

### 第3章 長周期地震動による被害に関する文献・資料調査

長周期地震動による被害としては、屋外貯蔵タンクのスロッシングによる被害や高層建物のエレベータのケーブル被害などが知られている。ここでは、既往文献に基づいて、国内における長周期地震動による主な被害について整理する。

#### 3.1 長周期地震動による国内の主な被害

##### 3.1.1 長周期地震動による被害

長周期地震動の被害は、屋外貯蔵タンク、超高層建物、免震構造物、および長大橋などの長周期構造物が出来たことにより生じている。座間(1993, 2009, 2014)は、主に屋外貯蔵タンクのスロッシングによる国内外の被害事例についてまとめている。また、太田・座間(2005)<sup>31)</sup>では、屋外貯蔵タンクの被害に加えて、高層建物のエレベータのケーブル被害や揺れによる什器転倒被害についても述べられている。気象庁(2012)<sup>32)</sup>では、1980年以降の地震による長大構造物における主な被害がまとめられている。これらの記載をもとに、国内における長周期地震動による主な被害事例を表3.1-1に示す。

##### 3.1.2 屋外貯蔵タンクの被害事例

屋外貯蔵タンクの被害が生じた地震と地域としては、1923年関東地震(横須賀市)、1964年新潟地震(新潟市等)、1983年日本海中部地震(秋田市、新潟市、苫小牧市等)、1993年北海道南西沖地震(秋田市、新潟市等)、2003年十勝沖地震(苫小牧市ほか道内各地)、2004年9月5日の紀伊半島南東沖の地震(大阪市、市原市等)、2004年9月5日の東海道沖の地震(大阪市、市原市等)、および2011年東北地方太平洋沖地震(北海道、秋田、宮城、福島、山形、新潟、茨城、千葉、東京、神奈川の10都道県)がある。

##### 3.1.3 高層建物のエレベータの被害事例

高層建物のエレベータ被害が生じた地震と地域としては、1983年日本海中部地震(東京・新宿)、1984年長野県西部地震(東京・新宿)、2003年十勝沖地震(札幌市等)、2004年新潟県中越地震(都内)、および2011年東北地方太平洋沖地震(東日本から西日本の広い範囲)がある。

##### 3.1.4 高層建物の揺れによる什器転倒の被害事例

高層建物の揺れによる什器転倒の被害が生じた地震と地域としては、1995年兵庫県南部地震(大阪市等)、2000年鳥取県西部地震(神戸市、大阪市等)、2004年9月5日の紀伊半島南東沖の地震(大阪市等)、2004年9月5日の東海道沖の地震(大阪市等)、および2011年東北地方太平洋沖地震(東日本から西日本の広い範囲)がある。

表 3.1-1 国内の長周期地震動による主な被害

地震名	地震諸元		主な被害
	地震規模	震源深さ	
1923 年関東地震	M 7.9 (Mw は未公表)	—	・「横須賀軍港箱崎山の山腹造成地にあった総貯蔵量約 10 万 t の重油タンク群が壊滅的な打撃を受けた。このうち、容量 6,000t の満液タンクでは屋根板を突き破って、油が間欠的に溢流したといわれ、その際発火・炎上・爆発に至ったと報告されている。」(座間(2014))
1964 年新潟地震	Mj 7.5 (Mw は未公表)	40km	・「製油所内の 3 万 kl 浮屋根式タンクがスロッシングを起こし、浮屋根が 3～4 回大きく揺れはね上がったとき、タンク側板を越えて溢流した原油に着火したことが目撃された。このタンク火災は隣接のタンクを巻き込み約半月間燃え続けた。」(座間(2014))
1983 年日本海中部地震	Mj 7.7 (Mw は未公表)	14km	・「この地震で震源に近い秋田のみならず、遠く離れた新潟、苫小牧で石油タンクに被害が認められた。スロッシングについては多数のタンクで貯液の揺動の痕跡、溢流、浮屋根と付属設備に損傷が認められている。」(座間(2014)) ・震央距離約 500km の東京の新宿において、1 棟の超高層建物のエレベータケーブルが切断された事故が発生(座間(1993))。
1984 年長野県西部地震	Mj 6.8 (Mw は未公表)	2km	・1933 年日本海中部地震と同様のエレベータ被害が新宿の何棟かの超高層建物でみられた(座間(1993))。
1993 年北海道南西沖地震	Mj 7.8 Mw 7.7	35km	・石油タンクのスロッシング(秋田市、新潟市等)(太田・座間(2005))
1995 年兵庫県南部地震	Mj 7.3 Mw 6.9	16km	・高層建物の揺れによる什器転倒等(大阪市等)(太田・座間(2005))

表 3.1-1 国内の長周期地震動による主な被害(つづき)

地震名	地震諸元		主な被害
	地震規模	震源深さ	
2000年鳥取県西部地震	Mj 7.3 Mw 6.8	9km	・高層建物のエレベータ停止(神戸市、大阪市等)(太田・座間(2005))
2003年十勝沖地震	Mj 8.0 Mw 8.0	45km	・北海道内各地の数多くの大型石油タンクに被害が発生した。特に、苫小牧市周辺での被害は深刻で、屋外貯蔵タンクの58%にあたる170基で何らかの被害を受けた(畑山ほか(2004))。 ・高層建物の揺れによるエレベータワイヤーロープ損傷等(札幌市等)(気象庁(2012))
2004年9月5日の紀伊半島南東沖の地震	Mj 7.1 Mw 7.3	38km	・石油タンクのスロッシング(大阪市、市原市等)(畑山・座間(2005) <sup>33)</sup> )
2004年9月5日の東海道沖の地震	Mj 7.4 Mw 7.5	44km	・高層建物の揺れによる什器転倒等(大阪市等)(気象庁(2012))
2004年新潟県中越地震	Mj 6.8 Mw 6.7	12km	・都内の超高層建物のエレベータのメインケーブルが大きく揺れ損傷した(藤田(2006) <sup>34)</sup> )。
2011年東北地方太平洋沖地震	Mw 9.0	24km	・長周期地震動によるスロッシング被害は、北海道、秋田、宮城、福島、山形、新潟、茨城、千葉、東京、神奈川の10都道県の64基で生じている(座間ほか(2013) <sup>35)</sup> )。 ・高層建物内での揺れによるエレベータワイヤーロープの損傷や什器転倒等(東日本から西日本の広い範囲)(気象庁(2012))。 ・東京湾岸部などにおいて超高層集合住宅の被害あり(肥田ほか(2012))。

### 3.2 過去の長周期地震動による超高層建物の被害状況

#### 3.2.1 1984年長野県西部地震による被害事例について

1984年長野県西部地震においては、新宿のいくつかの超高層建物でエレベータのケーブルが切断される事故が発生している。東京の震度は3であったが、制御用の震度計は作動しなかった(太田・座間(2005))。超高層建物における地震計による変位軌跡を図3.2-1に示す。同図中(a)は、記録開始後41~61秒の変位軌跡、(b)は72~88秒の軌跡である。地下室の変位が点線で、屋上での変位が実線で示されており、最大応答のときはほぼ8倍に増幅されている。揺れの周期は約5秒、楕円形の最大片振幅は16.5cmである(太田・座間(2005))。図3.2-1(a)の1方向の最大片振幅は15.5cmであるが、ベクトル合成値の最大値を図から読み取ると16.5cmとなる。

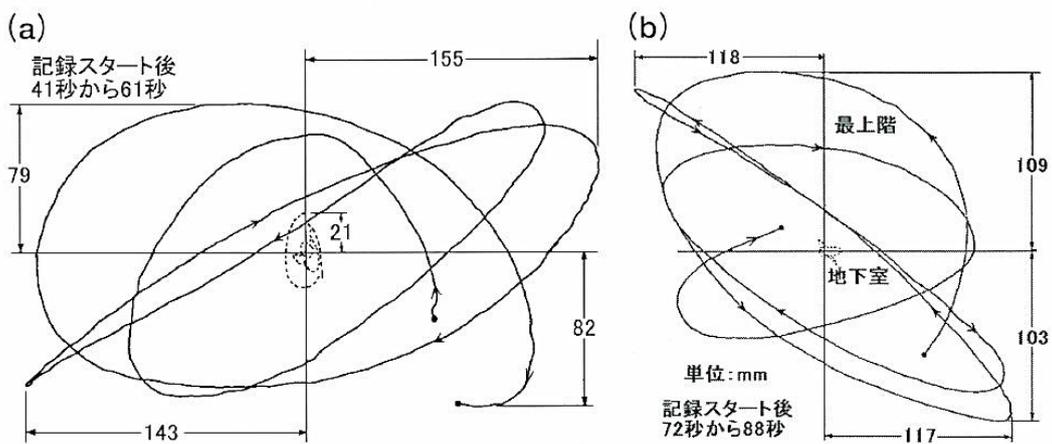


図 9.1 1984年長野県西部地震における超高層ビルの変位軌跡<sup>9.1)</sup>

(a) 記録開始後 41 ~ 61 秒

(b) 記録開始後 72 ~ 88 秒

図 3.2-1 1984年長野県西部地震における超高層ビルの変位軌跡  
(太田・座間(2005)図 9.1(村松(1989)<sup>36)</sup>より引用して加筆したもの)より)

この地震における長野県飯田市から千葉県銚子市までの気象庁 1 倍強震計の変位波形を震央距離の順に並べたものを図 3.2-2 に示す。変位波形は、関東平野の熊谷市と東京で振幅が急に大きくなっている。東京の最大片振幅は約 1.9cm、周期は 7.2 秒であり、図 3.2-1 に示した新宿の超高層建物の地階の最大片振幅 2.1cm と近い値となっている。このように、震度が 3 程度であっても、超高層建物に長周期地震動が作用することにより大きな揺れが生じ、エレベーターケーブル切断という被害が生じている(太田・座間(2005))。

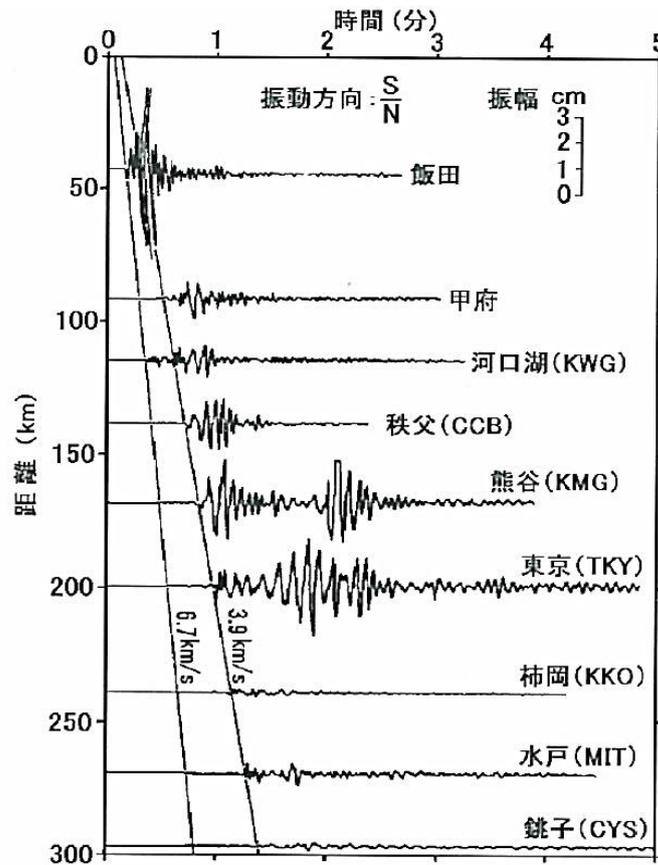


図 3.2-2 1984 年長野県西部地震における気象庁 1 倍強震計の走時ダイアグラム  
(太田・座間(2005)図 9.2(瀬尾(1986)<sup>37</sup>)より引用して加筆したもの) より)

### 3.2.2 2011年東北地方太平洋沖地震による被害事例について

#### (1) 気象庁の聞き取り調査

気象庁は、2011年東北地方太平洋沖地震の際の東京都内における高層ビルの揺れの実態に関する聞き取り調査を行っている(気象庁(2011)<sup>38)</sup>。

対象建築物は、東京都内の軒高60m以上のオフィスビル34棟であり、調査は、地震時の在館者(各ビル数名程度以内)を対象に面談方式で行っている。高さ(軒高)別内訳は、60～100mが4棟、100～150mが13棟、150m以上が17棟である。

#### 1) 調査の意義

既往地震の経験から、0～50cm/sの速度応答では高層建物における室内被害はほとんど発生しないとされている。一方で、実験やシミュレーションにより、150cm/s以上の速度応答では高層建物において大きな室内被害が発生するとされている。

50～150cm/sの速度応答と被害の関係は不明であったが、2011年東北地方太平洋沖地震では、周期1秒～7秒において、東京都内で50～100cm/sの速度応答が観測されている。そこで、50～150cm/sの速度応答と被害の関係を把握するために聞き取り調査を実施している。

#### 2) 調査の結果

調査結果の概要を以下に示す。

- ・ 東京都内では、調査した範囲では、構造躯体に被害は発生していない。
- ・ 天井材については、約半数のビルで何らかの変形・損傷が生じている。
- ・ 内装材の破損については、多くのビルで、特に非常階段の内装材にひび割れ、塗装の剥離など軽微な損傷が生じている。
- ・ エレベータについては、すべてのビルでエレベータが全台停止し、閉じ込めがあったビルは1棟、エレベータロープの絡まりや破損は4棟で認められている。
- ・ 什器の転倒については、大多数のビルで生じておらず、什器の転倒はすべて固定しないもので発生している。転倒が生じなかった理由として、以下のような点が挙げられている。
  - i) 消防署の指導を受け、特に高層階に対しては耐震固定の徹底を呼びかけている。
  - ii) 什器は作り込みになっており、転倒は生じない。
  - iii) 液晶テレビの普及により壁固定型が多く、置き方が不安定でなかった。
- ・ コピー機の移動については、大多数のビルでは移動は生じておらず、コピー機の移動はすべて固定していないもので発生している。
- ・ スライド式書架の移動については大多数のビルでは認められなかったが、一部、大きく左右に動くことによって破損を生じたものがあった。

## (2) 肥田ほか(2012)による超高層集合住宅の居住者へのアンケート調査

肥田ほか(2012)は、関東、関西地域に建設されている24階建以上のRC系の超高層集合住宅のうち、強震観測が行われている建物を含む15棟の居住者を対象にアンケート調査を実施し、2011年東北地方太平洋沖地震における居住者の行動難度や揺れの感じ方、被害状況について調べている。

対象とした建物の一覧を表3.2-1に示す。対象建物は関東地域で9棟、関西地域で6棟であり、すべて24階建以上のRC系(RC造、SRC造、CFT造(コンクリート充填鋼管構造))の超高層集合住宅で賃貸物件である。いずれも関東平野、大阪平野内に位置し、本震時の長周期地震動の影響を受けているものと考えられる。各建物には最上階、中間階付近および最下階に強震計が設置されており、強震計設置階付近の連続した5層分の住戸を対象にアンケート用紙を配布している。これらの住戸をそれぞれ高層、中層および低層と呼んでいる。有効回答数は516であり、本震時に部屋にいた割合はほぼ半数である。

表 3.2-1 検討対象建物一覧(肥田ほか(2012)表1より)

地域	名称	階数	構造	地域	名称	階数	構造
関東	A	30	RC	関東	I	41	RC
関東	B	25	RC	関西	J	33	RC
関東	C	30	RC	関西	K	36	RC
関東	D	24	RC	関西	L	25	SRC
関東	E	32	RC	関西	M	43	RC
関東	F	33	RC	関西	N	40	S, CFT
関東	G	28	RC	関西	O	31	RC
関東	H	24	RC				

建物や家財の被害に関するアンケート結果を図 3.2-3 に示す。関東地域の高層部におけるタンス、冷蔵庫、食器棚等の状態を(a)に、食器、本、テーブル上の小物等の状況を(b)に示す。家具等の移動に関する被害状況は、小物等の被害状況と同様の傾向となっている。千葉県沿岸部に位置する建物 G および内陸部の建物 H では、家具や小物等の移動・散乱が極めて多くなっている。

低層部における室内の壁紙等の亀裂に関する回答結果を(c)に、柱や壁、梁などのコンクリート部分の亀裂に関する回答結果を(d)に示す。東京沿岸部の建物 E では内装材とコンクリートの被害が多い。また、建物 G でも内装材とコンクリート部分の亀裂が極めて多くなっている。この建物は激しい液状化被害が生じた地域に位置しており、長周期の振動によって建物の揺れが大きくなった可能性が示唆されると肥田ほか(2012)は述べている。建物 B および F は、高層部で家具や小物等の移動・散乱が比較的多かったのに対し、低層部の内装材やコンクリート部分の亀裂は少ない。このように、建物建設位置、規模等によって揺れや被害の傾向は異なるため、より細かい分析が必要となることが指摘されている。

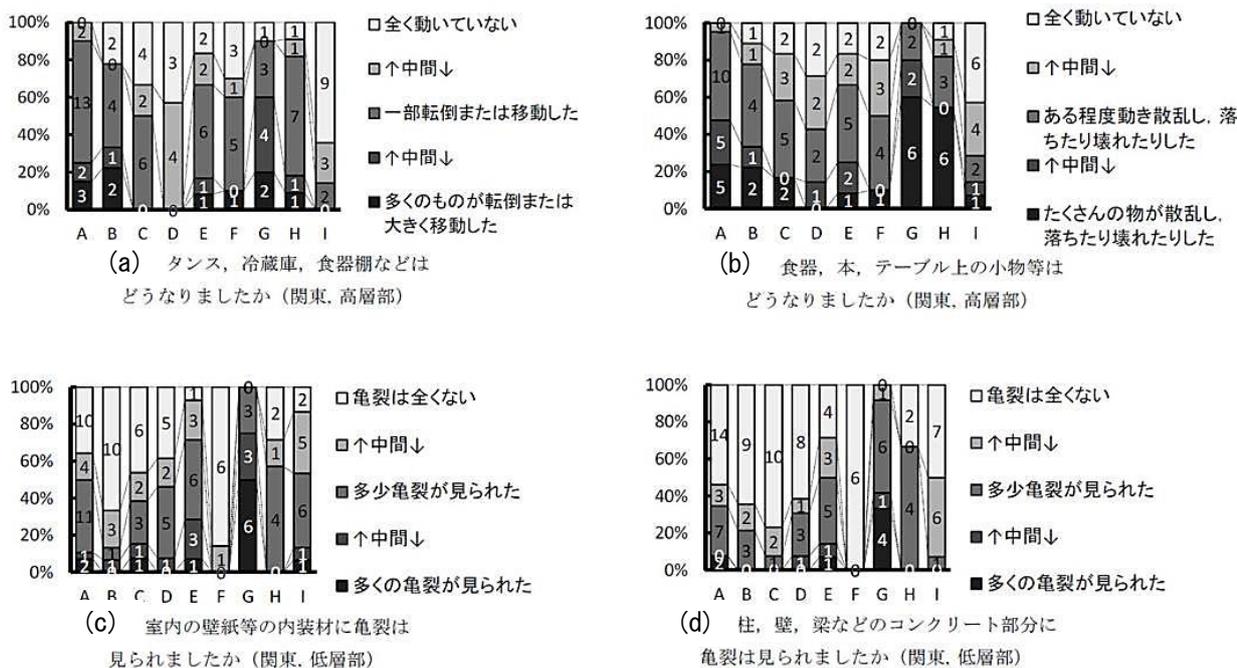


図 3.2-3 関東における超高層集合住宅のアンケート調査結果 (肥田ほか(2012)図 21-14 より)

### (3) 山根ほか(2014)<sup>39)</sup>による超高層集合住宅の室内被害の分析

山根ほか(2014)は、首都圏に建つ超高層集合住宅 9 棟(いずれも 24 階建以上であり、RC 造の耐震構造)を対象とし、2011 年東北地方太平洋沖地震時に記録された小規模工事等受付台帳や災害状況報告書等を調査し、内装材や非構造部材等の被害の高さ分布について検討を行っている。また、最上階と最下階の強震記録とモード形状に基づいて最大層間変形角の高さ分布を簡易予測し、シミュレーション解析が行われている建物と併せて最大層間変形角と室内被害との対応関係について整理分析している。

山根ほか(2014)による最大層間変形角の簡易予測手法の概略手順を以下に示す。

- i) 最上階と地下 1 階の強震記録から相対加速度と伝達関数を求める。伝達関数とは、各振動数における建物の応答倍率を示すものであり、強震記録のフーリエスペクトルの比(最上階/地下 1 階)を求めることにより得られる。
- ii) 伝達関数から 1 次の固有振動数を読み取り、バンドパスフィルターを用いて 1 次に対応する相対加速度波形を求める。1 次だけを取り出している理由は、2011 年東北地方太平洋沖地震では、2~3 次モードの影響が少ないことが確認されているためである。バンドパスフィルターは、ある帯域の振動数成分を取り出すためのフィルターである。
- iii) ii) で求めた相対加速度波形と、設計モデルから得られる 1 次のモード形状を掛け合わせて、各階の相対加速度波形を求める。
- iv) 相対加速度波形を 2 回積分して各階の変位応答を求め、さらに下の階に対する相対変位応答の最大値を階高で除して最大層間変形角を求める。
- v) 上記の簡易予測手法による最大層間変形角はシミュレーション解析から得られた目標値に比べて低層階で小さく、高層階で大きく評価される傾向にあるため、最大層間変形角の高さ分布を係数  $\alpha$  により補正する。

$$\alpha(h) = 1.3 \cos\left(\frac{h\pi}{2.5}\right)$$

ここに、 $h$  は基準化階であり、階番号を地上階数で除したものである。

上記の補正係数は、表 3.2-1 の建物 A (RC 造、30 階建)の NS 方向に対するシミュレーション解析から提案されている。また、建物 G に本手法を適用して相対加速度波形を概ね良好に評価できることを確認している。

これらの整理分析の結果として、主に以下の知見が得られている。

- i) 主な建物内部被害は、壁紙等の内装材破損や ALC 壁等の非構造部材の破損、扉やサッシの開閉不良、タイル材の破損の 4 つが多い。
- ii) 内装材破損の被害件数が最も多く、タイル材の被害は少なかった。建物の内部被害の高さ方向の分布は低層から中層にかけて多く発生しており、高層では被害が少なかった。内装材の亀裂に関するアンケート調査からも同様の傾向が見られた。
- iii) 2011 年東北地方太平洋沖地震では、建物の 1 次モードに比べ高次モードの影響は小さかった。また、同地震時における建物の非線形性の影響により、下層階で層間変形が大きくなる傾向を示した。
- iv) 内装材の破壊については、最大層間変形角  $5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  以降で被害が多くなる傾向が見られた。いずれの被害も、最大層間変形角が大きくなるほど多くなる傾向にあり、これは内装材の亀裂に関するアンケート結果とも対応した。

#### (4) 超高層建物の被害事例

2011 年東北地方太平洋沖地震においては、超高層建物の東京都庁本庁舎、工学院大学、および咲洲庁舎でも被害が生じており、被害状況や地震観測記録が公表されている。各建物の基本情報を表 3.2-2 に示す。各建物の被害状況を以下に示す。

表 3.2-2 建物の基本情報

建設地	建物名	構造	階数
東京都新宿区	東京都庁第一本庁舎	S(SRC)	48
東京都新宿区	東京都庁第二本庁舎	S	34
東京都新宿区	工学院大学新宿校舎高層棟	S	29
大阪府大阪市	咲洲庁舎	S	52

##### 1) 東京都庁第一本庁舎

東京都財務局(2011)<sup>40)</sup>から公表されている被害状況を以下に示す。

- ・漏水(第一本庁舎北側機械室内冷水系熱交換器)
- ・エレベータ(地震感知後に全基が一時停止・安全が確認されたものから順次復旧)
- ・天井ボードや壁パネルの脱落、防火戸の破損(業務への影響なし)

##### 2) 東京都庁第二本庁舎

東京都財務局(2011)から公表されている被害状況を以下に示す。

- ・漏水(第二本庁舎 33 階体育室スプリンクラー)
- ・エレベータ(地震感知後に全基が一時停止・安全が確認されたものから順次復旧)
- ・天井ボードや壁パネルの脱落、防火戸の破損(業務への影響なし)

##### 3) 工学院大学新宿校舎高層棟

久保ほか(2012)<sup>41)</sup>による被害状況を以下に示す。

- ・エキスパンションジョイント(高層階と中層階の接続部)カバーの脱落や移動
- ・システム天井材の落下(14, 21, 27, 28 階)
- ・システム天井材のたわみ(14, 16, 19, 20, 23, 24, 26, 28 階)
- ・本棚の影響による間仕切り壁の変形(24 階)
- ・固定されていない棚の転倒(16, 20, 24 階)
- ・コピー機の移動(12, 17, 19, 25 階)
- ・キャスター付きのオフィス什器の移動(21 階)
- ・移動棚の移動(25 階)
- ・テレビの落下と破損(28 階)
- ・エレベータケーブルの絡み(復旧まで 3 週間)

#### 4) 咲洲庁舎

大阪府総務部(2011)<sup>42)</sup>から公表されている建物の揺れの大きさと被害状況を表 3.2-3, 4 に示す。また、被害状況を以下に箇条書きにして示す。

- ・中央廊下の防火戸のゆがみ(49 か所)
- ・消火栓上部鉄板のへこみ(33 か所)
- ・事務所・テナントの天井の落下・床の浮き(59 か所)
- ・階段室の壁面ボードのゆがみ・亀裂・落下(72 か所)
- ・階段室床面の浮き・亀裂・はがれ(8 か所)
- ・中央廊下・居室内の壁面ボード亀裂・パネル落下(110 か所)
- ・電気室吹き付け材の落下(4 か所)
- ・トイレ洗面台の排水トラップの損傷(25 か所)
- ・エレベータ停止・閉じ込め(全 32 基が停止。うち 25 基は地震時管制運転装置が正常に作動したが、4 基でロープの絡まりによる閉じ込め事象が発生。)

表 3.2-3 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に咲洲庁舎で  
観測された建物の揺れ(大阪府総務部(2011)より)

【観測された建物の揺れ】(本震時のデータ：3月11日14時49分頃到達)

		最上階(52階)	中間階(18階)
最大振幅(片側)	短辺方向	137cm	30cm
	長辺方向	86cm	32cm
最大加速度	短辺方向	131ガル	41ガル
	長辺方向	88ガル	39ガル

- ・ガル：加速度を表す単位(1ガル=1cm/s/s)。地震の揺れの強さを示すのに用いられる。

表 3.2-4 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の咲洲庁舎における  
内装・設備等の被害状況(大阪府総務部(2011)より)

【内装・設備等の被害状況】

- 内装材・防火戸等の損傷(合計360か所)

中央廊下の防火戸のゆがみ	49か所
消火栓上部鉄板のへこみ	33か所
事務所・テナントの天井の落下・床の浮き	59か所
階段室の壁面ボードのゆがみ・亀裂・落下	72か所
階段室床面の浮き・亀裂・はがれ	8か所
中央廊下・居室内の壁面ボード亀裂・パネル落下	110か所
電気室吹付材の落下	4か所
トイレ洗面台の排水トラップ(ジョイント部分)の損傷・その他	25か所

- エレベータの停止・閉じ込め
  - ・全32基が停止。うち25基は地震時管制運転装置が正常に作動したが、4基でロープの絡まりによる閉じ込め事象が発生。

(5) 日本建築学会による超高層建物の被害の整理

日本建築学会(2013)<sup>43)</sup>では、2011年東北地方太平洋沖地震において地震観測が実施されていた建物に関する文献を調査し、観測された最大応答加速度と被害状況との関係を整理している。その内容については本書(地震保険研究31)の冊子版に掲載した。

(6) 高層住宅管理業協会のアンケート調査によるマンションの被災状況

高層住宅管理業協会\*では、会員が東北・関東で受託するマンションを対象として、被災状況についてのアンケート調査を実施している(高層住宅管理業協会(2011)<sup>44)</sup>)。東北6県と関東1都6県におけるマンションの管理棟数と被災状況別の棟数と全体棟数に対する割合を表3.2-6に示す。また、20階建以上の超高層住宅に対する結果も併せて示している。

20階建以上の超高層住宅では大破と中破の被害は生じていないが、小破と軽微の被害割合は全体に対するものよりも高くなっており、超高層住宅が20階未満の住宅に比べて、小破と軽微の被害を多く受けていることを示している。

\*2013年4月にマンション管理業協会へ名称変更

表 3.2-6 2011年東北地方太平洋沖地震における東北・関東地方のマンションの被災状況

建物の分類	地域	管理棟数	建物被害				
			大破	中破	小破	軽微	被害無し
全体	東北6県	1,642	0	26	283	1,024	309
	関東1都6県	44,723	0	18	901	6,453	37,351
	合計	46,365	0	44	1,184	7,477	37,660
			0.00%	0.09%	2.55%	16.13%	81.23%
超高層住宅 <20階建以上>	東北6県	15	0	0	0	15	0
	関東1都6県	488	0	0	39	197	252
	合計	503	0	0	39	212	252
			0.00%	0.00%	7.75%	42.15%	50.10%
	(免震・制震装置 設置建物)	(102)	(0)	(0)	(1)	(48)	(53)

%表示の数値は、管理棟数の合計に対する各被害を受けた棟数の割合を示している。