

論文 連続巨大地震を対象とした RC 造建物の平面的設置角度が地震応答性状に与える影響

松田 泰知*1・保木 和明*2

要旨: 本研究は、連続巨大地震を対象とした RC 造建物の耐震性能評価をめざし、その端緒として、連続巨大地震が入力方向、すなわち、建物の設置角度に与える影響について、いくつかの建物モデルを仮定し、検討した。さらに、入力地震動に使用する巨大連続地震について、2016 年熊本地震で観測された観測波を基に検討した。その結果、1) 耐震壁が偏在するピロティ付き建物「L 字壁あり」の最大層間変形角は、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べて、どの設置角度においても大きく、約 1.7 倍（平均値）となったこと、2) 益城波は、スペクトル特性から標準的な観測波の 1 つであること、などが明らかとなった。

キーワード: 最大層間変形角, 最大柱変形角, ねじれ応答, 2016 年熊本地震

1. はじめに

2016 年 4 月 14 日（以下、前震）、16 日（以下、本震）に熊本県熊本地方を震源とする大地震が発生した（以下、2016 年熊本地震）。この地震の一つの特徴として、震度 7 となる地震が短期間（約 2 日間）に 2 回発生したことが挙げられる。ところで、この地震により、多くの旧基準 RC 造建物が大きな被害を受けた¹⁾。そのため、建物の耐震性能を評価するうえで、連続巨大地震に対する旧基準 RC 造建物の地震応答性状を把握しておくことは、極めて重要なことである。

建物被害の一例²⁾として、近隣で建設されたほぼ同年代（旧基準）、同形状の 2 棟の建物において、被害の様子が大きく異なる事例がみられた（図-1 参照）。どちらの建物も 1 階にピロティを有しており、かつ壁が偏心して設置されていた。建物 A は 1 階の柱にせん断ひび割れなどの被害はみられるものの倒壊していない建物であり、建物 B は 1 階の柱が軸力保持能力を喪失して倒壊した建物である。

このような被害の相違となる理由として、道路に面する構面は建築計画上店舗としての利用が多く、そのため道路構面が長い建物 A のほうは壁量が多くなり、倒壊を免れたと述べられている²⁾。ところで、壁が偏心して配置されている建物では、地震動の入力方向により応答性状や破壊性状が異なることが既往の研究^{3),4)}において指摘されている。そのため、建物の平面的な設置角度が異なったこと（すなわち、地震動の入力方向の相違）が、このような被害の相違となった要因と予想される一方で、連続巨大地震の影響もあったことが考えられる。

以上のような背景から、本研究では、連続巨大地震を対象とした RC 造建物の耐震性能評価をめざし、その端緒として、連続巨大地震が入力方向、すなわち、建物の



図-1 2016 年熊本地震の被害の一例

設置角度に与える影響について、いくつかの建物モデルを仮定し、検討する。また、入力地震動に使用する連続巨大地震について、2016 年熊本地震で得られた観測波を基に標準的な観測波の検討を試みた。

2. 検討対象建物の概要

本研究は、4 つの建物モデルを検討対象とした。検討対象建物の略平面図および部材断面図を図-2 に、偏心率および剛性率を図-3 に、1 層せん断力係数 (C_b) を表-1 に示す。なお、1 層せん断力係数は、後述する SNAP⁵⁾ を用いて、 A_i 分布に基づく外力分布による静的漸増載荷解析の結果より、ある層の層間変形角が 1% に達したときの 1 層せん断力を用いて算定した（偏心率および剛性率は、この結果の弾性域の応力状態から算定）。

検討対象建物は、まず、文献 6) を参考に耐震壁が偏心して配置されている簡略化したピロティ付き建物（以下、「L 字壁あり」と呼ぶ）を仮定した。さらに、この建物を基に平面形状が異なる「L 字」、「一文字」および「正方形」を検討対象とした。これらの 3 棟は、純ラーメン構造である。なお、詳細は後述するが、図-2 中に示す X, Y 軸は地震動の入力方向（入力軸）を示し、X', Y' 軸は建物の構面（建物軸）を示す。図-2 のように入力軸

*1 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 環境工学専攻 建築デザインコース (学生会員)

*2 北九州市立大学 国際環境工学部 建築デザイン学科 准教授 博士(工学) (正会員)

と建物軸が同じときを基準軸位置とする。

階高は1階が3m, 2階以上が2.7mであり, 建物階数は7階建て(建物高さ19.2m)とした。スパンは6.5mとした。コンクリート強度は27.3N/mm², 鉄筋は主筋が8-D29(SD390), 帯筋およびあばら筋がD13@100(SD295)と仮定した。「L字壁あり」の耐震壁は, 厚さ150mm, 鉄筋をD13@150(ダブル)と仮定した。なお, 建物の階高やスパン, 柱や梁の構造諸元は, 4棟とも共通である。

3. 入力地震動の検討

3.1 観測波の選定概要

連続巨大地震としての入力地震動は, 防災科学技術研

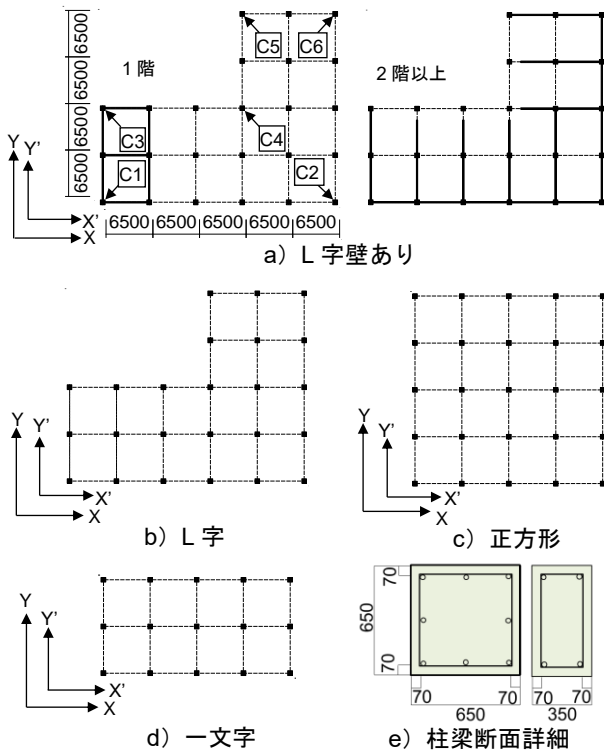


図-2 検討対象建物の略平面図および部材断面図

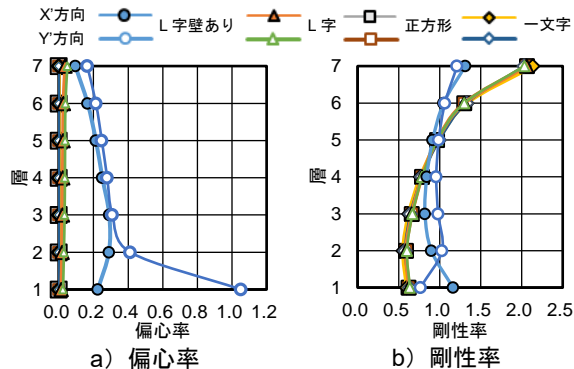


図-3 偏心率および剛性率

表-1 1層せん断力係数(C_b)

モデル	L字壁あり		L字		一文字		正方形	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
C _b	0.37	0.37	0.14	0.14	0.16	0.13	0.12	0.12

究所の強震観測網⁷⁾において2016年熊本地震で得られた益城(KMMH16)の観測波(NS波, EW波)を用いた。これは, 本震において最大加速度がもっとも大きかったこと, さらに, 詳細は後述するがスペクトル特性が概ね標準的な観測波の1つであると考えられたからである。

3.2 2016年熊本地震における九州地区内の観測波のスペクトル特性

2016年熊本地震において九州地区内(福岡県, 佐賀県, 長崎県, 熊本県, 大分県, 宮崎県, 鹿児島県)で得られた観測波⁷⁾と益城波のスペクトル特性について検討する。なお, 使用したデータは, 2016年熊本地震において, 九州地区内の観測点で十分な加速度データが得られた184カ所の観測波を用いた。

(1) 基準化応答スペクトル

一例として, 益城波の基準化加速度応答スペクトルを図-4(減衰定数5%)に示す。ここで, ピークに着目すると(これ以降, このときの基準化加速度応答スペクトルを最大加速度応答倍率, 周期をピーク周期と示す), EW波では前震に対して本震の最大加速度応答倍率がやや小さくなり, ピーク周期がやや長くなる傾向にある。ところで, 九州地区内における観測波の基準化加速度応答スペクトルは, その多くが益城波のようにある特定の周期にピークがみられる形状であった。そこで, 各観測波の基準化加速度応答スペクトルのピークに着目して, これらの特徴が他の九州地区内の観測波とどのような関係にあるか検討する。なお, ここでは, 基準化速度応答スペクトル(ピークの応答スペクトルを最大速度応答倍率, 周期をピーク周期と示す)についても検討した。

(2) 前震と本震の地震動レベルの比較

各観測点における最大加速度応答倍率の前震と本震の比較を図-5に, 最大速度応答倍率の前震と本震の比較を図-6に示す(減衰定数5%)。また, これらのピーク周期について, 一例としてEW波の前震と本震の比較をそれぞれ図-7に示す。

九州地区内における最大加速度応答倍率について, 前震に対する本震の比は, NS波が平均値1.00(0.62~3.98)であり, EW波が平均値1.00(0.59~1.95)である。九州地区内における最大加速度応答倍率は, 前震と本震ではほぼ同程度である。なお, 益城波はNS波が1.10, EW波が0.65であり, EW波では前述したように前震のほうがやや大きい値である。一方, 最大速度応答倍率について, 前震に対する本震の比は, NS波が平均値0.90(0.33~2.60)であり, EW波が平均値0.93(0.29~2.81)である。九州地区内における最大速度応答倍率は, 前震のほうが本震に比べてやや大きい傾向である。なお, 益城波ではNS波が0.90, EW波が1.25であり, EW波では本震のほうがやや大きい値である。

九州地区内におけるEW波の最大加速度応答倍率のピーク周期は、前震では約89%、本震では約83%が0.5秒以下であり、益城波も同様に0.5秒以下である（前震が0.25秒、本震が0.41秒）。一方、最大速度応答倍率のピーク周期は、前震では約40%、本震では約56%が1秒以上である。益城波では前震が0.66秒、本震が1.05秒であり、本震が1秒以上である。なお、九州地区内の最大速度応答倍率のピーク周期は、本震のほうが前震に比べて長くなる傾向にあり、益城波も同様の傾向である（前震に対する本震の比は、九州地区内が平均値3.35、益城波が1.59）。これらのピーク周期の特徴は、NS波もほぼ同様の傾向であった。

(3) 方位特性

最大加速度応答倍率および最大速度応答倍率について、NS波とEW波の比較を図-8、図-9に示す。九州地区内における最大加速度応答倍率について、EW波に対するNS波の比は、前震が平均値1.02(0.35~1.72)、本震が平均値1.01(0.54~1.54)である。九州地区内にお

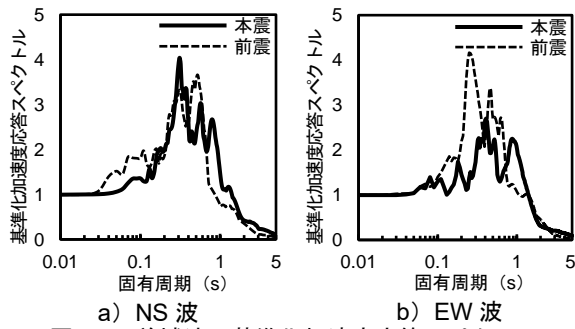


図-4 益城波の基準化加速度応答スペクトル

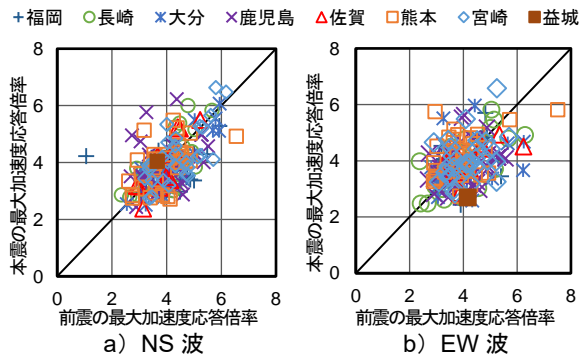


図-5 最大加速度応答倍率の前震と本震の比較

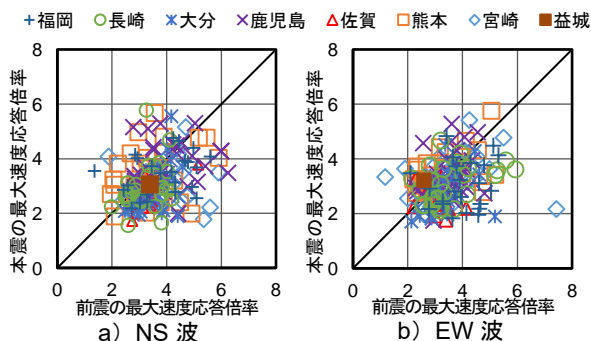


図-6 最大速度応答倍率の前震と本震の比較

ける最大加速度応答倍率は、前震および本震ともに顕著な方位特性がみられない。なお、益城波は、前震が0.88、本震が1.50であり、本震ではやや方位特性がみられる。

一方、最大速度応答倍率について、EW波に対するNS波の比は、前震が平均値1.07(0.44~2.80)、本震が平均値1.04(0.54~2.43)である。九州地区内における最大速度応答倍率は、最大加速度応答倍率と同様に、顕著な方位特性がみられない。なお、益城波では、前震が1.31、本震が0.95であり、前震ではやや方位特性がみられる。また、紙面の都合上、詳細は省略するが、九州地区内における最大加速度応答倍率および最大速度応答倍率のそれぞれのピーク周期についても顕著な方位特性はみられなかった。

4. 地震応答解析の概要

4.1 観測波の入力方法

前章におけるスペクトル特性の比較検討の結果、益城波は、巨視的にみると、九州地区内の観測波の平均的な

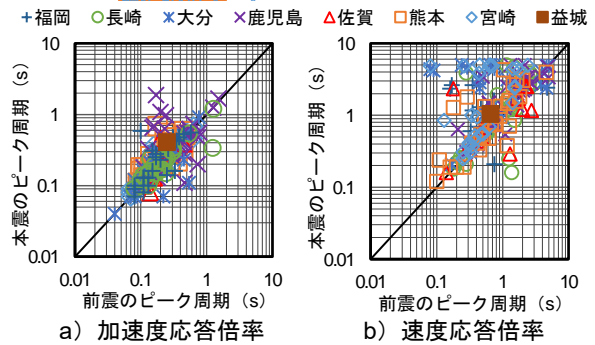


図-7 EW波におけるピーク周期の前震と本震の比較

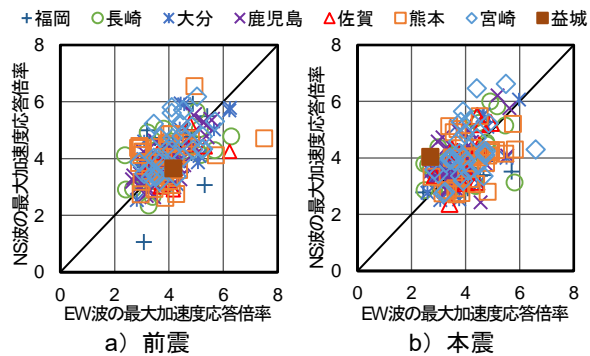


図-8 最大加速度応答倍率のNS-EW関係

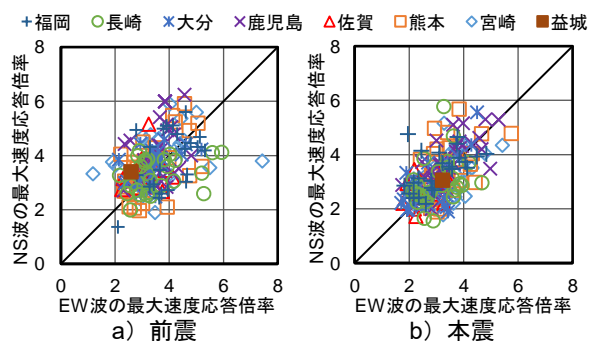


図-9 最大速度応答倍率のNS-EW関係

ものと顕著な相違がみられなかったことから、特異なものではなく、概ね標準的な観測波の1つであると考えられる。ここで、益城波の最大加速度および最大速度を表-2に、一例としてEW波の加速度波形を図-10に示す。本研究では、前震と本震を連続して使用することで連続地震（以下、「連続地震」と呼ぶ）を再現することとした。さらに「連続地震」と「本震のみ」の解析結果を比較することにより、連続巨大地震の影響を検討する。

後述の解析では、前震の最大加速度の15秒前から本震の最大加速度の15秒後までを「連続地震」として使用した。なお、「本震のみ」では、本震の最大加速度の前後15秒間を使用した。解析は、二方向同時入力とし、図-2中のX軸方向にEW波、Y軸方向にNS波を入力した。本研究では、一般的な動的耐震設計を参考として、入力地震動を地動最大速度で基準化することとした。前述のように、益城波は方位特性がややみられたものの、九州地区内における多くの観測点において、方位特性がみられなかったことから、入力地震動を各方向（NS波、EW波）とも地動最大速度50cm/sに基準化して用いた。

4.2 建物の設置角度

一例として、「L字壁あり」の設置角度の概略図を図-11に示す。対象建物の設置角度は、基準軸位置から時計周りに0~330度の範囲で、30度刻みとした。すなわち、図-2中に示した建物軸（X'、Y'軸）が時計周りに30度刻みに回転することになる。

4.3 解析モデル概要

解析は、非線形三次元骨組を用いた地震応答解析を実施した。解析ソフトは、前述したようにSNAP (ver.7)⁵⁾を使用した。減衰は、瞬間剛性比例型とし、減衰定数を3%とした。解析はP_d効果を考慮した。なお、固有値解析の結果、対象建物の固有周期は、「L字壁あり」が0.41秒、「L字」が0.70秒、「一文字」が0.72秒、「正方形」が0.70秒であった。

対象建物の柱、梁部材は、剛域を有する線材に置換した。柱部材はマルチスプリングモデルとせん断バネを用いて、梁部材は材端バネモデルとせん断バネを用いて、非線形性を考慮した。マルチスプリングモデルのコンクリート要素は、最大強度までを指数関数で表し、最大強度以降の応力低下を考慮しなかった。鉄筋要素は、バイリニア型とした。柱および梁のせん断バネはトリリニア型の原点指向型とし、梁の材端バネはトリリニア型のTakedaモデルとした。

5. 地震応答解析の結果

5.1 各層の最大層間変形角

一例として、「連続地震」における「L字壁あり」と「L字」の各層の最大層間変形角を図-12に示す。最大層間

表-2 入力地震動の最大加速度および最大速度

地震波	方位	地名	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)
前震	NS	益城(熊本)	760	73
	EW		925	93
本震	NS	益城(熊本)	653	76
	EW		1157	125

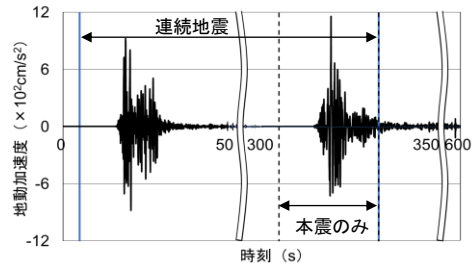


図-10 益城の観測波の加速度波形 (EW波)

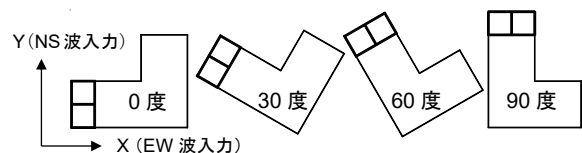


図-11 設置角度の概略図

変形角は、X、Y方向（地震軸）の水平2成分をベクトル合成して得られる時刻歴データの最大値を示している。なお、図に示す結果は、設置角度0度と60度である。

「L字壁あり」の最大層間変形角は、設置角度0度および60度ともに、1層がもっとも大きくなった。「L字」では、2層がもっとも大きくなったものの、1層もほぼ同じ値を示している。「正方形」および「一文字」では、「L字」とほぼ同様の傾向がみられた。また、すべての対象建物において、他の設置角度でも同様の傾向であった。そこで、最大層間変形角は、1層が大きくなることから、これ以降の検討では、1層のみに着目することとする。

5.2 1層の最大層間変形角と設置角度の関係

各建物における1層の最大層間変形角と設置角度の関係を図-13に示す。なお、最大層間変形角は、前述のように、水平2成分ベクトル合成の値である。以下、耐震壁が偏在しているピロティ付き「L字壁あり」とその他の建物（純ラーメン建物）に分けて結果を示す。

(1) L字壁あり

「L字壁あり」の最大層間変形角は、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べてどの設置角度においてもきわめて大きくなる（平均値1.73倍、1.33~2.18倍）。設置角度ごとに着目すると、「連続地震」において、「L字壁あり」の最大層間変形角がもっとも大きいのは設置角度330度のとき約6.27%であり、もっとも小さいのは設置角度210度のとき約3.79%である。最大層間変形角は、設置角度によって約1.65倍異なることになる。

一方、「本震のみ」において、「L字壁あり」の最大層間変形角がもっとも大きいのは設置角度270度のとき約

3.47%であり、もっとも小さいのは設置角度 210 度のとき約 1.98%である。最大層間変形角は、設置角度によって約 1.75 倍異なることになる。すなわち、「L 字壁あり」では、「連続地震」および「本震のみ」どちらも、設置角度によって最大層間変形角が大きく異なる。

(2) 純ラーメン建物 (L 字, 一文字, 正方形)

「L 字」の最大層間変形角は、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べてどの設置角度においてもやや小さくなる (平均値 0.86 倍, 0.78~0.97 倍)。これは、「連続地震」では前震時に損傷することで履歴減衰の影響が大きくなり、そのため「本震のみ」に比べて最大層間変形がやや小さくなったものと考えられる。設置角度ごとに着目すると、「連続地震」において、「L 字」の最大層間変形角がもっとも大きいのは設置角度 90 度, 270 度のとき約 2.49% (どちらも同じ) であり、もっとも小さいのは設置角度 150 度のとき約 1.84%である。最大層間変形角は、設置角度によって約 1.35 倍異なる。「連続地震」では、設置角度の影響がややみられる。

一方、「本震のみ」において、「L 字」の最大層間変形角がもっとも大きいのは設置角度 0 度のとき約 2.67%で

あり、もっとも小さいのは設置角度 210 度のとき約 2.29%である。最大層間変形角は、設置角度によって約 1.17 倍異なる程度である。「本震のみ」では、設置角度の影響が小さい。これらは、「一文字」も同様の傾向である。すなわち、設置角度による最大層間変形角の影響は、「連続地震」では、4 棟中 3 棟の対象建物にみられ、「本震のみ」では「L 字壁あり」(4 棟中 1 棟) のみにみられた。このことより、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べて、数多くの建物に対して設置角度による最大層間変形角の影響があるものと考えられる。

6. 建物のねじれ応答の影響

ところで、「L 字壁あり」は壁が偏心して設置されているため、ねじれ応答の影響が大きいものと考えられる。そこで、本章では、「L 字壁あり」について、「連続地震」がねじれ応答に与える影響について検討を行う。

6.1 隅柱の最大柱変形角

各隅柱 (図-2 参照, C1~C6 柱) の最大柱変形角と設置角度の関係を図-14 に示す。最大柱変形角は, X', Y' 方向 (建物軸) の水平 2 成分をベクトル合成して得られる時刻歴データの最大値を示している。「連続地震」において、設置角度 270 度のとき、最大柱変形角は, C1 柱が 2.7%, C6 柱が 9.9% (C1 柱に対して約 3.67 倍) である。ねじれ応答の影響を受けるため、各隅柱の最大柱変形角が大きく異なる。一方、設置角度 0 度のとき C5 柱が 4.9%, C2 柱が 6.8% (C5 柱に対して 1.39 倍) である。ねじれ応答の影響がやや大きい。「連続地震」では、設置角度によってねじれ応答の影響が異なる。

「本震のみ」において、設置角度 270 度のとき、最大柱変形角は, C1 柱が 2.5%, C6 柱が 5.2% (C1 柱に対して約 2.08 倍) である。一方、設置角度 0 度のとき, C3 柱が 2.0%, C6 柱が 4.0% (C3 柱に対して 2.00 倍) である。ねじれ応答の影響は、どちらの設置角度においても、ほぼ同じ様子である。設置角度 150 度と 330 度ではねじれ応答の影響はみられないものの、それ以外では設置角度 270 度や 0 度とほぼ同様の傾向である。すなわち、「本震のみ」では、「連続地震」に比べて、設置角度によるねじれ応答の影響はやや小さいものと考えられる。なお、設置角度 150 度のとき, C1 柱が 3.0%, C6 柱が 3.1% (C1 柱に対して 1.03 倍) であり、前述したようにねじれ応答の影響はほとんどみられなかった。

6.2 建物のねじれ応答の様子

ここで、「連続地震」および「本震のみ」における各隅柱の柱変形角の軌跡を図-15, 図-16 (設置角度 0 度, 270 度) に示す。なお、図中の柱変形角の横軸は X' 軸, 縦軸は Y' 軸 (建物軸) となる。最大層間変形角となるときの柱変形角をみると (図中◇プロット点), 建物のね

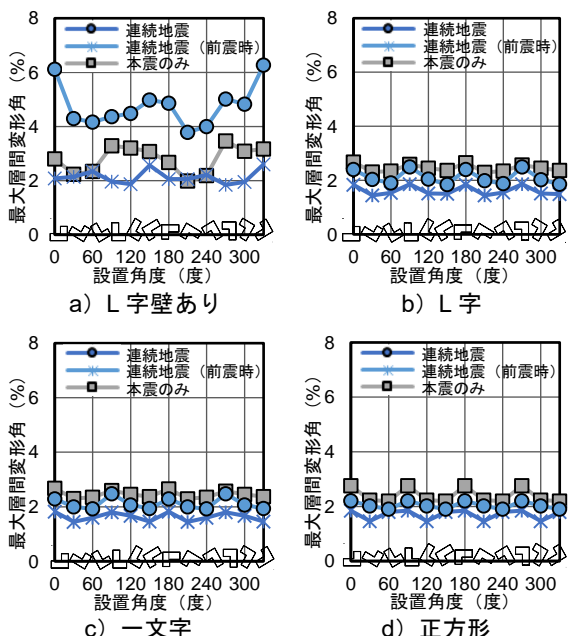
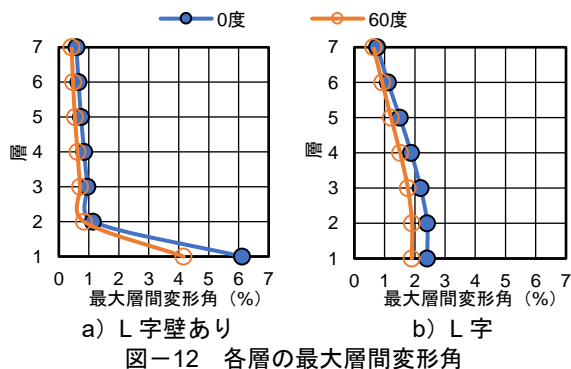


図-13 1層の最大層間変形角と設置角度の関係

じれ応答の様子（図中◇プロット点を実線でつないで建物形状を表示）は、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べて、設置角度によってやや異なっていることがわかる。

7. まとめ

限られた範囲の検討であるが、以下に得られた知見を示す。

- 1) 耐震壁が偏在するピロティ付き建物「L字壁あり」の最大層間変形角は、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べて、どの設置角度においても大きく、約 1.7 倍（平均値）となった。一方、純ラーメン建物「L字」の最大層間変形角は、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べて、どの設置角度においても小さく、約 0.86 倍（平均値）となった。これは、「連続地震」では前震時に損傷することで履歴減衰の影響が大きくなり、そのため「本震のみ」に比べて最大層間変形角が小さくなる。

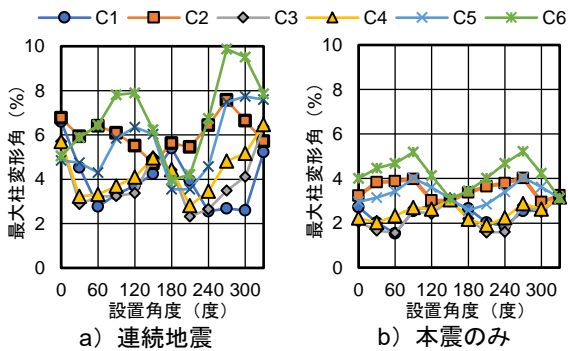


図-14 各隅柱の最大柱変形角と設置角度の関係

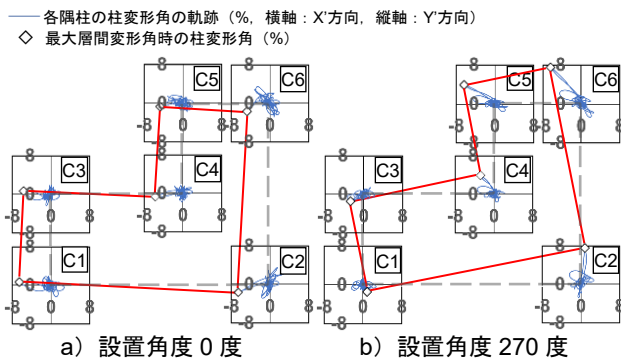


図-15 連続地震における各隅柱の柱変形角の軌跡

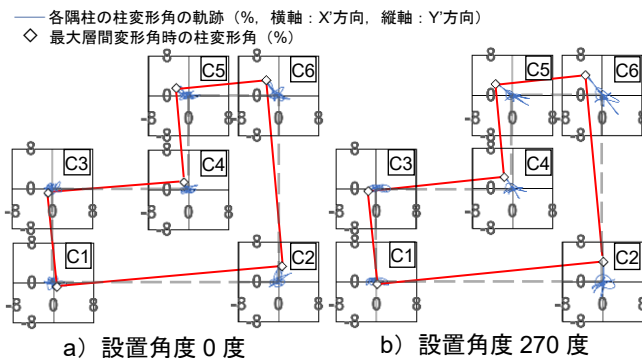


図-16 本震のみにおける各隅柱の柱変形角の軌跡

った。

- 2) 「L字壁あり」において、「連続地震」のほうが「本震のみ」に比べて、設置角度によるねじれ応答の影響がやや大きかった。
- 3) 設置角度による最大層間変形角の影響は、「連続地震」では 4 棟中 3 棟の対象建物にみられ、「本震のみ」では「L字壁あり」（4 棟中 1 棟、ピロティ付き建物）のみにみられた。「連続地震」は、「本震のみ」に比べて、数多くの建物に対して設置角度による最大層間変形角の影響がある。
- 4) 益城波は、2016 年熊本地震で得られた観測波において、スペクトル特性から標準的な観測波の 1 つとして考えられる。

謝辞

本論における 2016 年熊本地震に関連する強震記録は、防災科学技術研究所の強震観測網⁷⁾のデータを使用させていただきました。また、本研究の解析では、北九州市立大学大学院 修士課程 若林哲平君（当時）、北九州市立大学 学部 4 年 田部颯也君（当時）にご助力を得た。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2016 年熊本地震災害調査報告，2018.6.
- 2) 日本コンクリート工学会：熊本地震に関する特別委員会報告書，2018.9.
- 3) 周義敦，世良耕作，西川孝夫：偏心を有する建築物に対する 2 成分地震動同時入力方向に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，構造 I，pp.793-794，1991.9.
- 4) 白井和貴，壁谷澤寿一，勝俣英雄，壁谷澤 寿海，関松太郎：鉄筋コンクリート造 4 層壁フレーム模型の多方向入力振動台実験（その 2 実験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.409-410，2005.5.
- 5) 株式会社構造システム：任意形状立体フレーム弾塑性解析プログラム SNAP (ver.7) テクニカルマニュアル，2015.11.
- 6) 島津勝，田中佑季，林美貴：平成 28 年熊本地震によるピロティ形式 RC 造建物の被害調査と解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1033-1038，2018.7.
- 7) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004