

# 論文 少ない加速度記録から算出した RC 造建物の性能曲線の精度に関する研究

陳 辰\*1・楠 浩一\*2

**要旨**：加速度計測値から算出した性能曲線を用いて構造物の耐震性能を地震直後に評価する際に、少ない加速度記録から建物の安全性を判断することが期待されている。本論文では、少数の加速度記録を用いて 3 折れ線に近似した性能曲線を算出し、その精度を検討した。検討には、RC 造建物を対象に時刻歴応答解析を用いた。安全限界状態に至っていない記録を用いて、性能曲線上の安全限界点への外挿を行った結果、少ない加速度記録の性能曲線の安全限界点を精度よく推定することが可能であった。また、加速度記録のない階の加速度を直線補間により求めた場合の誤差を標準偏差で評価する方法を提案した。

**キーワード**：性能曲線, 加速度センサー, 安全限界点, 直線補間, 時刻歴応答解析, 標準偏差

## 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では、東北地方を中心に非常に広い地域で多くの建物が被災し、大量の避難者が発生した。特に被災した建物の中には、本震そのものによる被害に加え、余震により甚大な 2 次被害を生じさせる場合がある。こうした背景の中、地震発生後には建物の安全性を把握し、その継続使用の可否判断を速やかに行うことが重要であることが再認識されている。しかし、従来の建築の専門家あるいは技術者による現地調査では、目視で 1 棟ずつ応急危険度判定を実施するため、巨大地震や大都市圏での地震被害に対応することには限界があり、膨大な時間がかかる。また、実際に大地震後建物の健全性を目視だけで判断すると判定の結果が大きくばらつくことも問題であった。このような状況を考えると、地震直後に技術者を派遣することなく、建物に各種のセンサーを設置し、建物の残余耐震性能を定量かつ迅速に評価する必要性は高い。

近年、構造ヘルスマモニタリングが注目され、建物の耐震性能の評価への活用が進んでいる。文献 1) では加速度センサーを用いた建物の即時耐震性能評価法を提案している。この方法は、地震時に建物に生じる加速度と変位をもとに、等価線形化法を用いて損傷度を評価する。地震時の層間変位は建物に設置した加速度センサーから算出することが可能である。図-1 に示すような建物の弾塑性挙動を 1 自由度に縮約した性能曲線を計測し、建物の基礎部で観測した地震動から求めた要求曲線と比較することにより、地震後の建物の最大応答変位（性能曲線と要求曲線の交点(C)）の推定が可能となる。また、本震と同じレベルの地震に対する応答点(D)を求めることで、余震に対する建物の損傷度を評価することができる。文献 2)、文献 3) では、建物の加速度計測値から性能曲線の

算出方法を提案している。性能曲線の推定により、地震前後建物の剛性や周期の変化だけではなく、荷重と変位の関係の直接評価が可能である。

建物の損傷評価では、モード形や最大層間変形角などの物理量を推定するには、すべての階に加速度センサーを設置することが理想的であり、既存の即時残余耐震性能判定システムでは、低層建物では各階にセンサーを設置している。しかし、階数が多い場合には導入コストが高くなり、設置するセンサーの数を削減することができれば普及に有益であると考えられる。そこで本論文では、少ない加速度データを用いた場合にその判定精度への影響を検討し、最適な配置数の判定方法の構築を試みる。

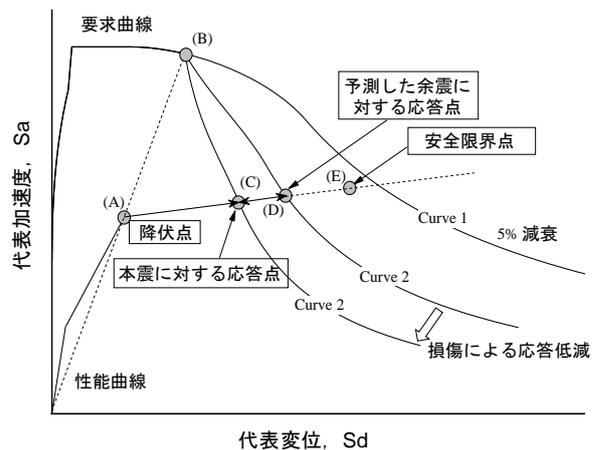


図-1 即時耐震性能評価法の概要 1)

## 2. 性能曲線における安全限界点の推定

建物の安全限界変位は損傷評価を行う上で重要な指標の一つであるが、これを決定するためには図-1 に示すように本震の最大応答点(C)から安全限界点(E)を推定す

\*1 東京大学 工学系研究科 博士課程 (正会員)

\*2 東京大学 地震研究所 教授 博士(工学) (正会員)

る必要がある。そのためには、図中の(C)点におけるモード形を用いて、いずれの層があらかじめ設定した安全限界変位に達する時の崩壊モード、すなわち(E)点を外挿する必要がある。建物の振動モードは弾性範囲では一定であるが、その後ひび割れや降伏によりモード形は変化する。そのため、(C)点での振動モードを係数倍するだけでは正確な安全限界点を推定できるとは言えない。文献4)では、観測値から得られた性能曲線を鉄筋コンクリート造建物を想定して3折れ線に近似し、第二折れ点と第三折れ点での各層の層間変位の差分を係数倍することにより、いずれかの層が想定する安全限界変位に達する時を安全限界点とする推定法を提案している。その有効性を解析および振動台実験により確認している。

建物の安全限界状態は図-2に示すように、例えば1Fが最初に安全限界変位に達する時、他の層はまだ余裕があるが層崩壊になるため、これ以上の地震に耐えられない危険が伴い、建物の安全限界状態と定義する。性能曲線上の安全限界点は安全限界状態における層せん断力—層間変形関係から算出することができる。

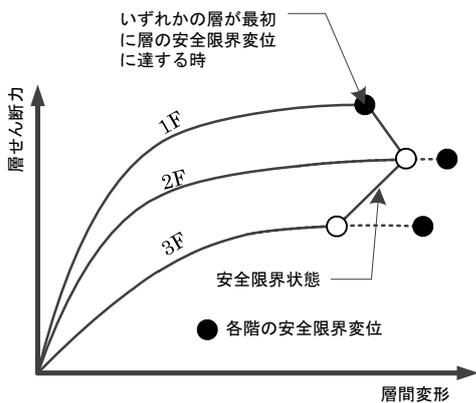


図-2 各階の層せん断力—層間変形関係<sup>4)</sup>

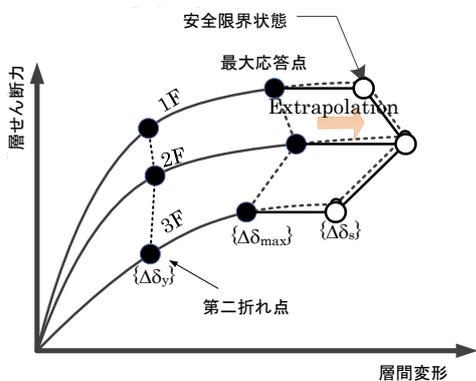


図-3 最大応答点から安全限界点の推定<sup>4)</sup>

実地震動下では建物が安全限界状態に至っていない場合が多い。そこで観測された最大応答点から図-3に

示す方法で安全限界点を推定する<sup>4)</sup>。各階の変位増分のモードは塑性化に伴って変化すると考え、第二折れ点の層間変形量分布 $\{\Delta\delta_y\}$ 及び第三折れ点、つまり最大応答点の層間変形量分布 $\{\Delta\delta_{max}\}$ を求め、安全限界時の層間変形量分布 $\{\Delta\delta_s\}$ を下式により算出する。また、安全限界点の荷重は最大応答点での荷重を維持するものと仮定する。

$$\{\Delta\delta_s\} = \{\Delta\delta_y\} + \gamma \times \{\Delta\delta_{max} - \Delta\delta_y\} \quad (1)$$

以上述べた安全限界点の外挿では3折れ線モデル化する必要がある。一方、鉄筋コンクリート造建物の荷重—変形関係をモデル化にあたっては、主としてひび割れによる剛性低下や降伏を考慮して3折れ線に近似する場合が多い。文献4)、文献5)に示された手法で3折れ線モデル化が行われている。また、既往の鉄筋コンクリート造試験体の実験結果にこの手法を適用して有用性を確認している。

しかし、実際の建物ではセンサーが設置されていない階がある。そこで本研究では、加速度センサーを設置していない階の加速度は上下の階の記録を直線補間して求める。図-4に示すように、少ない加速度センサーを取り付けた場合の振動モード形は記録した点を直線で結ぶことにより求める。加速度センサーを全部の階に設置した場合の応答を真の応答と定義し、直線補間により算出した応答は真の応答に対して誤差が生じると考えられる。また、加速度計を全層に配置していない場合は、層間変形は複数の応答の平均値をとることとなり、安全限界点を外挿する際には層間変形角を過小評価する可能性がある。例えば図-4では、加速度センサーを基礎と最上階のみに設置すると、各階はいずれかのステップにおいても同一の層間変形角となる。センサー個数を増やすことで、真の応答に近いモード形を取ることができ推定精度が向上することとなる。本研究は加速度センサー数を最小限に抑えることを目的とし、少数センサーの性能曲線の比較および安全限界点の推定精度を検討する。

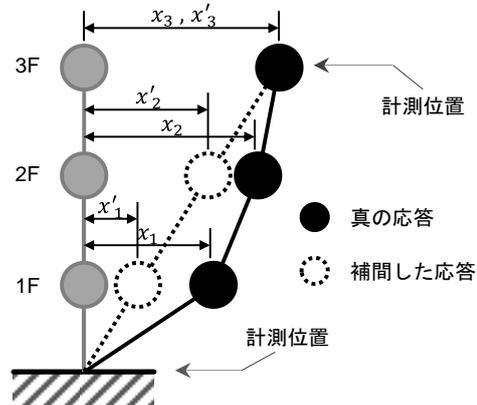


図-4 直線補間による応答の推定

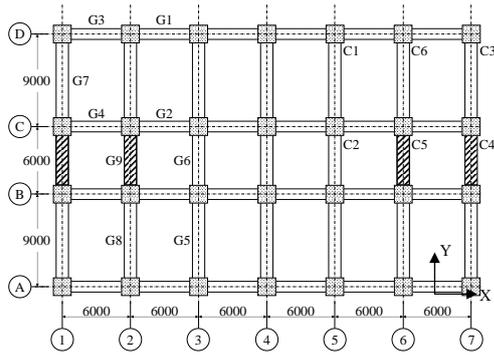


図-5 床伏図

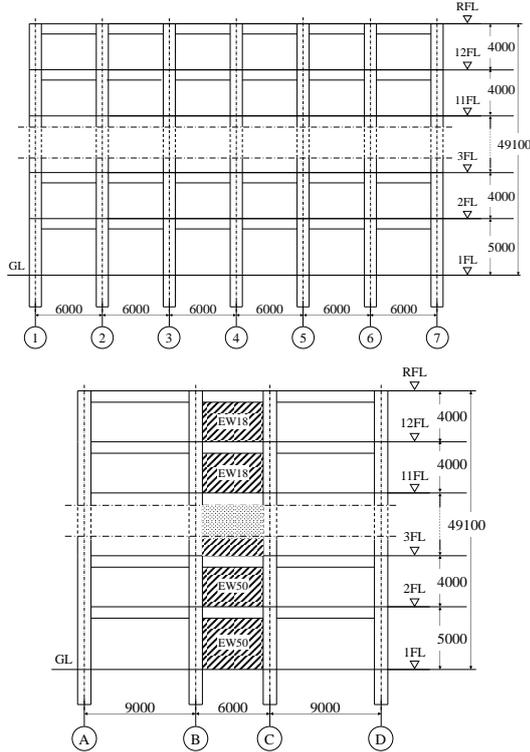


図-6 軸組図

### 3. 時刻歴応答解析

これまでに観測された地震においては、建物は崩壊するほどの大きな損傷を受けておらず、建物は安全限界状態まで至っていない。そのため、本検討では鉄筋コンクリート造の建物を対象に、観測データではなく、大きな損傷を与える目標とした時刻歴応答解析を行った。加速度センサーの数をパラメータとして、それぞれの性能曲線を比較し、さらに2節で示した方法により安全限界点の推定を行った。

#### 3.1 解析対象

対象建物の床伏図を図-5に、軸組図を図-6に示す。構造形式は鉄筋コンクリート造とし、X方向は純ラーメン構造、Y方向は耐震壁付ラーメン構造とする。平面形状は、X方向は6.0m×6mスパン、Y方向は9.0m、6.0m、9.0mの3スパンで、36.0m×24.0mの長方形平面である。建物は12階建てで、階高は1階5.0m、2階以上4.0mで、

軒高49.1mである。耐震壁は連層耐震壁として対称に配置し、偏心を生じさせない計画とする。基礎は杭基礎とし、強固な地盤に支持させるものとする。柱部材について、曲げは弾性で、せん断はTri-Linear型モデルとし、履歴は原点指向型とした。梁について、曲げはTri-Linear型モデルとし、履歴は剛性低減型で、せん断はTri-Linear型モデルとし、原点指向型とした。各層は剛床を仮定した。

代表的な柱リストを表-1に、梁リストを表-2に、耐震壁リストを表-3に示す。使用材料を表-4および表-5に示す。建物は全体崩壊形を形成する様に設計した。

表-1 柱リスト

符号		C1	C2	C3	C4
7   8 階	断面	950×950	950×950	950×950	950×950
	主筋	28-D35	28-D35	28-D32	28-D29
	帯筋	S13@100	S13@100	S13@100	S13@100
5   6 階	断面	950×950	950×950	950×950	950×950
	主筋	28-D35	28-D35	28-D32	28-D32
	帯筋	S13@100	S13@100	S13@100	S13@100
3   4 階	断面	950×950	950×950	950×950	950×950
	主筋	28-D35	28-D35	28-D35	28-D35
	帯筋	S13@100	S13@100	S13@100	S13@100
1 階	断面	950×950	950×950	950×950	950×950
	主筋	28-D35	28-D35	28-D38	28-D38
	帯筋	S13@75	S13@75	S13@75	S13@75

表-2 大梁リスト

符号		G1	G2	G5	G6
8   9 階	断面	600×900	700×900	600×900	600×900
	主筋	5+5-D32	7+7-D32	8+8-D35	4+4-D35
	肋筋	D13@200	S13@200	S13@200	D13@200
	腹筋	4-D13	4-D13	4-D13	4-D13
6   7 階	断面	600×900	700×900	600×900	600×900
	主筋	6+6-D32	8+8-D32	8+8-D35	5+5-D35
	肋筋	S13@200	S13@200	S13@200	D13@200
4   5 階	断面	750×900	800×900	600×900	600×900
	主筋	7+7-D35	8+8-D35	8+8-D35	5+5-D35
	肋筋	S13@200	S13@200	S13@200	D13@200
2   3 階	断面	750×900	800×900	600×900	600×900
	主筋	7+7-D35	8+8-D35	8+8-D35	5+5-D35
	肋筋	S13@200	S13@200	S13@200	D13@200
	腹筋	4-D13	4-D13	4-D13	4-D13

表-3 耐震壁リスト

符号	壁厚	配筋
EW18	180	D10, D13@200 ダブル
EW20	200	D13@200 ダブル
EW25	250	D13, D16@200 ダブル
EW30	300	D16@200 ダブル
EW40	400	D19@200 ダブル
EW50	500	D25@200 ダブル

表-4 コンクリート使用材料

設計基準強度 Fc (N/mm <sup>2</sup> )	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>4</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> )	使用範囲
36	23	2.59	R 階床梁～5 階柱
39	23.5	2.78	5 階床梁～3 階柱
42	23.5	2.85	3 階床梁～1 階床梁

表-5 鉄筋使用材料

鉄筋の呼び名	材料強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>4</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> )	使用範囲
D10-D16	295	2.05	柱梁せん断補強筋, 壁筋
D19-D25	345		柱梁主筋
D29-D38	390		柱梁主筋
D13 (S13)	785		柱梁せん断補強筋

### 3.2 入力地震波および応答結果

解析に用いる地震動は、建築基準法等に定められている告示スペクトルに適合する告示波である。時間刻みは 0.02s である。図-7 に入力地震動の時刻歴を示す。加振の倍率は弾性範囲の 40% と、塑性化程度が異なる 3 つの 80%, 120%, 160% を用いる。それらの加速度応答スペクトル (減衰 3% 時) を図-8 に示す。内部粘性減衰は 3% で、瞬間剛性比例型として設定する。加振方向は耐震壁が付いていない X 方向を対象とする。

全層の最大応答値を図-9 に示す。40% の入力において、各層は弾性範囲で、最大層間変形角は 6F の 1/196 であった。80% の入力では、建物の中下層が塑性化し、6F の最大層間変形角が 1/91 に達した。次に 120% の入力では、各層の層間変形が大きくなったが、最大層間変形角は 4F の 1/59 となった。また 160% の入力では、3F が最大層間変形角 1/50 であった。また 2F から 8F まで層間変形角がほぼ 1/50 の程度になった。この際には建物のベースシア係数は 0.35 であった。

ここで、建物の安全限界変形角はいずれかの層においても 1/50 と仮定した。したがって、160% の入力では建物は安全限界状態に至った。また、塑性ヒンジ図から本建物は梁降伏先行型の全体崩壊形とした目標に近づいていることを確認した。

### 3.3 性能曲線の算出

建物の性能曲線は代表加速度-代表変位関係の骨格曲線とする。本研究では、加速度計測値から性能曲線を算出する際に、変位は加速度の 2 階積分により求める。文献 6) では、Wavelet 変換を用いて安定して建物の性能曲線の算出する方法を提案している。Wavelet 変換とは、時間歴は波形を維持したまま、異なる周波数の波形に分解できる時間周波数解析手法である。本研究は、1 次モードを抽出した性能曲線を算出するために、Wavelet 変換を用いて応答加速度波形を分解し、不要な Rank を取り除

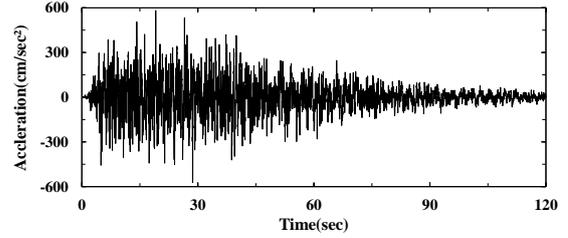


図-7 入力地震動

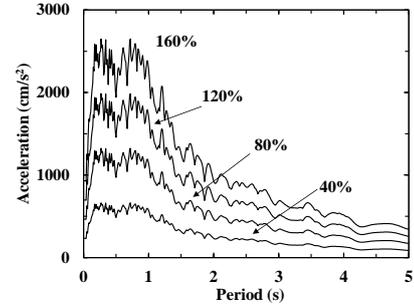


図-8 加速度応答スペクトル (減衰 3% 時)

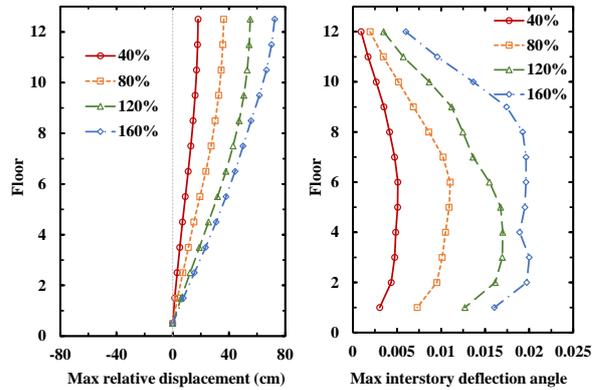


図-9 最大応答値

いた加速度値を「センサーによる計測値」と呼ぶ。代表加速度および代表変位は以下の式から算出する。

$${}_1S_a = \frac{\sum m_i \cdot {}_1\ddot{x}_i^2}{(\sum m_i \cdot {}_1\ddot{x}_i)^2} \sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_1\ddot{x}_i + {}_1\ddot{x}_0 \quad (2)$$

$${}_1S_d = \frac{\sum m_i \cdot {}_1x_i^2}{\sum m_i \cdot {}_1x_i} \quad (3)$$

ここで、 ${}_1\ddot{x}_0$  は建物基部で観測された入力加速度の主要振動数成分、 $m_i$  は各階の質量、 ${}_1\ddot{x}_i$  は基礎に対する  $i$  階の変位の主要振動数成分、 ${}_1\ddot{x}_i$  は基礎に対する  $i$  階の加速度の主要振動数成分、 $N$  は建物の階数である。以下の検討は Wavelet 変換を適用した性能曲線を用いる。

図-10 に各入力倍率の性能曲線を示す。図には、荷重増分解結果による性能曲線を併せて示している。ここで、非線形荷重増分解の外力分布は  $A_i$  分布に基づいた分布形を用い、いずれかの層の層間変形角が 1/50 に達するまで解析を実施した。代表加速度は層せん断力、有効質量比および建物の総重量を用いて算出している。他の観測による性能曲線は前述に示した方法により加速度

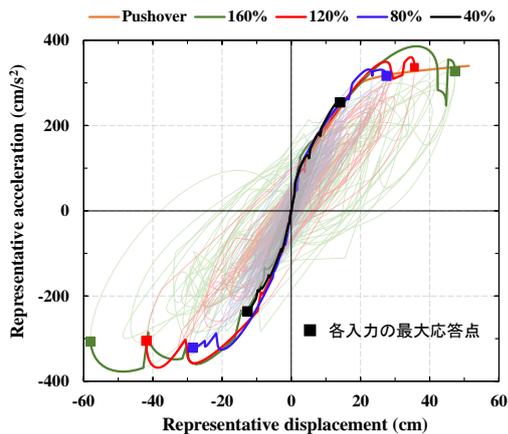


図-10 性能曲線

計測値のみから算出する。図-10 に示したように、弾性範囲において各性能曲線は傾きがよく一致し、降伏点がほぼ 20cm の程度であった。しかし、降伏点以降では、観測による性能曲線の代表加速度は荷重増分解析とは完全に一致しないことが確認された。これは振動時生じた減衰力に起因すると考えられる。そのため、2 節で述べたように性能曲線を 3 折れ線にモデル化する必要があると考えられる。

各性能曲線から次のことが分かる。40%の入力では建物が完全に弾性状態で、80%の入力は塑性化が若干進んでいる。120%および 160%の入力において塑性化が大きく進んでいることが見取られる。本研究では各層の安全限界点は既知であると仮定しており、入力倍率が 160% の場合、検討建物の安全限界層間変形角があらかじめ仮定した 1/50 に達したため、性能曲線の最大応答点（正側 47.4cm、負側 58.0cm）は真の安全限界点とみなす。

#### 4. センサー数の影響に関する検討

ここでは、弾性である 40%の入力を除いて、80%、120%、160%の入力について検討する。文献 4)、文献 5)に従って性能曲線の 3 折れ線モデル化を行った。図-11～図-13 に異なるセンサー個数による性能曲線を示す。ここでは、加速度センサーを高さ方向に均等配置とした。なお、建物の基部（1F の床）と最上階（RF の天井）に常に設置しておく。例えば 4 点設置では、1F、5F、9F および RF にセンサーを置いている。第二折れ点はセンサーの個数によらずほぼ精度よく算出した。

図-11 を見ると、少数センサーを用いた性能曲線は全階設置の性能曲線と形状はよく一致しているが、塑性化が大きくなる場合に、図-12 および図-13 のように、2 点設置の性能曲線では代表加速度が急激に低下することが分かった。これは、代表加速度は式(2)により算定されるが、2 点設置で補間した直線モードと真のモードでは、同式の有効質量比および加速度の足し合わせの差が大き

くなるためである。また、センサーが少ないほど性能曲線上の応答値は小さくなった。これは直線補間によりある階の層間変形が真の応答より小さく評価されているためである。そこで、本検討は直線補間により算出した相対変位と真の相対変位の誤差を標準偏差  $s$  で評価する様に試みる。標準偏差が小さければ小さいほど精度がよくなることが分かった。標準偏差は式(4)により算出する。 $x_i$  は各階の相対変位の誤差、 $\bar{x}$  は誤差の平均値である。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

図-9 の左図に示した各入力の最大応答相対変位に対して、直線補間による誤差の標準偏差を計算した。入力レベルごとに、式(4)を用いて計算した各センサー設置数での標準偏差を図-14 に示す。センサーが 4 つの場合標準偏差は 1.0 以下となる。また、図-11～図-13 より 4 点配置すれば性能曲線上の折れ点がよく一致しており、最大応答点までも良好に推定できる。弾性範囲である 40% では、建物の応答モードが直線であるため 2 点設置でも十分であるが、塑性化の進展とともに、標準偏差が大きくなっていく傾向がある。しかし、全体崩壊に近い 160% の入力では、モード形は逆三角形分布に近づくため標準偏差が再び小さくなった。

次に、安全限界状態に至っていない応答観測データを用いて性能曲線の安全限界点の外挿を検討する。図-15～図-16 にそれぞれの入力レベルに対して推定した安

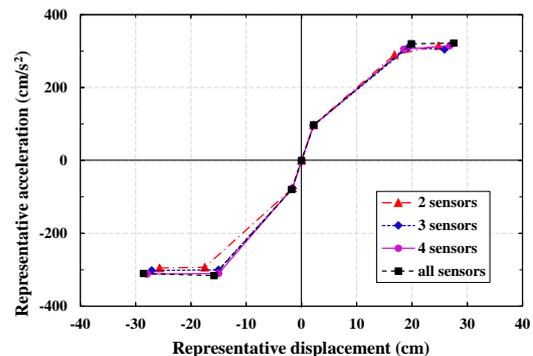


図-11 性能曲線の比較 (80%)

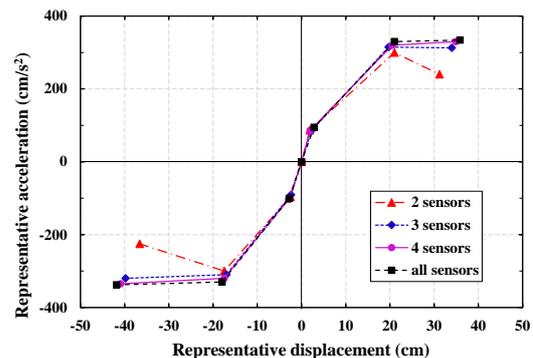


図-12 性能曲線の比較 (120%)

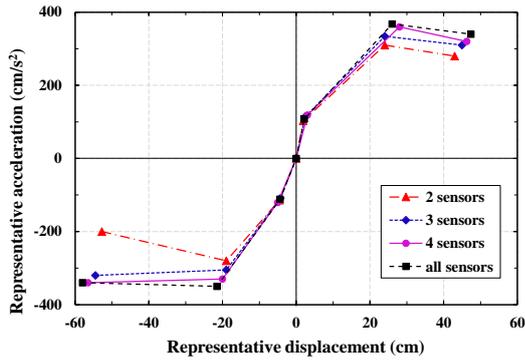


図-13 性能曲線の比較 (160%)

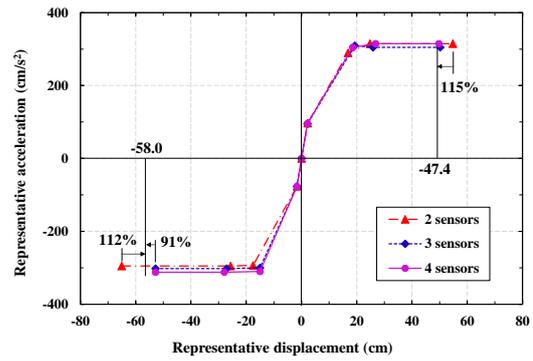


図-15 安全限界点の推定 (80%)

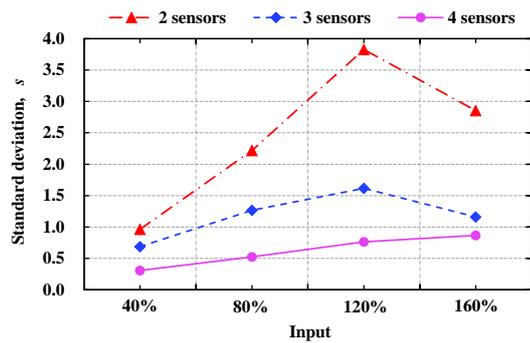


図-14 標準偏差

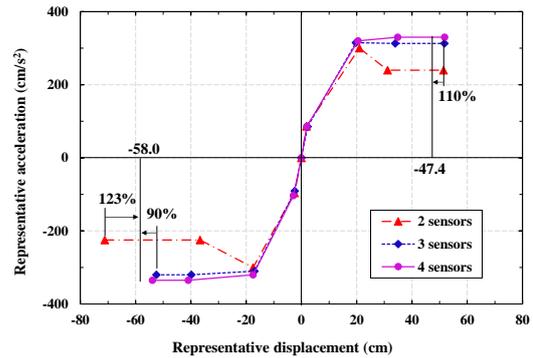


図-16 安全限界点の推定 (120%)

全限界点を示す。ここで、真の安全限界変位は160%の性能曲線の最大応答変位とする。2点設置の性能曲線では、推定した安全限界変位は過大評価となった。センサーが3点および4点の場合は推定誤差が小さくなった。80%の入力の正側では、3、4点センサーから推定された安全限界変位は160%であった真の安全限界変位とほぼ一致した。

## 5. まとめ

センサー設置階数が性能曲線の精度に与える影響を検討するため、12階の鉄筋コンクリート造建物を対象に、時刻歴応答解析を行った。得られた加速度記録を用いて性能曲線を算出し、3折れ線モデルに近似した。センサー数を減らした性能曲線との比較を行い、安全限界変位の推定精度を検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1). センサーが少ない場合に、直線補間により求めた場合の誤差を標準偏差で性能曲線の精度を評価する方法を提案した。標準偏差をある程度の値（例えば1.0）以下に抑えるようにセンサー数を決定すれば十分な精度で性能曲線を求めることができる。
- 2). 標準偏差が1.0以下とすれば、少ない観測データを用いて精度よく安全限界変位を外挿することが可能であった。

なお、全体崩壊ではなく層崩壊の場合の検討を今後の課題とし、さらに実験や解析による検証を行っていき

いと考える。

## 参考文献

- 1) 楠浩一, 勅使川原正臣: リアルタイム残余耐震性能判定措置の開発のための加速度積分法, 日本建築学会構造系論文集, No.569, pp.119-126, 2003
- 2) 川村学, 楠浩一ほか: 加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出法に関する研 1 質点系構造物の場合, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻第688号, pp.1061-1070, 2013.6
- 3) 楠浩一, 日向大樹, 服部勇樹, 田才晃: 加速度計を用いた実構造物の性能曲線算出法に関する研究 多質点系構造物の場合, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻第699号, pp.613-620, 2014.5
- 4) 服部勇樹, 楠浩一, 日向大樹, 田才晃: 加速度計測値から算出した性能曲線の復元力モデル化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.745-750, 2014
- 5) 楠浩一: 加速度記録により求めたR/C造建物の性能曲線のための外挿法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第84巻第761号, pp.961-971, 2019.7
- 6) 日向大樹, 楠浩一, 田才晃, 川村学: 残余耐震性能判定のためのWavelet変換を用いた加速度計測値から算出する性能曲線の精度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.931-936, 2013