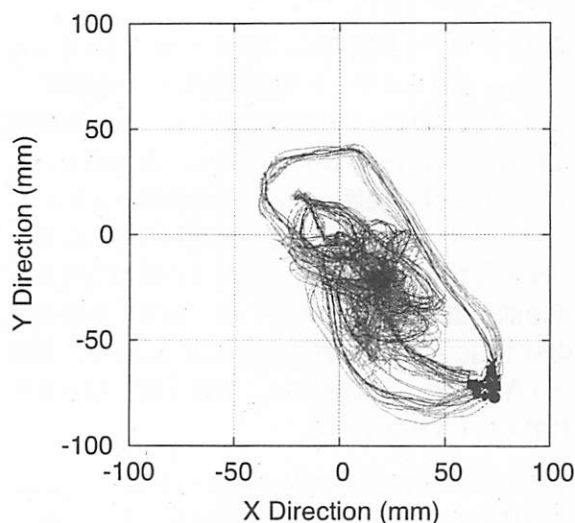


図-3 100%入力時の 16 体の変位応答軌跡

3.5 震動台設置時の供試体の振動特性

供試体を震動台に設置することによって、フーチング底面仕上げの状態やボルト締め付けなどに起因するばらつきが発生する。震動台設置後の各供試体について、線形応答加振ステップの 3 回のランダム波によって得られた固有周期を調べることににより、実験前の各供試体のばらつきを評価する。まず供試体 01 の固有周期は X 方向が、0.1854 秒、Y 方向が 0.1865 秒であった。供試体 01 を含む 16 体の供試体の初期の固有周期を、表-2 に示す。これより、X 方向、Y 方向ともに 0.18 秒から 0.20 秒付近に集中しており、16 体の振動特性に大きな差異はないものと考えられる。

4. 地震応答特性における不確定性評価

4.1 概要

本実験は三次元加震であるため、その応答も三次元空間中に軌跡を描く。用いた地震動の特性により、X-Y 平面上の応答について、ある方向に大きくなる特徴がある。図-3 に 100%加振時の 16 体の変位応答軌跡を重ねて示すが、水平方向の応答特性を議論する際には、特に断らない限り、X-Y 平面における最大応答変位方向(図中の印)に変換した値を用いることを基本とする。

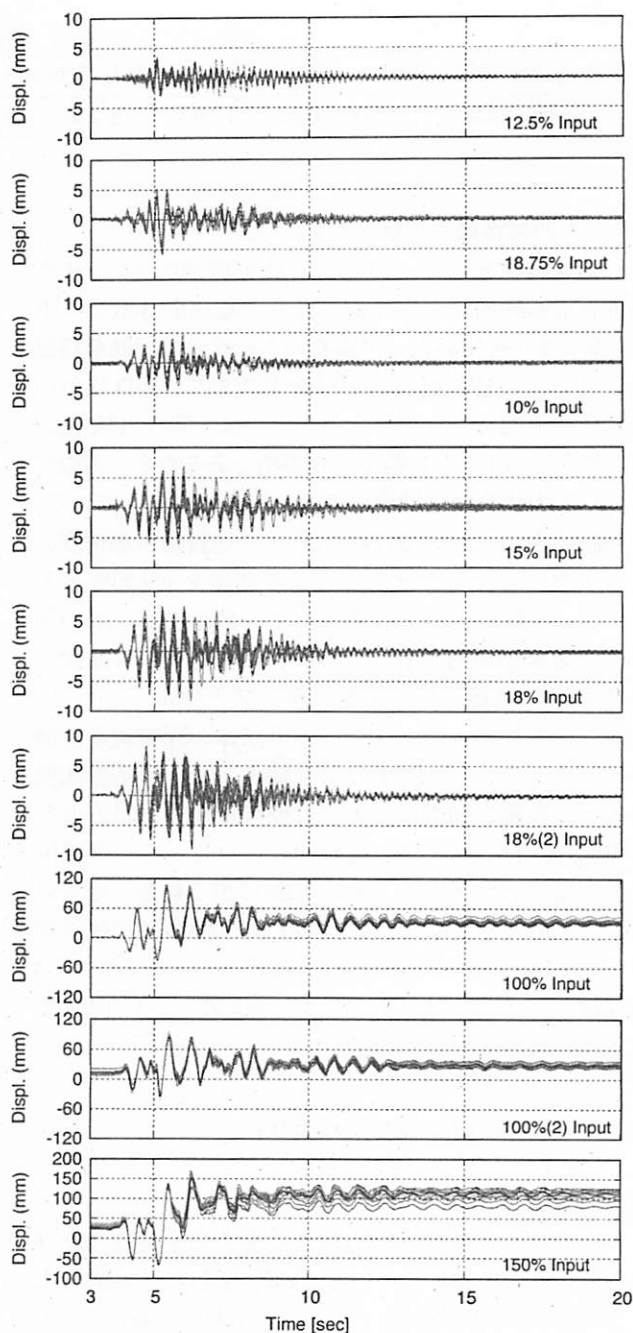


図-4 最大応答変位方向の変位応答時刻歴

表-1 に示した一連の震動台実験結果として、図-4 に変位応答時刻歴を示す。

本論文では、非線形応答加振ステップの最初の加振である 100%加振 1 回目の実験結果を基に、入力地震動や、供試体の応答加速度、応答変位などの地震応答・破壊特性に関して、16 体の供試体の挙動における不確定性について考察する。不確定性の評価については、16 体の平均値 (AVE) および標準偏差 (SD)、相対的なばらつきの評価として変動係数 (COV) を用いるが、それに加えて確率分布形状についても考察する。

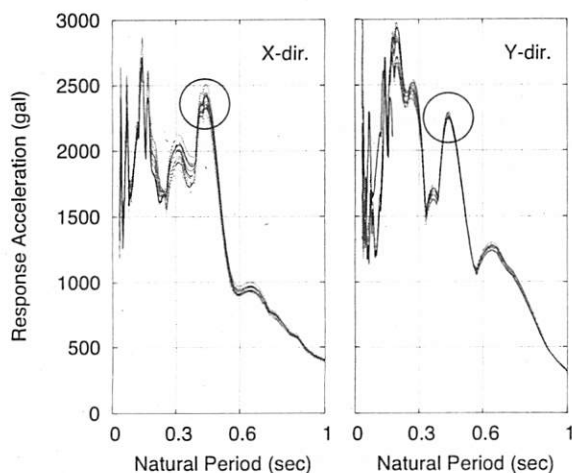


図-5 100%加振における入力地震動の応答スペクトル

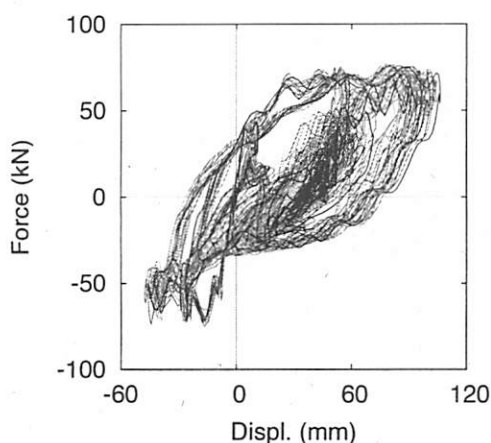


図-6 100%加振時の荷重-変位関係

4.2 入力地震動の不確定性

入力の不確定性を評価するため、各供試体の入力地震動について整理する。図-5は供試体16体のフーチング部で得られた入力加速度と入力加速度の応答スペクトル(減衰定数5%)のグラフである。X方向、Y方向について、ばらつきが大きい周期帯も見受けられるが、降伏剛性で線形的に振動している18%(2)加振と非線形応答する100%加振時における各供試体変位応答の卓越固有周期は、X方向、Y方向ともにそれぞれ0.3秒と0.6秒付近である。0.3秒から0.6秒の間にある応答スペクトルのピーク(図中の丸印)で入力地震動のばらつきを評価すると、その変動係数はX方向で2.54%、Y方向は0.89%であった。

4.3 荷重-変位関係

図-6に、100%加振における供試体16体の荷重-変位関係を重ねたものを示す。荷重を算定するにあたって、重錘に設置した加速度計の値を用い、水平方向に加え、重錘側面の鉛直加速度記録を用いて重錘の回転慣性を考慮している。応答変位については次節で詳し

く考察するが、本加振において供試体は大きく塑性化し、非線形挙動を示していることが分かる。また変位に比べ、荷重のばらつきは小さい。

4.4 応答変位

(1) 時刻歴

図-7は、100%加振における供試体16体の応答変位を重ねたものである。最大応答値を示すまでは、16体の波形はほぼ同じように見える。最大応答変位の平均値は99.92 mm、標準偏差は3.80 mm、変動係数は3.80%であった。また、最大応答変位を示す時刻は、 5.39 ± 0.03 秒と 6.14 ± 0.005 秒の2つに分かれている(5.39秒に10個、6.14秒に6個)。入力の変動係数が2%、100%入力前の固有周期の変動係数が3.77%(X)、4.80%(Y)であることを考えると、そのばらつきはほぼ入力・システムのばらつきと同程度であった。この最大応答変位の領域では既に構造物が大きく非線形化しており、一般に動的非線形問題では、入力のわずかなばらつきが結果に大きく影響を及ぼす、いわゆるカオス的な挙動が発生することも予想されたが、履歴減衰の効果もあり、逆に安定した結果を得た。

一方、応答波形は、最大応答変位以降から、ばらつきが生じ始めており、残留変位の平均値は31.67 mm、標準偏差は4.34 mm、変動係数は13.7%であり、入力・システムのばらつきと比べても大きい値を示している。最大応答変位と比べて約4倍程度変動係数が大きくなっており、このばらつきは非線形応答、特に損傷発生後の履歴応答の不確定性に起因するものと見なすことができる。

また、16体の応答のうち、供試体13は他と大きく外れて挙動している。供試体13は、Y方向の応答がちょうど非線形挙動に入った約4.2秒付近から他と外れた応答を示している。この応答は、特に残留変位に関する平均値、変動係数に大きく影響を与えているといえるが、この応答が異常値として取り扱うことができるかどうかを検討するため、Grubbs-Smirnovの方法³⁾による棄却検定を行った。この棄却検定法は、データが正規分布に従うという仮定があるが、一つの指標として本手法を用いることにする。外れ値を X 、平均値を μ 、標準偏差を σ として、統計量 G を求め、この G 値をGrubbs-Smirnovの統計数値表における限界値と比較する。今回の検定における有意値を5%とする。標本数は16であるから、限界値は2.443となり、 G 値がこの限界値を超えれば異常値と判定される。供試体13の残留変位の G 値は2.42とほぼ限界値であるものの、有意水準5%における検定結果としては、本データは異常値ではないと判定できる。

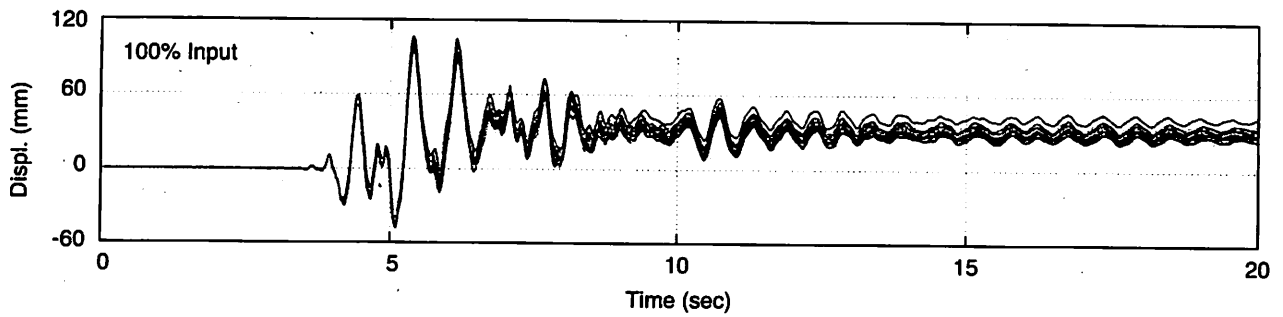


図-7 100%加振時の変位応答時刻歴

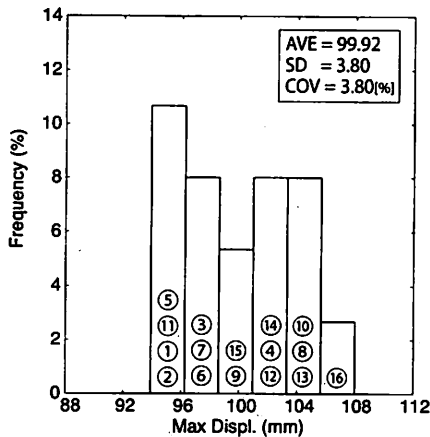


図-8 100%加振時の最大応答変位

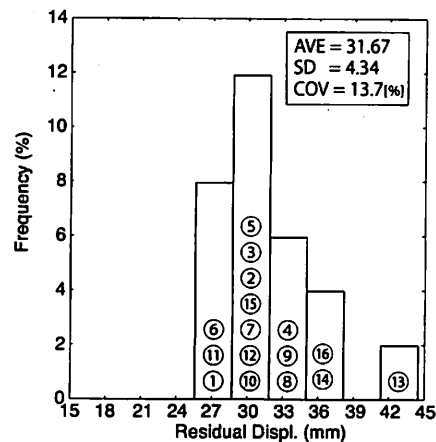


図-9 100%加振時の残留変位

(2) ヒストグラム

最大応答変位および残留変位のヒストグラムを、それぞれ図-8、図-9に示す。ヒストグラム中の番号は、供試体番号を示す。

まず、最大応答変位のヒストグラムは、真ん中が凹の形状をしている。先に述べたように、最大応答変位発生時刻は大きく2つに分かれるものの、6.14秒に最大応答値を示した供試体は02, 06, 09, 10, 13, 14であり、ヒストグラムの2つのピークは発生時刻に対応したものとは言えない。

最大応答変位と残留変位の対応関係をみると、ヒストグラム形状は変化しているものの、最大応答変位が大きい供試体が残留変位も大きくなる傾向も確認できる。

4.5 変位応答の確率分布

(1) 確率分布とその検証方法

多くの統計処理方法は、母集団や標本が正規分布することを前提としている。そのため、実験値などのデータが正規分布に従うかどうかを検討することは重要である。一般に分布形状を推定するには数多くのデータが必要であり、本実験のような標本数が16個では十分ではないが、得られた実験結果をもとに、耐震性能指標として重要な、応答変位の最大値、残留変位について、その確率分布形状について考察する。

本節では、正規分布に加え、対数正規分布、グンベ

ル分布を検証対象とする。対数正規分布は材料強度や疲労寿命など、複雑な事象が関係し合う事象の確率分布によく用いられる。グンベル分布は極値分布の1つであり、最大値に関するI型漸近分布として、発生地震動強度などの自然現象の最大値(極値)に対して用いられる。

分布形状に対する検討では、ヒストグラムと平均値・分散値に基づく確率分布形状の比較に加え、確率紙を用いて、その適合性を判定する。確率紙による評価では、得られたデータを小さい順に並び替え、累積相対度数を求める。次にデータを横軸、累積相対度数を縦軸にとり、検討する確率分布に対応する確率紙上にデータを示し、プロットした点が直線に近い傾向を示せば、データはその分布に従うことを意味する。

(2) 最大応答変位

図-10に最大応答変位に関するヒストグラム、正規分布・対数正規分布・グンベル分布に対応する確率分布と確率紙プロットを示す。

分布形状を見る限り、本データに関しては正規分布と対数正規分布はほぼ同じである。ヒストグラムでは左側が大きな山を示しているため、分布形状ではグンベル分布の方が適合性は高いように見えるが、グンベル確率紙プロットでは、特に104 mmより大きい範囲で直線を外れる結果となった。正規確率紙プロットでは96 mm以下および104 mm以上で実験値が少し曲

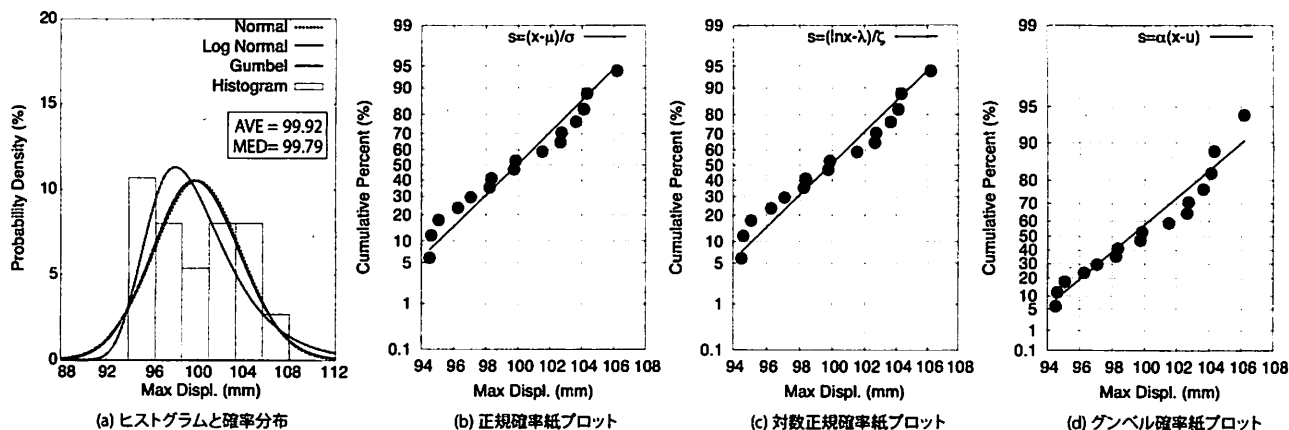


図-10 最大応答変位の分布形状

率が変化しているように見えるものの、グンベル分布よりは直線性があるように判断できる。

分布形状の適合性を統計的に検討するため、最大応答変位の分布形状を正規分布、グンベル分布と仮定することに対し、Kolmogorov-Smirnov 検定 (KS 検定) を行った。KS 検定とは、有限個の標本に基づいて母集団の確率分布が帰無仮説で提示された分布と異なっているかどうかを調べるために用いられる。ここで、帰無仮説として、最大応答変位の分布形状が正規分布あるいはグンベル分布である、と考える。その結果、有意水準 5% における棄却限定値が 0.34 であるのに対し、正規分布、グンベル分布の D_n 値がそれぞれ 0.099, 0.096 となり、共にその仮説が棄却されない。また、ほぼ同じ値を示していることから、最大応答変位の分布形状として、正規分布、グンベル分布の間に優位性は特にはないといえる。

(3) $t = 5.39$ 秒における応答変位

先に示したように、最大応答変位は大きく 2 つの時刻において発生する。本節では、16 体のうち 10 体が最大応答値を示した $t = 5.39$ 秒における応答変位について、その分布形状を検討する。図-11 に最大応答変位に関するヒストグラム、正規分布・対数正規分布・グンベル分布に対応する確率分布と確率紙プロットを示す。

最大応答変位のヒストグラムが凹型となったのに対し、 $t = 5.39$ 秒の応答変位はひとつのピークを示す形状となった。また、確率分布とヒストグラムの比較、確率紙プロットからも、その分布形状はグンベル分布と判断することができる。KS 検定では正規分布、グンベル分布と仮定した場合の D_n 値がそれぞれ 0.115, 0.074 と、有意水準 5% において正規分布とする仮説も棄却されるものではないものの、グンベル分布の D_n 値が正規分布のほぼ半分であり、グンベル分布の方が適合度が高いと判断できる。

(4) 残留変位

図-12 に残留変位に関する図を示す。確率分布モデ

ルとしては、対数正規分布と Gumbel 分布のどちらかの可能性が考えられる。ヒストグラムの形状は Gumbel 分布に近いが、頂点が一致するのは対数正規分布である。残留変位は、最大応答加速度もしくは最大応答変位などに比べて、ばらつきが大きい。

5. まとめ

本研究では、E-ディフェンスを用いて 16 体の RC 柱供試体の一斉加振実験を行い、応答が非線形領域に入った 100% 地震動加振 1 回目の実験結果を基に、16 体の供試体の応答加速度、応答変位などに関し、動的応答の不確定性について定量的に評価した。

応答変位の最大応答変位の変動係数は 3.80% であり、そのばらつきはほぼ入力・システムのばらつきと同程度であった。最大応答変位の領域では既に構造物が大きく非線形化しているものの、履歴減衰の効果もあり、安定した結果を得たと考える。一方、残留変位の変動係数は 13.7% であり、最大応答変位と比べて約 4 倍程度変動係数が高い。これは損傷発生後の履歴応答の不確定性に起因すると考える。

また、応答変位に関する確率分布形状を評価し、最大応答変位は一様分布もしくは極値分布、残留変位は対数正規分布もしくは極値分布を示すことを明らかにした。

謝辞：本研究は科学研究費補助金若手研究 (S)19676004 番および京都大学-防災科学技術研究所共同研究のもと実施したものである。本実験を実施するにあたり、防災科研兵庫耐震工学研究センター中山学研究员、中西伸二元京都大学技術専門官をはじめ、京都大学の学生諸君の協力が不可欠であった。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋利一. 受託試験におけるコンクリートの圧縮強度に関する調査. Technical Report 39, 日本建築総合試験所,

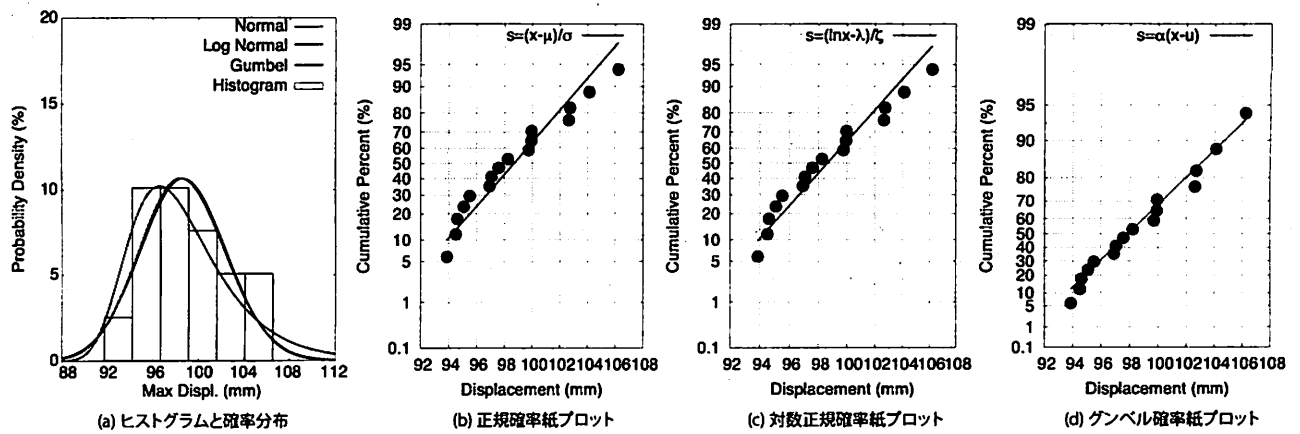


図-11 $t = 5.39$ 秒における応答変位の分布形状

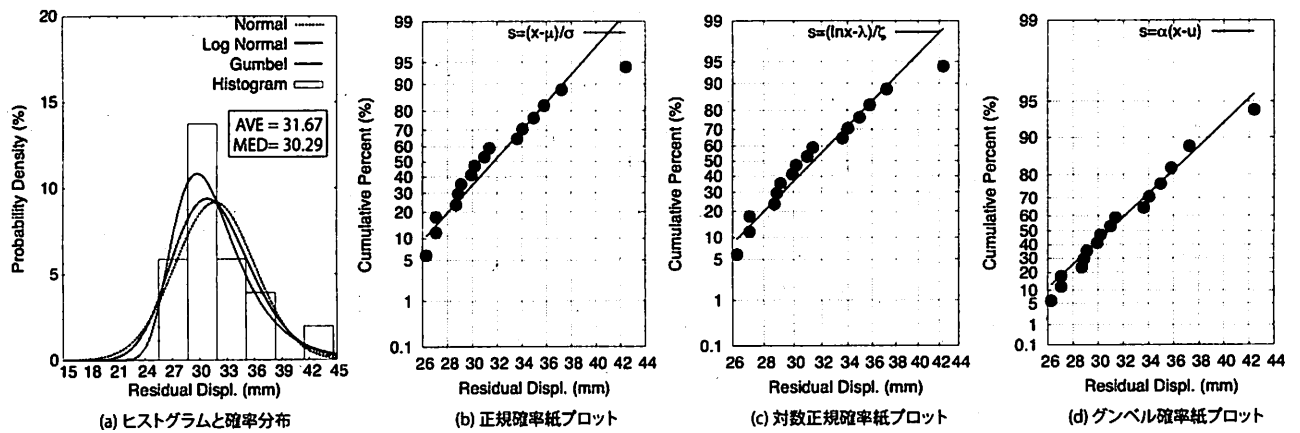


図-12 残留変位の分布形状

1985.

- 2) 池田茂. 受託試験における鉄筋コンクリート用異形棒鋼の引張及び曲げ試験に関する調査. Technical Report 44, 日本建築総合試験所, 1986.
- 3) 丹羽誠. これならわかる化学のための統計手法 -正しいデータの扱い方-. 化学同人, 2008.