

令和4年度 建築研究所講演会

# 地震時における鉄骨造建築物の 損傷検知手法の開発

構造研究グループ 長谷川 隆

# 講演内容

- I. はじめに
- II. 地震時の鉄骨造建物の応答変位推定方法に関する基礎的検討
  - 1) 鉄骨造骨組の振動台実験の概要
  - 2) 残留変形を考慮した加速度の積分による応答変形の推定精度
- III. E-ディフェンス実大3層建物の振動台実験データを用いた損傷検知手法の検証
  - 1) 地震時の鉄骨造建築物の梁端部の損傷検知手法の提案
  - 2) E-ディフェンス実大3層建物への適用による提案手法の検証
- IV. 建物各層の加速度応答等の推定方法の検討
  - 1) 実用化に向けた課題
  - 2) 解析モデルを用いた建物各層の加速度応答等の推定
- V. 実際の建物への適用による実用化技術の検討と地震観測
  - 1) 被災状況表示システムの導入
  - 2) 実在の建物への地震計の設置と地震観測
- VI. まとめ

# I. はじめに（背景と目的）

一般的な鉄骨造建築物は、構造躯体が内外装材に覆われているため、地震後に構造部分の損傷を直接観察するのが困難な場合も多いと考えられる。

2011年の東北地方太平洋沖地震では継続時間が非常に長い地震動が観察され、このような地震に対して鉄骨梁端部が疲労的に破断する可能性がある。また、最近の内外装材の変形追従性能の向上によって、内外装材に損傷が生じていなくても梁端部の破断等が発生している可能性があり、それが見逃されてしまうことが危惧される。

このような問題に対応するために、

建研の指定課題「極大地震に対する鋼構造建築物の倒壊防止に関する設計・評価技術の開発（R1～R3）」を実施し、**鉄骨造建築物の地震時における損傷部位とその状態を地震計による記録から検知し判定する手法を開発した。**



兵庫県南部地震の鉄骨ビルの外観

## Ⅱ. 地震時の鉄骨造建物の応答変位推定方法に関する基礎的検討

### 1) 鉄骨造骨組の振動台実験の概要

#### 研究の目的

- 本研究では、地震計の加速度記録の積分によって鉄骨造建築物の各層の応答変位を推定し、それをを用いて、梁端部の損傷を推定するものである。
- そのため、1層1スパンの鉄骨造骨組の振動台実験を行って、加速度記録の積分による骨組の弾塑性領域での応答変位の推定精度や有効性について検討を行う。

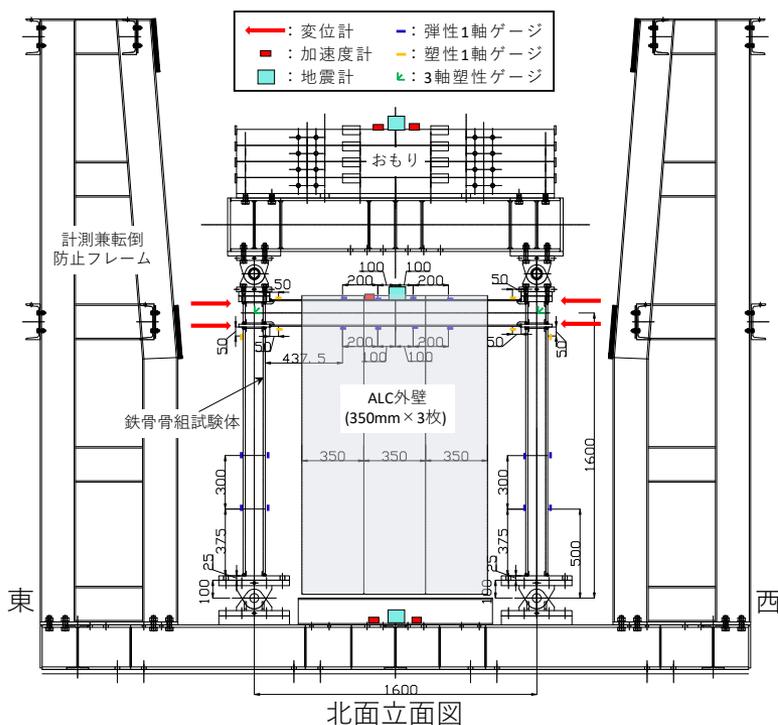
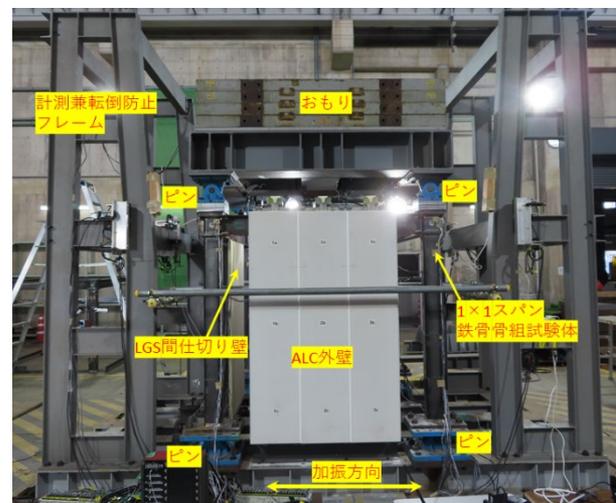
# 1層1スパン立体骨組の振動台実験の概要

非構造部材の有無と、入力地震動（直下地震、長継続時間地震）をパラメータとして計4体の1層1スパン立体骨組試験体の振動台実験を行い、加速度記録の積分による応答変形推定の精度、残留変形を考慮して計算する方法の影響などについて検討する。

## 試験体諸元

試験体名	鉄骨骨組(Steel Frame)部材断面		非構造部材(Non Structure)の有無	梁端 ディテール	入力地震動
	梁断面	柱断面			
SF_Kobe	H-150×75×5×7 (SN400B)	□-125×125×12 (STKR400)	無し	18R	JMA Kobe NS
SF_THU					THU NS
SF-NS_Kobe			ALC壁(加振構面)及びLGS 間仕切り壁(加振直交構面)有り	スカラップ	JMA Kobe NS
SF-NS_THU					THU NS

## 試験装置外観



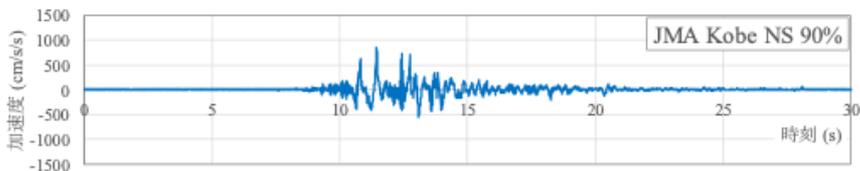
## セットアップ

# 入力地震動の設定と骨組の基本特性（周期、減衰）

## 入力地震動の設定

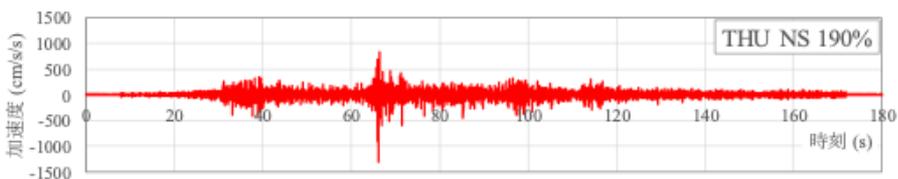
実物の1/2程度の試験体なので、相似則を考慮して時間軸を $1/\sqrt{2}$ に縮小した地震動を設定

JMA Kobe NS：1995年兵庫県南部地震で観測された直下地震

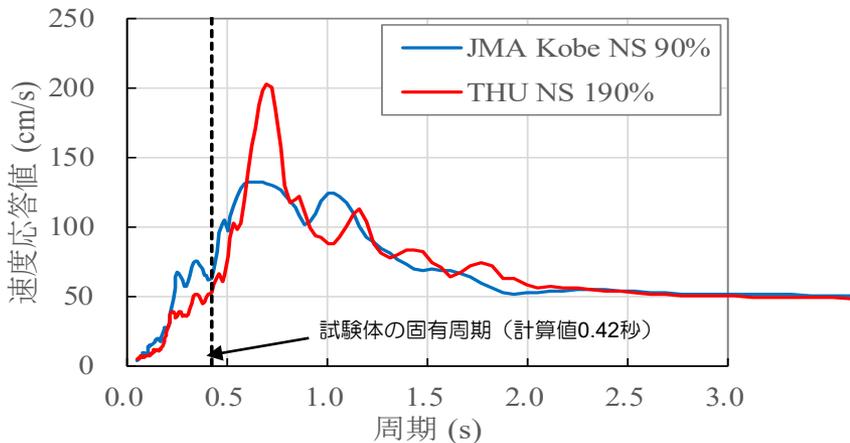


入力地震動の時刻歴波形

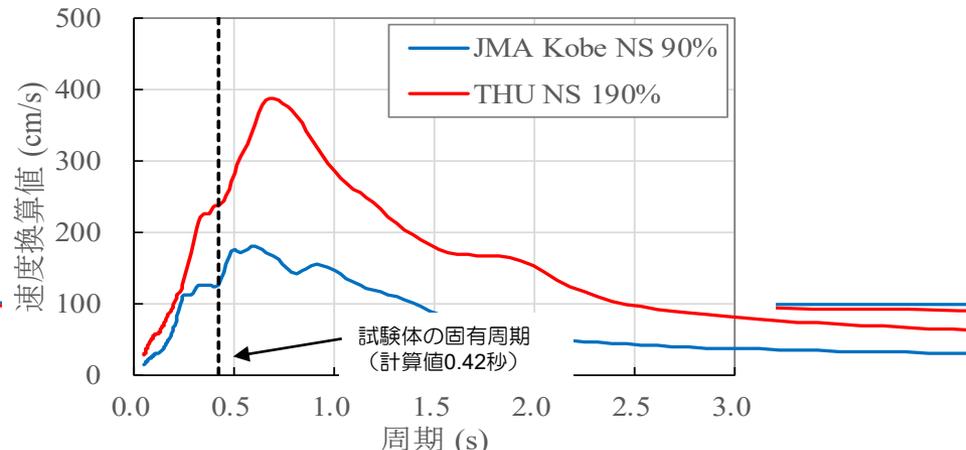
THU NS：2011年東北地方太平洋沖地震において観測された長継続時間の地震



入力地震動の時刻歴波形



速度応答スペクトル

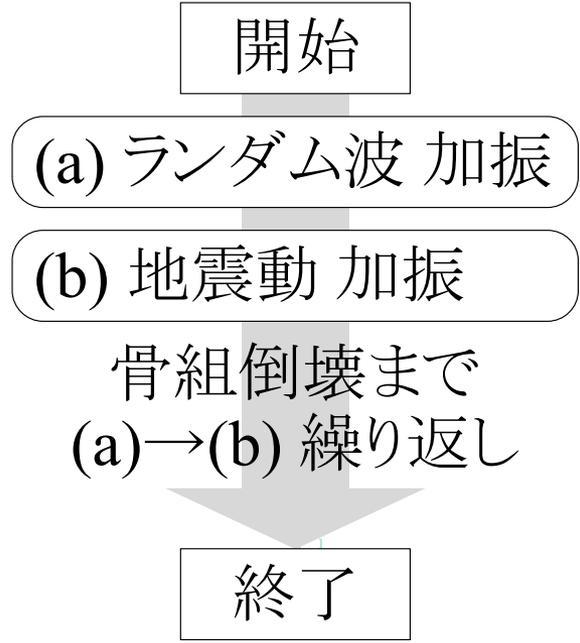


エネルギースペクトル

- THUは地震動の継続時間が長く、エネルギースペクトルが大きい。

# 加振スケジュール

## ■加振フロー



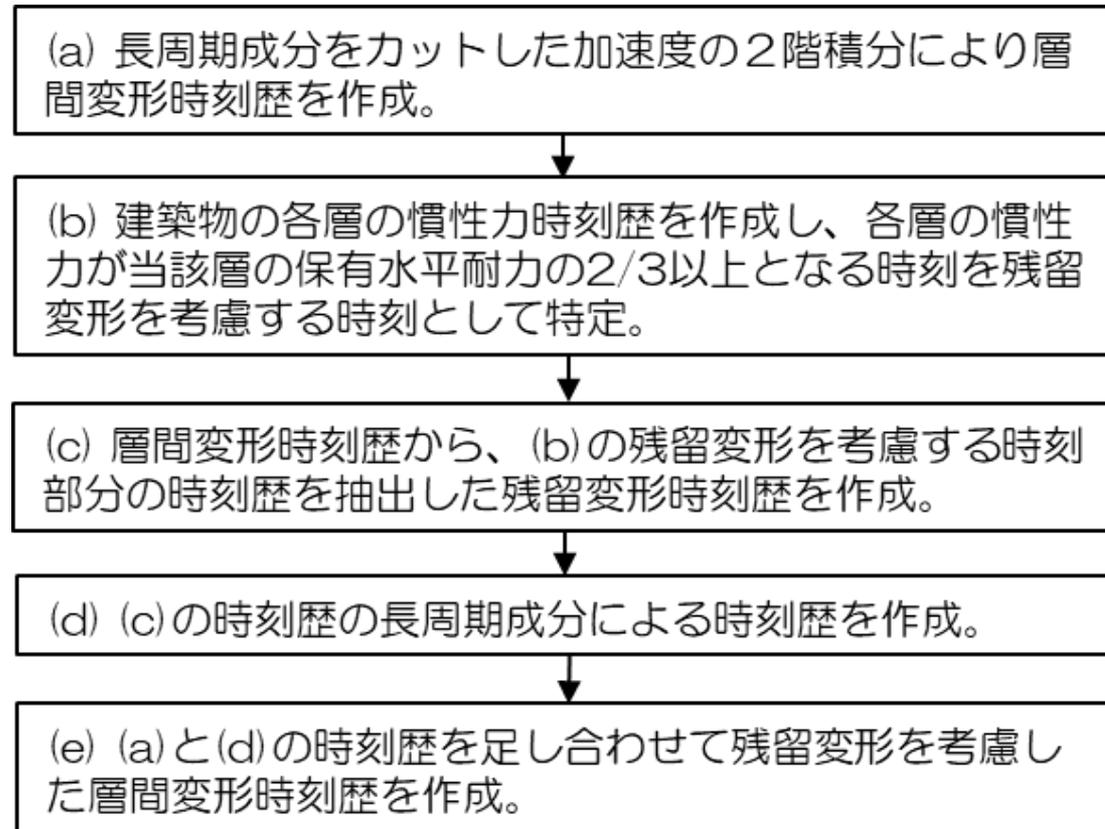
## ■各試験体の加振スケジュール

試験体名	SF_Kobe	SF_THU	SF-NS_Kobe	SF-NS_THU	
入力地震波	JMA Kobe NS	THU NS	JMA Kobe NS	THU NS	
倍率	予備加振	10%	15%	10%	15%
	1回目	70% (1)	170% (1)	70% (1)	170% (1)
	2回目	90% (1)	170% (2)	90% (1)	170% (2)
	3回目	90% (2)	190% (1)	90% (2)	190% (1)
	4回目	90% (3)		90% (3)	190% (2)
	5回目	90% (4)		90% (4)	

加速度の積分を検討した加振回

## 2) 残留変形を考慮した加速度の積分による応答変形の推定精度

### 残留変形を考慮した加速度記録の積分の計算手順



- 一般的な加速度の積分では、(a)のみの計算を行うが、この場合、最終的な変形は0になり、残留変形は計算できない。
- (b)～(d)の計算で、残留変形時刻歴を計算している。

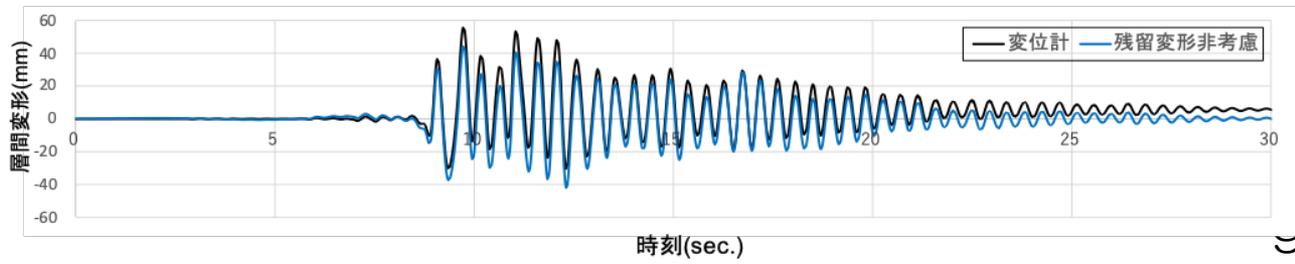
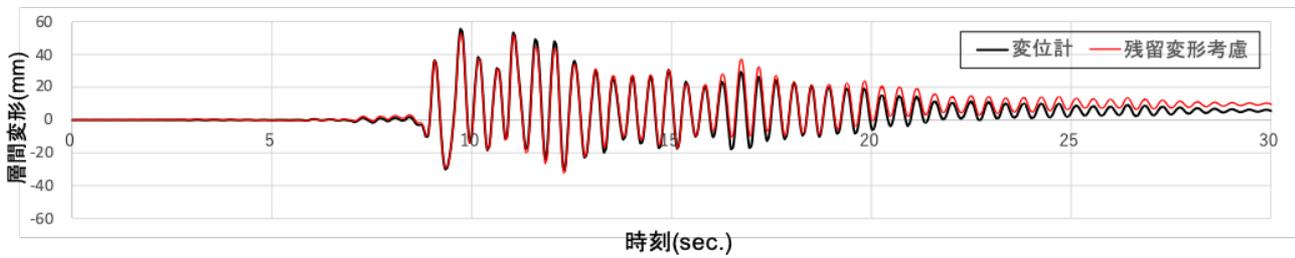
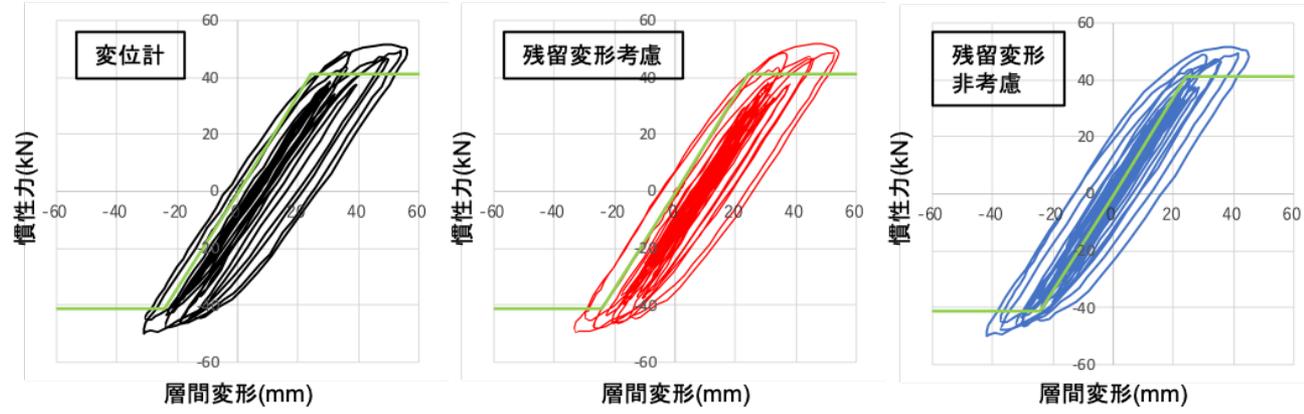
# 加速度の積分による骨組試験体の応答変形の計算 (JMA Kobe)

## 残留変形考慮する場合、残留変形考慮しない場合と変位計の記録の比較

### 慣性力-層間変形関係及び時刻歴 (JMA-Kobe)

非構造部材無し (SF)

・ 残留変形考慮する場合もしない場合も、概ね変位計の記録を推定できている。



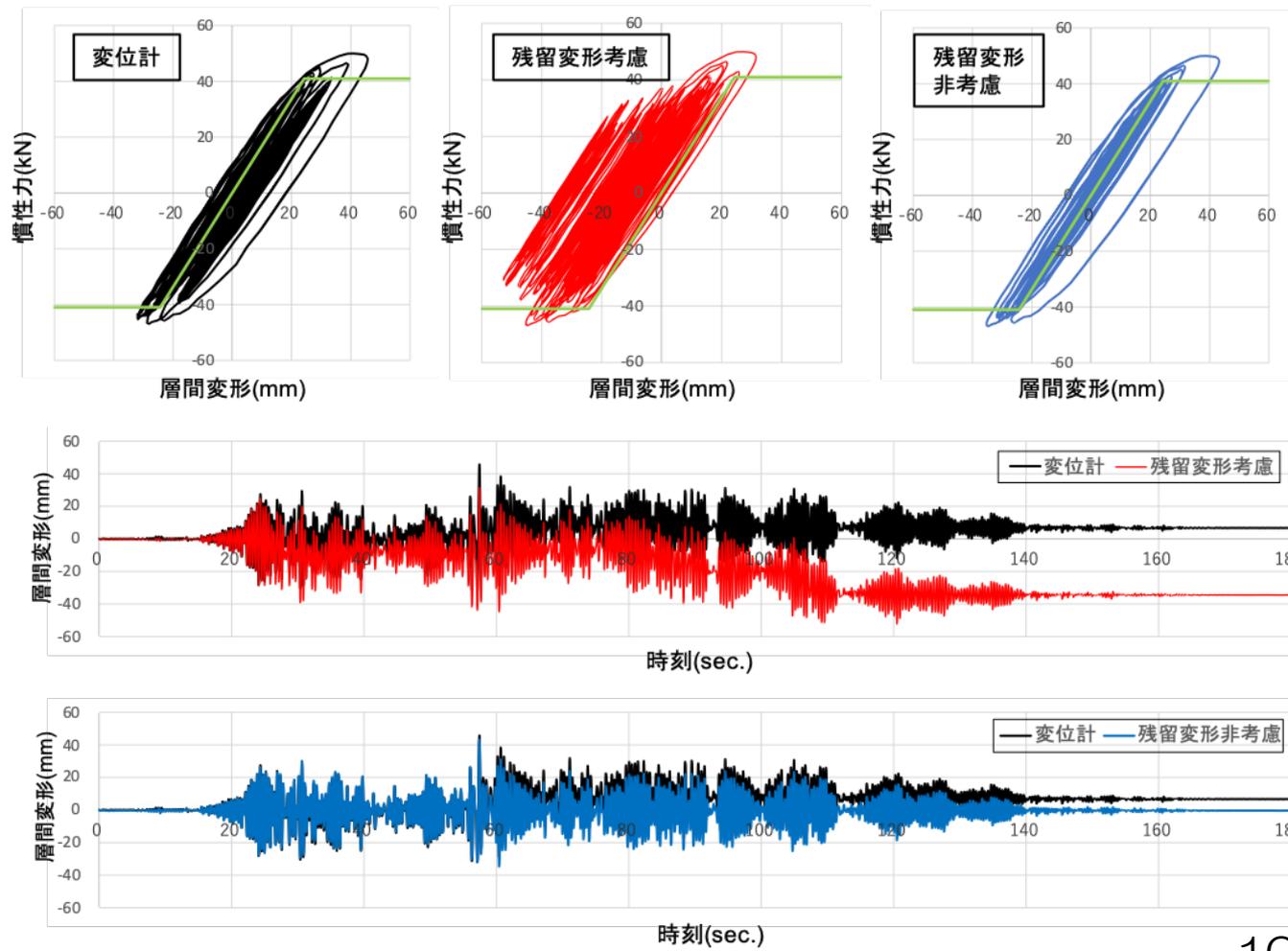
# 加速度の積分による骨組試験体の応答変形の計算 (THU)

## 残留変形考慮の計算、残留変形非考慮の計算と変位計の記録の比較

### 慣性力-層間変形関係及び時刻歴 (THU)

非構造部材無し (SF)

- SF試験体では残留変形考慮した場合に、振動中心が負側にシフトし、残留変形計算の微妙な計算誤差の影響で適切でない変位時刻歴となる場合がある。



# 層の最大層間変形等の比較

各試験体の最大層間変形について、変位計、残留変形考慮の積分、残留変形非考慮の積分の結果を比較した。

試験体	最大層間変形 (mm)		
	変位計	残留変形考慮の積分 (積分/変位計)	残留変形非考慮の積分 (積分/変位計)
SF_Kobe(090_1)	56.1	53.9 (0.96)	45.0 (0.80)
SF-NS_Kobe(090_1)	55.4	50.1 (0.91)	45.0 (0.81)
SF_THU(170_1)	45.7	53.0 (1.16)	43.3 (0.95)
SF-NS_THU(170_1)	40.3	37.9 (0.94)	40.6 (1.01)

- JMA-Kobeの実験では、残留変形考慮の積分によって最大層間変形の推定精度も向上した。

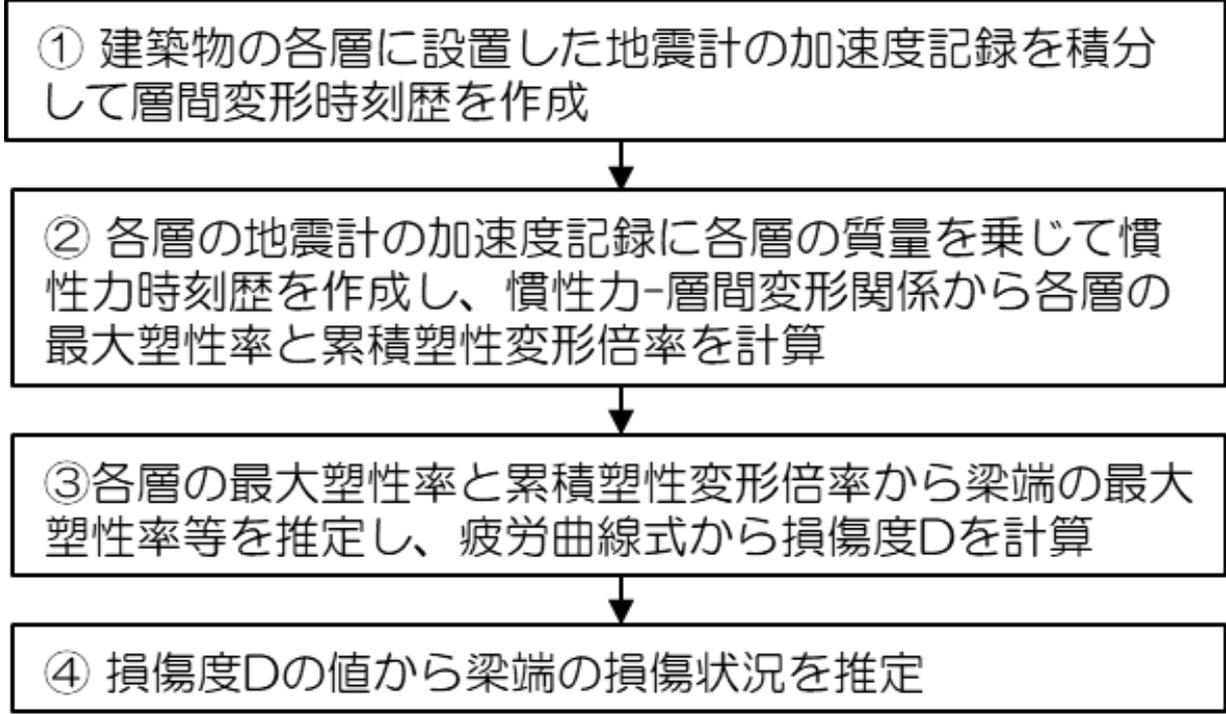
- THUの実験では、加振中心の不適切な移動なども見られ、適用について注意が必要と考えられる。

- 一般的な積分による応答変形の計算（残留変形を考慮しない場合）でも、鉄骨骨組の弾塑性の応答変形を概ね推定できると考えられる。

# Ⅲ. E-ディフェンス実大3層建物の振動台実験データを用いた損傷検知手法の検証

## 1) 地震時の鉄骨造建築物の梁端部の損傷検知手法の提案

### 梁端部の損傷状況を評価するための計算手順

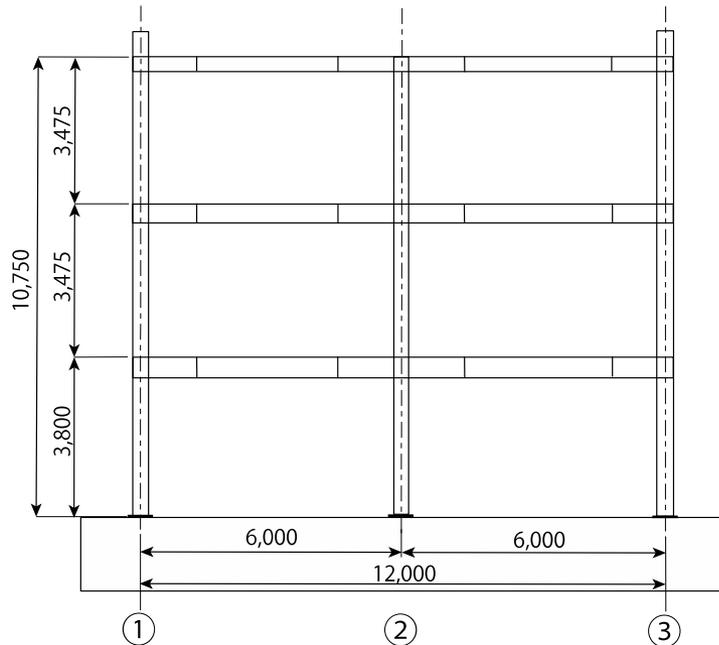


③の計算については、長周期地震動に対する超高層鉄骨造建物の梁端部の安全性評価法として提示されている計算方法\*1)をそのまま適用している。

\*1) 国立研究開発法人建築研究所：超高層鉄骨造建築物の繰返し変形による梁端部破断の検証方法 その2、長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ、2017.4。

## 2) E-ディフェンス実大3層建物への適用による提案手法の検証

公開されているE-ディフェンス実大3層の鉄骨造建築物の振動台実験データ\*2)に適用し、本研究で提案する方法の妥当性を検証する。



対象試験体の立面

### 主要な梁と柱部材の断面

階	大梁	層	柱
R	H-350×175×7×11 (SS400)	3	□-350×9 (BCR295)
3	H-400×200×8×13 (SS400)	2	□-350×12 (BCR295)
2	H-450×200×9×14 (SS400)	1	

- 柱梁接合部は通しダイヤフラム方式、梁端部はスカラップ工法 (35R)
- 振動台の加振は、想定南海トラフ波-1、鷹取波、想定南海トラフ波-2

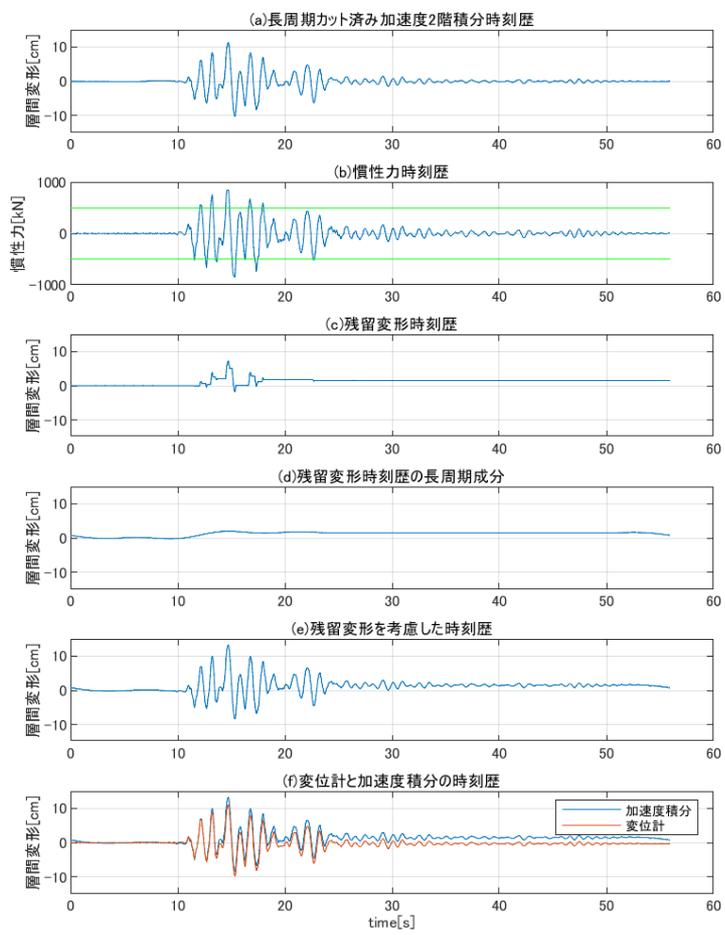
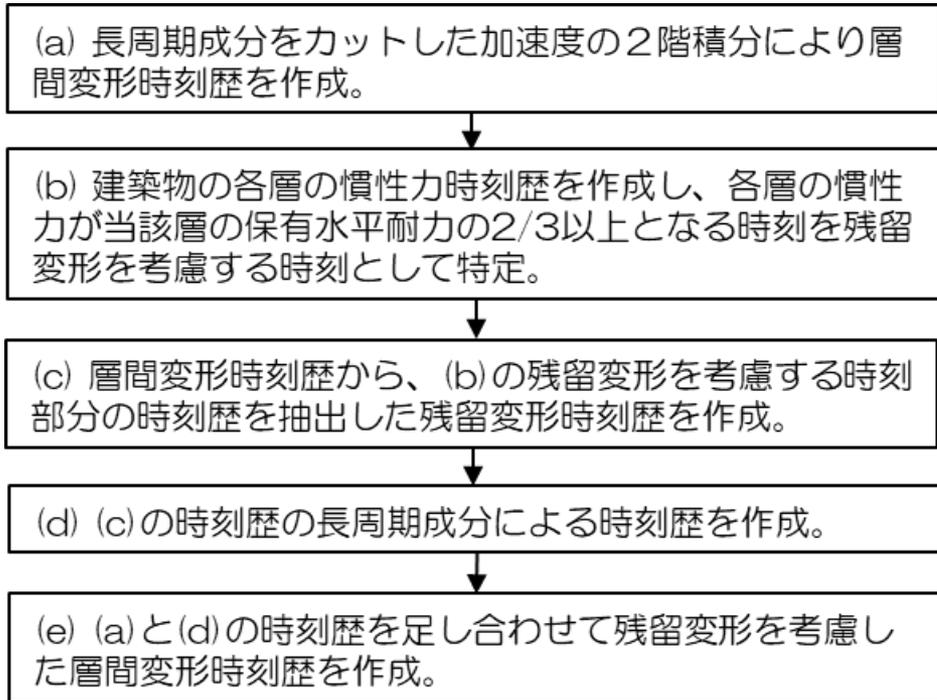
\*2) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：「ASEBI」 <https://www.edgrid.jp> より課題名「地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究」

# 積分による推定波形と梁端部の損傷度Dの計算

## a) 鷹取波80%の加振での検討結果

## 加速度記録の積分計算の例 (鷹取波80%第1層)

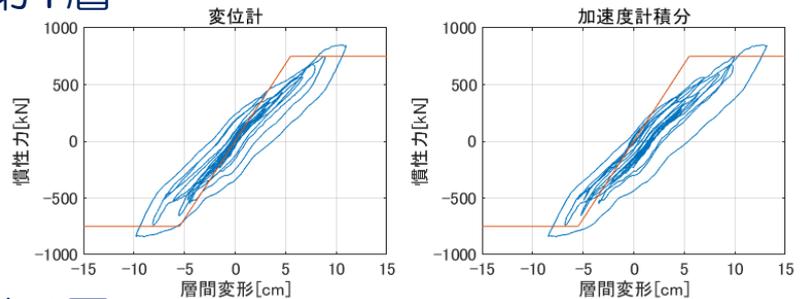
残留変形を考慮した加速度記録の積分の計算手順



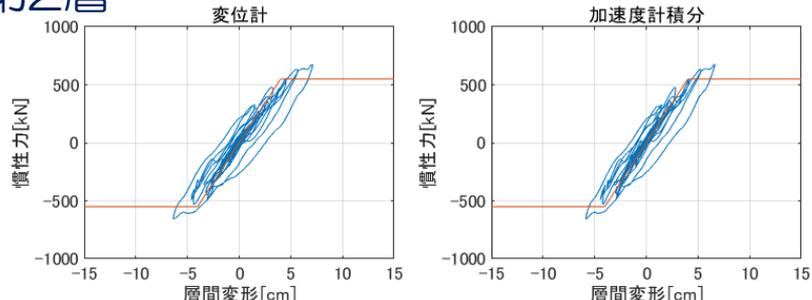
・ 加速度積分した結果と変位計の時刻歴はほぼ一致している。

# 各層の慣性力-層間変形関係と損傷度Dの計算結果(鷹取波80%)

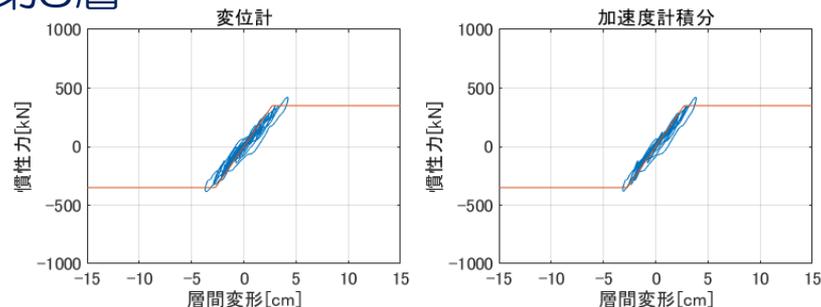
## 第1層



## 第2層



## 第3層



## 各層で計算された損傷度Dと損傷状況(鷹取波80%)

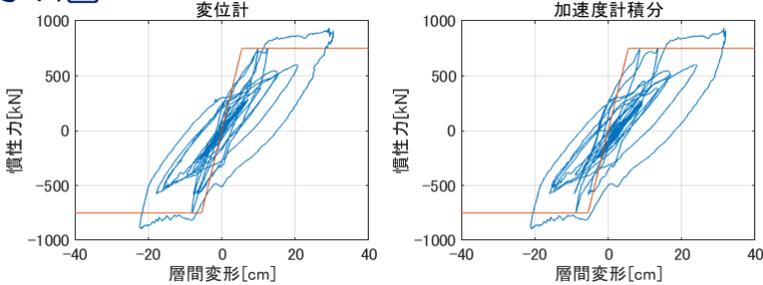
	使用記録	層の最大塑性率	層の累積塑性変形倍率	D値	D値	損傷状況
					(累積)	
1層	レーザー変位計	2.01	4.43	0.33	0.47	亀裂発生
	加速度積分	2.41	3.88	0.46	0.57	
2層	レーザー変位計	1.78	3.85	0.22	0.31	亀裂なし
	加速度積分	1.65	2.99	0.14	0.2	
3層	レーザー変位計	1.56	2.57	0.11	0.16	亀裂なし
	加速度積分	1.43	1.41	0.05	0.08	

- 慣性力-層間変形関係は、変位計と加速度の積分は概ね同様の履歴性状を示した。
- D値も比較的精度よく推定されている。
- D値0.5程度で亀裂が観察され、0.3程度では亀裂なし。

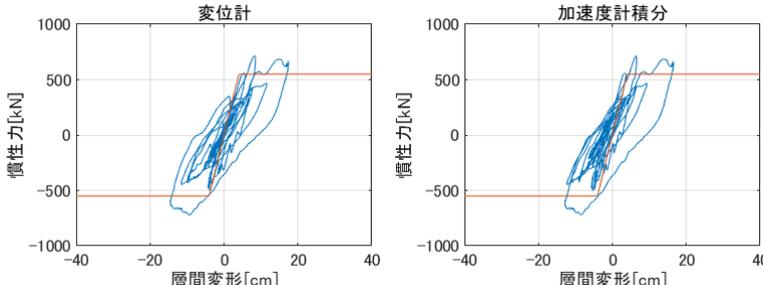
## 慣性力-層間変形関係の比較

# 各層の慣性力-層間変形関係と損傷度Dの計算結果(鷹取波100%)

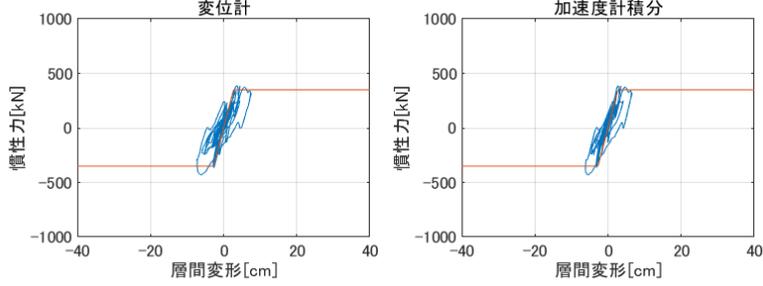
## 第1層



## 第2層



## 第3層



慣性力-層間変形関係の比較

## 各層で計算された損傷度Dと損傷状況(鷹取波100%)

	使用記録	層の最大塑性率	層の累積塑性変形倍率	D値	D値	損傷状況
					(累積)	
1層	レーザー変位計	5.54	19.0	23.7	24.2	梁フランジ破断
	加速度積分	5.83	18.3	26.6	27.2	
2層	レーザー変位計	4.34	16.5	10.1	10.4	梁フランジ破断
	加速度積分	4.12	14.5	7.58	7.78	
3層	レーザー変位計	2.77	9.16	1.58	1.74	亀裂なし
	加速度積分	2.40	7.05	0.83	0.91	

- 大変形時の応答についても概ね同様の履歴性状で推定できている。
- 破断した場合のD値は大きな値となり、破断を十分予測できる。

➡ 提案した損傷検知手法によって各層の梁端部の亀裂や破断を推定が可能と考えられる。

# 梁端部の損傷度Dと損傷状況の関係

E-ディフェンスの振動台実験の検討や既往の実験結果を調査し、スカラップを有する梁端部の損傷度Dと損傷状態の関係について、以下のように提案した。

鉄骨梁端（スカラップ）の損傷度Dと被害状況との関係			
損傷度Dの区分	構造に関する被災度区分	建物の各階に想定される構造的な被害の状況	地震後の対応（参考）
D=0（緑）	Os（無被害、軽微）	建物の構造としては概ね弾性挙動の範囲内であり、構造的な被害はほとんど無いと考えられる。	構造的には継続使用可能な状態。（外装、内装材等の非構造部材や設備等に被害が発生している場合はある）
0<D<0.2（黄）	Is（小破）	該当する階の梁端部は降伏している状態であるが、梁端部には亀裂等が生じていないと考えられる。	構造的には継続使用可能な状態と考えられるが、内外装材等や設備等の被害状況によっては、専門家に相談した方がよいと考えられる状態。
0.2≤D<1.0（オレンジ）	Ⅱs、Ⅲs（小破～中破）	該当する階の一部の梁端部フランジには亀裂等が生じ、それが進展している場合や、亀裂が貫通（部分的に破断）している可能性がある。	専門家に相談し、該当する階については、構造部材の調査を行う必要があると考えられる状態。
1.0≤D<1.5（赤）	Ⅳs（中破）	該当する階の一部の梁端部のフランジには、破断が生じている可能性がある。	早急に専門家に相談し、該当する階について、構造部材の調査（特に梁端部の破断の有無の調査）を行って、継続使用の可否や補修の要否を判断すべき状態。
1.5≤D（紫）	Vs（大破）	該当する階の数箇所の梁端部のフランジで、破断が生じている可能性がある。（損傷度の数値が大きいほど破断箇所が多い）	該当する階及びその上下階（または建物）では、避難を行う必要があり、至急、専門家に相談し、構造部材の調査を行う必要がある状態。

 提案した手法によって建物各層のD値が計算され、上記の表から被災度区分判定を行い、継続使用性の可否や避難の要否などが判断できる。

## IV. 建物各層の加速度応答等の推定方法の検討

### 1) 実用化に向けた課題

地震時の建物の損傷検知を行うにあたり、全ての階に加速度センサを設置できるのが理想であるが、コスト面の問題等で全ての階に加速度センサが設置できない場合が多い。

ここで提案する損傷検知手法は、全ての階で梁端損傷度Dを計算して評価するため、全ての階の加速度応答記録が必要である。

既往研究で、設計時の情報に基づいて、刺激関数を用いた補間方法が提案されている<sup>\*3)</sup>ので、その方法の妥当性と有効性を検討する。

\*3) 斎藤知生：「建物モデルのバイズ更新を用いた地震応答推定と確率的被災度評価」、日本建築学会構造系論文集、No.683、pp.63-70、2013.01

## 2) 解析モデルを用いた建物各層の加速度応答等の推定

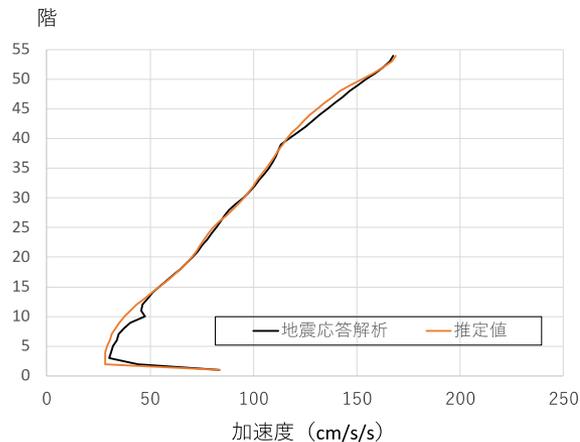
### ① 解析対象建物と解析方法

- 実在の52階建て超高層鉄骨造建物の質点系の解析モデル\*4)
- この解析モデルの時刻歴応答解析から得られる各層の加速度時刻歴を使って、限定層の加速度時刻歴データから全層の加速度時刻歴の推定を行い、各層の損傷度の計算を行う
- 入力地震波は東北地方太平洋沖地震時にこの建物で実際に記録されたものを、2.5倍にして、梁端部の損傷度がおおよそ1程度になるようにして解析を行う
- この建物には実際に、1、18、38、52Fの4箇所地震計が設置されているので、これら階の地震計の記録を使用して全階の加速度を推定する
- それとの比較として、比較的均等に6箇所（1、10、20、32、44、52F）に地震計が設置されていると想定した場合についても、同様に計算を行う

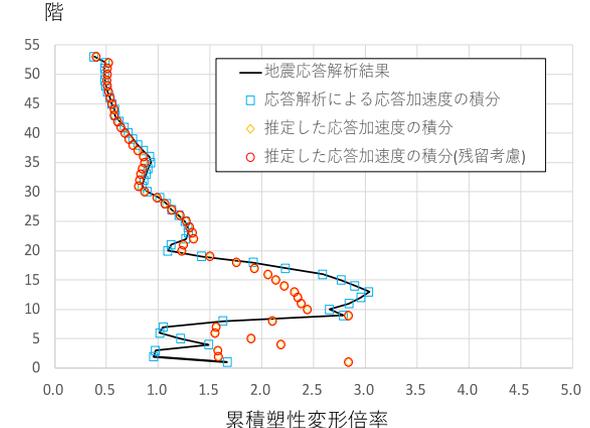
\*4) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震において観測された強震記録に基づく建築物の地震時挙動の分析、建築研究資料、No.138、(独)建築研究所、2012.9

# ② 解析結果

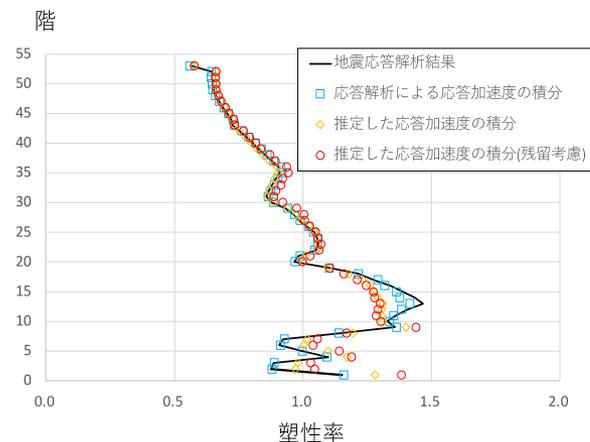
1、18、38、52Fの4箇所の加速度記録からの加速度と損傷度の推定（時刻歴解析による計算値との比較）



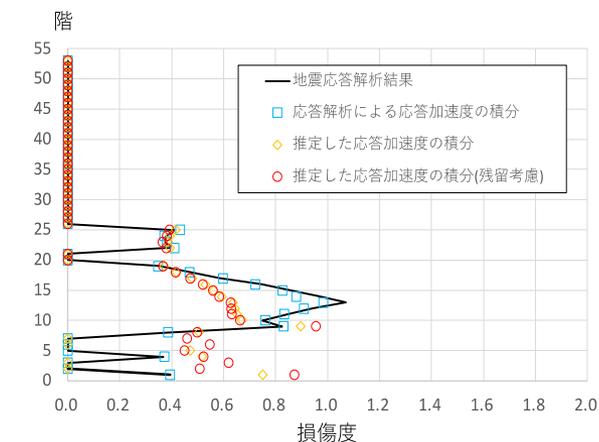
各階の最大加速度



各階の累積塑性変形倍率



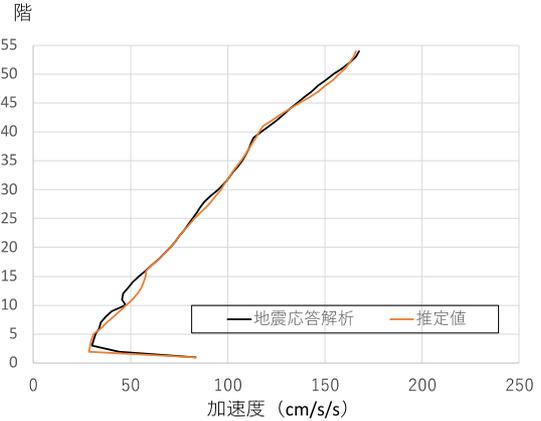
各階の塑性率



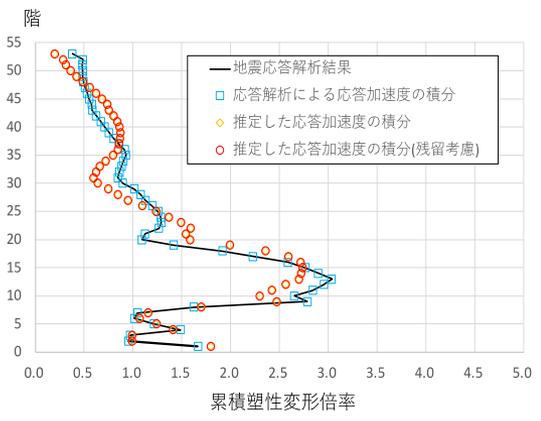
各階の梁端損傷度D

・最大加速度は概ね良好に推定されているが、20階以下で、塑性率、累積塑性変形倍率、梁端損傷度に多少のズレが見られる。概ね傾向は捉えている。

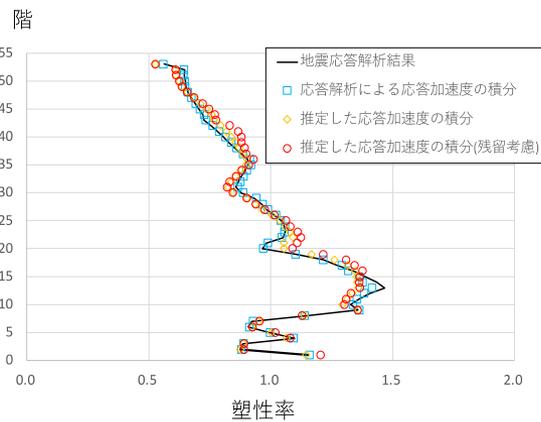
# 1、10、20、32、44、52Fの均等配置した6箇所の加速度記録からの加速度と損傷度の推定（時刻歴解析による計算値との比較）



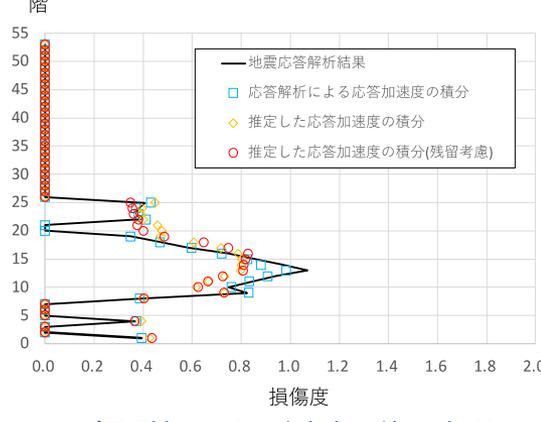
各階の最大加速度



各階の累積塑性変形倍率



各階の塑性率



各階の梁端損傷度D

・4点の加速度応答時刻歴を用いた結果と比較すると、20層以下で見られたズレがかなり小さくなり、地震応答解析の結果を精度よく推定できている。

➡ 適切な間隔である程度の数を設置すれば、限られた階の地震計の記録から全階の梁端部の損傷度が十分な精度で推定できると考えられる。

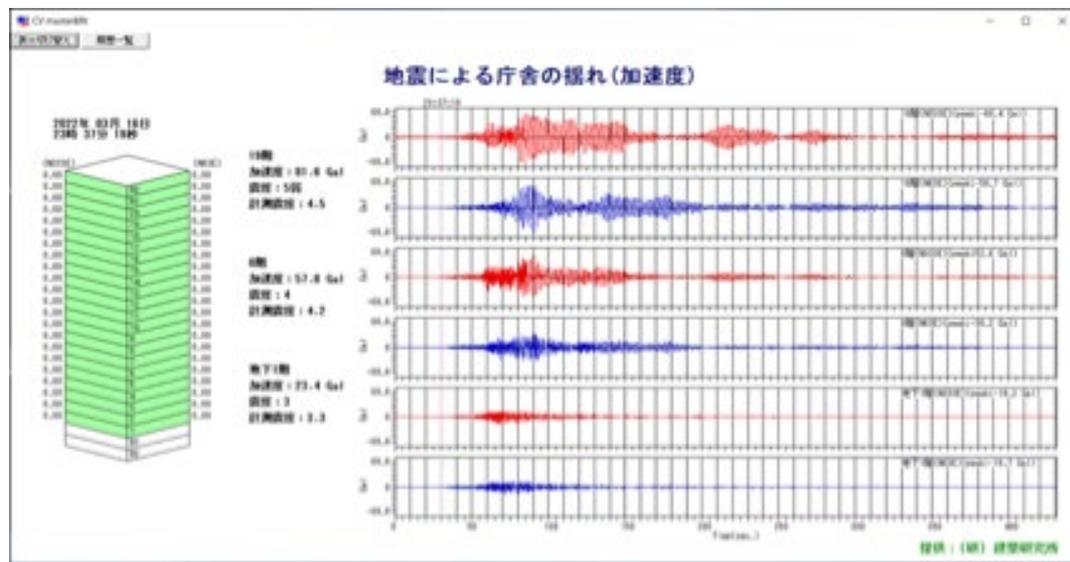
# V. 実際の建物への適用による実用化技術の検討と地震観測

## 1) 被災状況表示システムの導入

ここまでの検討で、本研究で提案する損傷検知手法が、十分に実用化可能であると考えられることから、実在する建物に適用して、実用化する上での問題などが無いか検討する。

- 地震計からの加速度記録をホストのノート型PCに収録し、そこで損傷の計算をして建物各層の損傷状況を表示する被災状況表示システムを作成した。

- 梁端損傷度Dの値により被災度区分判定され、結果は5色の色により表示される。



PC画面での22層建物の被災状況の表示例  
(被災度区分：0s)

## 2) 実在の建物への地震計の設置と地震観測

実在の2棟の鉄骨造事務所ビル（7階建て鉄骨造、20階建て超高層鉄骨造）に地震計を設置し、被災状況表示システムを導入して、観測を開始した。

- 7階建て鉄骨造事務所ビルの事例

1階からR階までの全ての階に無線式の地震計を設置し、建物全階の加速度記録を計測できるようにした。



7階建て鉄骨造事務所ビル（真ん中の建物）



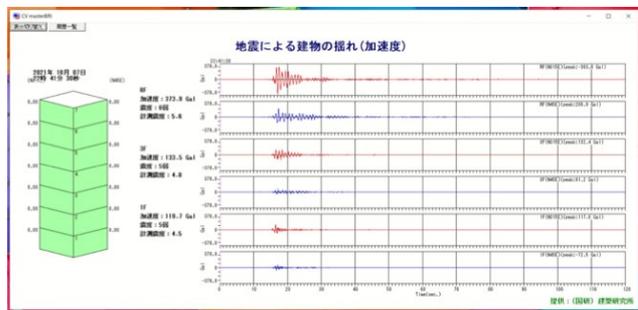
無線式地震計



事務室に設置した被災状況表示システム（PC）

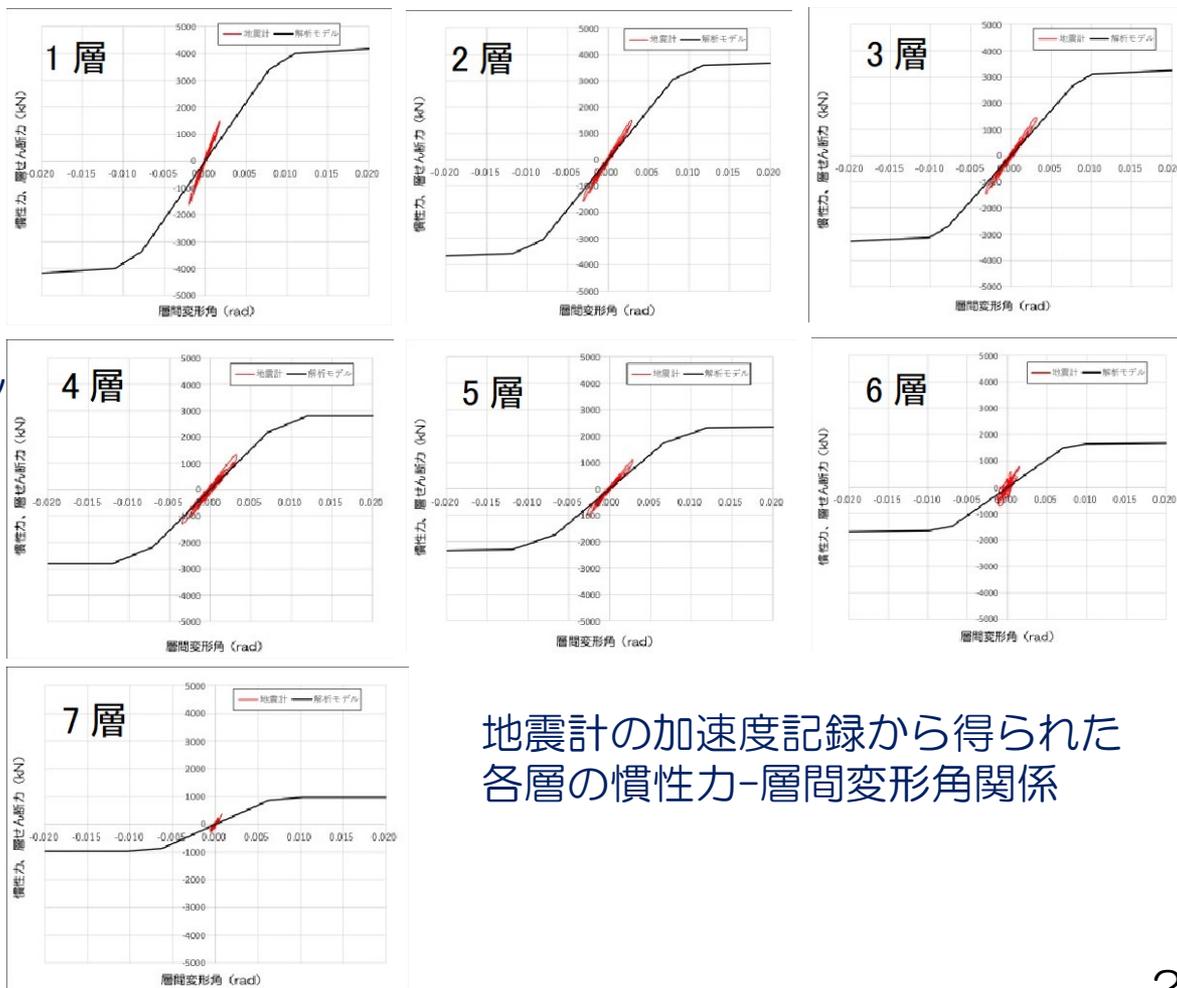
# 7階建て鉄骨造事務所ビルの観測例

2021年10月7日、関東地方震度5強の地震を観測し、被災状況を計算、表示した。全ての階で梁端部の損傷度Dは0であり、Os(無被害、軽微)の被災度区分であった。



震度5強の地震時の被災状況表示システムの画面

- ・ 第1ヒンジ発生耐力の6割程度の応答
- ・ 最下層と上層では、観測記録の層剛性がかなり高く、内外装材等の非構造部材の影響などが考えられる。



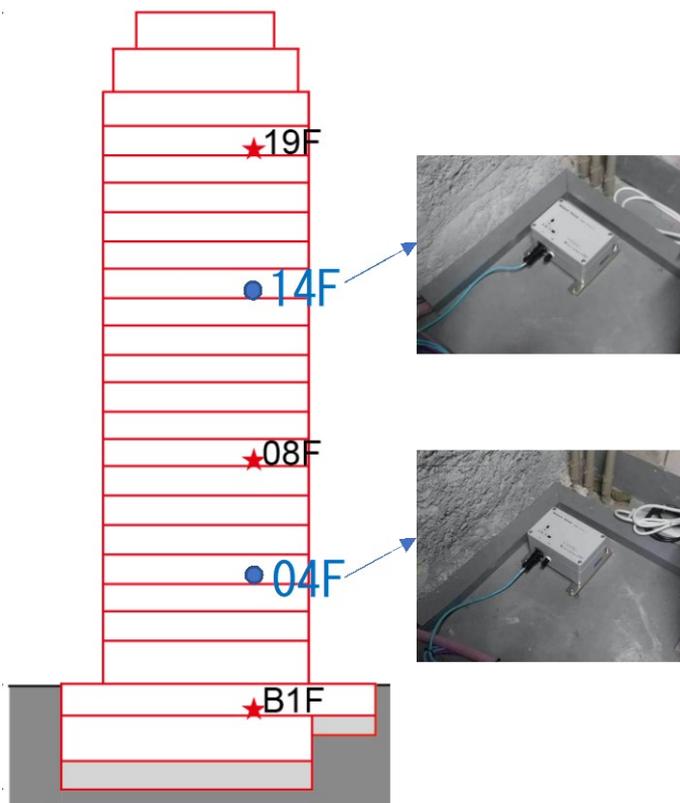
地震計の加速度記録から得られた各層の慣性力-層間変形角関係

## ・20階建て超高層鉄骨造事務所ビルの事例

建築研の強震観測建物であり、元々、B1F、8F、19Fに地震計が設置されていた。IV章で示した方法に基づいて、4Fと14Fに地震計を追加することで、高精度に全ての階の加速度応答を推定し、損傷度が計算できると考えられる。



建物外観



地震計の追加設置



被災状況表示の大型モニター

# VI. まとめ

鉄骨造建築物の地震時における損傷部位とその状態を即座に検知し判定する手法について、振動台実験やE-ディフェンスの実験データを用いて検討し提案した。

提案した手法を実在の建物に適用して、実用化する上での問題点がないか検討した。

## 1) 地震時の鉄骨造建物の応答変位推定方法に関する検討

- 一般的な加速度記録の積分によって、鉄骨造骨組の弾塑性領域での応答変形を概ね良好な精度で推定できることが確認された。
- 残留変形を考慮した積分方法は、最大応答変形をより精度よく推定できるが、正負の応答が比較的均等な地震動に対しては、適用に注意が必要となる。

## 2) E-ディフェンスの実験データを用いた提案手法の検証

- 梁端部の損傷度Dを計算して梁端部の損傷を評価する手法を提案した。
- この手法が、鉄骨造建物の各層の梁端部の亀裂発生や破断の有無を判定する上で有効な手段になり得ることを確認した。

## 3) 建物各層の加速度応答等の推定方法の検討

- 限定層の加速度時刻歴データから全層の加速度時刻歴を推定する方法の妥当性を検討した。

## 4) 実際の建物への適用による実用化技術の検討

- 実際の適用上の問題点などを検討するため、実在する2棟の建物（7階建て鉄骨造、20階建て超高層鉄骨造）に地震計と被災状況表示システム（PC）を設置し、観測を行っている。

# 謝辞

- 本研究は、建築研究所、東京工業大学、大阪大学、東京大学、京都大学、一般社団法人日本鋼構造協会の6者で共同研究を締結して実施しました。
- 一般社団法人日本鉄鋼連盟による「鋼構造研究・教育助成事業」の助成金を受けています。
- 強震観測の実施にあたっては建物管理者・関係者の方々に多大なご協力をいただきました。
- 国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」より「地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究」の実験データを使用させていただきました。

ここに記して深く感謝の意を表します。