

[建築機能]

阪神・淡路大震災における建築設備の被害分析

—建築設備の被害分析と今後の耐震対策—

平山昌宏

(本社 設計本部設計技術部)

灰谷義行

(本社 建築生産本部設備計画部)

伊藤剛

(本社 建築生産本部設備計画部)

概 要

建築設備は各種機能を有し、いろいろな形状や重量を持つ機器を建物の各所に配置し、配管類で結ぶことで、単純なシステムから複雑なシステムまで様々なシステムを構成している。このため、地震による機器・資材の被害は各種各様であり、その被害が及ぼす影響も一律ではない。この報告では建築設備ごとの被害をより正しく認識するため、統計処理によって相対的な被害傾向を把握するとともに、個々の被害が及ぼす影響度を考察した。また、特徴的な被害事例について要因分析を行い、現行の耐震基準の有効性だけでなく問題点についても考察した。今後の対策については、調査分析に基づいて有効な手段と考えられるものを示した。

1. はじめに

今回の震災により建築設備に様々な被害が見られたが、これらは今後の耐震設計・施工や既存建築物の耐震診断の貴重な教訓として活かされなければならない。しかし、限られた建築コストの中では、これらのすべてを満足する対策が取れない場合もある。このため、個々の被害を分析し、被害率の高い事例、その影響度が高い事例を明確にし、さらに被害の要因を分析し、今後の耐震対策として活かすことが重要な課題である。

2. 建築設備被害分析表

2.1 作成基準

建築設備の被害を分析するに当たり、次の基準で統計処理や考察を行った。

2.1.1 相対的な被害傾向 被害調査を行った建築物の設備機器総数を調査できなかったため、機器総数に対する被害機器数という被害率が把握できなかった。そこで、建築物単位に機器被害の有無を調査し、被害調査を行った建築物に対する被害のあった建築物という相対的な被害傾向としてとらえたが、その統計処理方法は次のとおりである。

(1) 調査分母 神戸市内の応急復旧作業に従事した設備係職員へのアンケート調査で得た104物件の建築物、さらに神戸市中央区を中心とした被害詳細調査で得た19物件の建築物の被害状況を母数とした。

なお、被害の傾向が把握できなかった項目については、諸団体の資料を引用させていただいた。

(2) 被害の程度 被害状況を重要な被害と軽微な被害に分類して集計したが、その基準は次のとおりである。

1) 重大な被害とは、使用不能になり補修や改修が必要であったと思われるもの。

2) 軽微な被害とは、点検または簡単な補修で使用可能になったと思われるもの。

また、照明器具など複数ある機器では、原則として1台でも被害があると、被害のあった建築物としてカウントを行い、複数の被害が見られた場合は重大な被害のみをカウントした。このため、これらの機器の被害表現は大きくなる集計方法である。

(3) 調査分母の傾向 応急復旧作業を行った建築物が対象のため、再使用が不可能と判定された建築物と、建築設備の応急復旧調査を必要としない軽微な被害の建築物は含まれていない。

なお、前回の報告書(1995年3月発行)では「新耐震設計法/1981年施行」以降に設計・施工した建築物の設備は被害が少ないと報告した。今回の調査分母から大半を占める新耐震基準以前の建築物を除外し、新耐震基準以降の建築物に限定すると、機器ごとの相対的な被害傾向が見えなくなるため、新旧合わせた建築物を対象としている。

このため、被害が比較的大きい建築物、大きく言えば「建築設備耐震設計・施工指針¹⁾」(以下「耐震指針」という)に準じた設計・施工が行われていない建築物での被害傾向と考える。また、スプリンクラーなどの特殊設備はそれを有する建築物の件数が少なく、統計誤差があると思える。

2.1.2 特徴的な被害事例 被害の割合が高い事例ではなく、重大な被害や機器類の特性が見られる事例を示した。ただし、調査分母の建築物以外の被害事例も取り上げている。

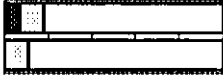
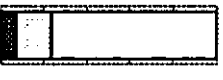

Table 1 建築設備被害分析表(1)
Table the Damage Analysis for Mechanical and Electrical Equipments

機器・部位	相対的な被害傾向 ■重大 □軽微 □無し	特徴的な被害事例	想定される影響度			備考	
			人命の危険	資産の損失	機能の停止		
【防災設備】							
発電機		・起動盤の移動、傾き	●		●		
		・冷却水配管等の破損 ・消音器の脱落	●		●		
蓄電池	-	・蓄電池盤の移動 ・セルの破損	●		●		
スプリンクラ		・ヘッド、巻出し管の破損	●	●	●	<要因分析事例1参照>	
		・巻出し管の継手部の緩み	●	●	●		
消火用補給水槽	-	・置き式基礎ごとの移動	●		●	形状が小さく鋼鉄製の水槽は、本体の被害がない	
消火栓箱	-	・埋込箱の変形				扉開閉が可能な事例が多い	
消火ポンベ	-	・転倒	●		●	固定強度不足	
【衛生設備】							
高架水槽		・移動、転倒	●	●	●	<要因分析事例2参照>	
		・天板、側板パネルの破損		●	●		
		・水槽接続部の配管破損			●		変位吸収対策の不足
受水槽		・移動、転倒	●	●	●		
		・天板、側板パネルの破損		●	●		
		・水槽接続部の配管破損			●		<要因分析事例3参照>
		・屋外設置の水槽のはり形基礎の傾き			●		地盤不等沈下による傾き
貯湯槽	-	・縦長形タンクの移動、転倒	●	●	●	頂部支持のない住宅用貯湯槽に多い	
		・横置き形タンクが架台からの脱落	●	●	●	タンクと架台の溶接、膨張対策用バンドの無い構造であった	
ポンプ類	-	・防振架台の吸振体のはずれ			●	ズレ止めボルトの遊びが大きい	
厨房器具(ガス設備)	-	・ガス台などの移動、転倒	●	●	●	耐震固定がない	
衛生器具	-	・陶器の割れ、脱落			●	他の物の衝突、固定の緩みによる揺れで、脱落	
【電気設備】							
受変電機器(キュービクル)		・移動、転倒	●		●	被害の80%が屋上設置	
		・変圧器の地絡			●	変圧器の揺れによる二次側端子と周辺金属物の接触	
変圧器(オープン式電気室)		・移動、転倒			●	固定のない変圧器の被害が多い	
		・オープンフレームの変形、崩壊			●	地下階電気室では浸水の被害もあった	
分電盤		・傾き、変形			●		

Table 1 建築設備被害分析表 (2)
Table the Damage Analysis for Mechanical and Electrical Equipments

機器・部位	相対的な被害傾向 ■重大 □軽微 □無し	特徴的な被害事例	想定される影響度			備考
			人命の危険	資産の損失	機能の停止	
照明器具		・脱落、落下 ・吊り下げ器具の破損 ・位置ズレ	●	□	●	ダウンライトが脱落する被害が多い その他、外灯ボールの折損 レースウェイ器具の脱落
電算機 中央監視盤	-	・電算機本体の転倒 ・CRTの転倒、落下	●	●	●	耐震固定がない
小型器具	-	・スピーカの脱落	●	□	●	軽量のため、被害は少ない
【空調設備】						
熱源機器 (重量機器)		・移動、アンカーの浮き ・防振架台の吸振体のはずれ	●	□	●	<要因分析事例4参照>
空調機 (床置き型)		・移動 ・配管、ダクトの接続部破損	●	□	●	ズレ止め金具の変形など キャンパス継手の破断等
空調機 (天井取付型) (ファン)		・揺れによる衝突変形 ・位置ズレ	□	□	●	振れ止めのない吊り下げ機器が周囲の壁に衝突など フェイスのズレなど
冷却塔		・転倒、傾き ・本体の破損 ・接続部配管の破損	●	□	●	機器脚部、アンカーの腐食による転倒など
室外機 (屋上設置)		・移動、転倒 ・接続部配管の破損	●	□	●	<要因分析事例5参照> 一般的に機器の被害は少ない
制気口類		・脱落、落下 ・位置ズレ	●	□	●	
【輸送設備】						
エレベータ		・シャフト内機器の破損 ・乗場扉回りの破損	●	□	●	<要因分析事例6参照>
エスカレータ	 2): 日本エレベータ協会	・移動、脱落	●	□	●	
【配管類】						
給水引込部 排水引込部 ガス引込部		・地盤沈下による建物導入部の破損 同上 同上	□	□	●	被害状況が把握できないため、すべて軽微とした ガスの被害が少ない理由： ガス供給が停止中のため、正確な状況が確認できず、無傷として報告した例もあると思える
立て配管部		・立て管の脱落による分岐枝管の破損	□	●	●	<要因分析事例7参照>
横引き配管部	-	・配管の揺れによる継手部の緩み	□	□	●	振れ止め対策の不足

Table 1 建築設備被害分析表 (3)
Table the Damage Analysis for Mechanical and Electrical Equipments

機器・部位	相対的な被害傾向 ■重大 □軽微 □無し	特徴的な被害事例	想定される影響度			備考
			人命の危険	資産の損失	機能の停止	
EXP. J部	-	・層間変位によるEXP. J部の破損		●	●	層間変位量に不足する継手長さ
機器接続部	-	・機器の揺れによる接続部の破損		●	●	変位吸収対策の不足
【配線類】						
架空引込部 地中引込部		・引き込み柱の傾き ・メソジ・ワイヤの外れ ・ハットホルの沈下	●		●	母線が傷付く事例は見られなかった
建物内部の幹線	 3): 電気設備学会	・ケーブルラックの脱落 ・EXP. J部の配管破損	●		●	<要因分析事例8参照> 変位対策の不足
【ダクト類】						
ダクト	-	・立てダクトの固定ビスの抜け ・横引ダクトの衝突変形			●	振れ止め対策の不足
【設置階による被害の違い】						
家庭用室外機 12階 ↑ ↓ 2階		・移動 (軽微) ・冷媒管破損 (重大)			●	・某集合住宅の被害調査 全住戸152戸の実態調査 <状況> コンクリートブロックに載せただけの室外機

2.1.3 想定される影響度 建築設備の被害は機器の物的損失だけでなく、様々な形で波及被害を発生させている。ここでは特徴的な被害事例がもたらす影響の大きさを、三つの危険性のグレードごとに考察した。なお、この想定は現実に起きた現象もあるが、その可能性があるとの主観的な見解も含んでいる。

(1) 危険性のグレード

1) 人命の危険とは、重量機器の移動・転倒や天井取付器具の落下など、人命に直接危害を加える恐れがある、またはガス漏れや防災機能の停止など間接的な危害を及ぼすこと。

2) 資産の損失とは、機器の被害だけにとどまらず、冠水や出火などの波及被害を引き起こし、建物や資財を保全できない恐れがあること。

3) 機能の停止とは、機器の破損などにより設備機能が停止する恐れがあること。

(2) 影響の程度 想定される影響度を重要と軽微に分類しているが、その基準は次のとおりである。

1) 重大な影響度とは、人命の安全や資産の保全が確保できない恐れが高いこと、または全面的な機能停止

が発生する恐れがあること。

2) 軽微な影響度とは、設置場所の状況によっては人命の安全や資産の保全が確保できない恐れがあること、または部分的な機能障害が発生する恐れがあること。

2.2 建築設備被害分析表

前項の基準により、建築設備の被害状況とその影響度をまとめたものが、建築設備被害分析表 (Table 1) である。

2.2.1 相対的な被害傾向

(1) スプリンクラーの被害が大きい。この被害状況は次項の要因分析で詳細を述べるため省略するが、いちばん多くの破損が見られた建築物でも5箇所であり、ヘッド総数や配管延べ長さから考えると被害率は低い。しかし、たとえ1箇所でも破損があればその影響は大きかった。全館に張巡らされた配管 (床面積当り約0.6 m²/m²) と、大きく揺れた天井面にヘッドを突出したシステムが持つ弱点が顕著に現れた結果と考える。

(2) 重量機器、屋上に設置された機器に被害が多い。被害のほとんどが『耐震指針』に準じた固定を行っていない事例であった。例外として、神戸市中央区脇浜町の建物

では基準以上の強度を持つアンカーボルトがわずかに浮き上がる事例が三つの機器で見られた。『耐震指針』では地下階の設計用標準震度を0.4または0.6としているが、これらのアンカーは震度1.0相当の強度を持っており、所在地や建物構造によっては予期しなかった大きさの地震入力があったと思われる。

(3) 水槽の被害が多い。被害現象は移動、転倒よりも水槽自体の破損が多い。特に、『耐震指針』以降の建築物で使用されている耐震仕様のFRP製水槽が天板パネル、一部は側板パネルまで破損しており、製品強度の見直しが必要と考える。

2.2.2 想定される影響度

(1) 人命の危険 人命の安全を保護するため、『耐震指針』に準じた耐震支持と、さらに、防災設備の機能を保持することが重要である。

(2) 資産の損失 今回の地震まではとかく見落とされがちであったが、重要な資産を保有する建築物ではこれらを保全するための冠水・浸水防止対策、出火防止対策として、関連する設備機器や周辺の配管類の耐震診断と補強対策が必要と考える。

(3) 機能の停止 上記の危険性のグレードに比べて、機能の停止に影響する被害事例は極めて多く、広い範囲での対策が急務である。特に、防災拠点となる重要な施設では、これらの機能の多くを保持しなければならない。このためには、これらの教訓を活かすことも大切であるが、設備の二重化、機器の分散化などといった災害に強いシステムを抜本的に考えなければならないことを、今回の震災は教えている。

3. 被害の要因分析

建築設備被害分析表のうち、特徴的な被害事例について被害の概要と要因分析の結果について考察する。

3.1 スプリンクラーの誤動作による放水

(1) 被害の概要 火災が発生していないにもかかわらず、スプリンクラーが作動し、放水する事例があったが、スプリンクラーヘッドや配管の破損が原因であった。被害のあった建築物群を調査すると、破損箇所はヘッド、巻出し管、枝管、また天井部だけでなく、建物導入部やエキスパンションジョイント部など各所に見られた。破損により放水が始まるとポンプが自動起動し、消火水槽の水をすべて放水するため、蔵書、美術品など重要な資産が冠水したり、地下室が浸水するなど、二次災害を引き起こした建築物もあった。

(2) 要因分析 被害の要因をまとめると次のとおりである。

- 1) 天井が大きく揺れたため、これに追従できないヘッドや巻出し管が破損した。
- 2) 天井や天井内ケーブルラックなどの落下により、ヘッドや配管が破損した。
- 3) 閉止装置が外れ閉鎖する防火戸（特に、中折れ

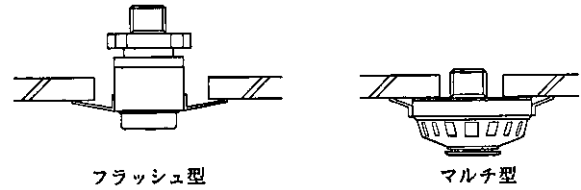


Fig.1 スプリンクラーヘッドの形状
Sprinkler Head

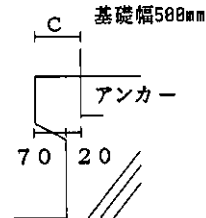


Fig.2 基礎断面図
Section of Foundation

式)、暴走するスライディングウォール、収納棚がもたれ掛かり転倒する簡易間仕切りパネル、これらが天井の上下動で天井面から突き出たヘッドに衝突し、破損させた。

また、1)の現象はヘッドの形状によって違った被害を見せている。一般的に使用されているヘッドの形状を示したものがFig.1である。ヘッドには温度ヒューズが組み込まれているが、これは火災時の放水という本来の機能のため、外力に弱い構造になっている。フラッシュ型ヘッドは天井面と同じ高さにあるため、天井が揺れると温度ヒューズ部に衝突しやすい形状になっており、その被害はマルチ型の被害に比べると多かったと思われる。

このような中で、当社が開発した「スプリンクラーヘッダー工法」が被害を免れた事例があった。なお、同工法は可とう性のあるステンレスフレキ管を採用しており、鋼管を使用した在来工法より変形に強い特性がある。

1) 天井内のケーブルラックが脱落し、配管部分を押しつぶしたが、可とう性があるためフレキ管の変形だけで放水を免れた。

2) 同工法と在来工法を併用した建築物のヘッドの破損は、在来工法区域で発生し、同工法区域では見られなかった。また、破損以外の箇所を調べると、在来工法区域ではヘッド周辺の天井ボードの割れがひどいが、同工法区域では割れが少なかった。可とう性がある配管のため、天井の揺れに追従できた結果と思われる。

3.2 高架水槽の転落

(1) 被害の概要 屋上の高架水槽が防水立上げのあるはり形基礎から転落した。Fig.2に示すように、基礎と水槽架台を固定するアンカーボルトが基礎の辺部に打設されていたため、周辺のコングリート破壊してアンカーが抜けていた。

(2) 要因分析 『耐震指針』では基礎辺部に打設するアンカーボルトの許容せん断力は、下記の計算式で求めるいずれか小なる値を採用としている。

- 1) ボルトの許容せん断力

$$Qa = \pi / 4 \cdot d^2 \cdot fs = 2,700\text{kgf (本事例)}$$

2) コンクリートの許容せん断力

$$Qa = 3 \pi \cdot C (C + d) \cdot P = 900\text{kgf (本事例)}$$

Qa: 短期許容せん断力

d : ボルト呼称径 [cm]

fs : ボルト許容せん断応力 (SS41で 1,350 kg f)

C : ボルト中心と基礎辺部の距離 [cm]

(ただし、 $C - d / 2 \geq 5\text{cm}$ とする)

P : コンクリート設計基準強度による補正係数

(通常の 180kgf/cm^2 では、 $p = 1$)

現場のアンカーボルトの打設位置は、基礎辺部から9cmであるが、防水立上げのアゴが7cmあるため実質的には2cmしかなく、計算条件の5cmを満足していない状況であった。仮に、有効9cmとして計算しても、コンクリート許容せん断力は900kgfしかなく、水槽から受けるせん断力(水平震度1Gで1,880kgf)の半分以下であった。

本事例の引抜力も計算してみると、アンカーボルトの選定に誤りはなかったが、基礎の辺部に打設したことが転倒の要因であった。ちなみに、本事例でコンクリートを破壊させないためには、基礎のほぼ中央に打設する必要があるとの計算結果になる。

3.3 水槽接続部の配管破損

(1) 被害の概要 地下階に設置したFRPパネル製二槽式受水槽の給水管(FMバルブボルト用20A)が、ねじ継手部で破断した。(Fig.3参照)

(2) 要因分析 地震動によりスロッシング(水槽内の水に水平力がかかり水が揺れを繰り返す、跳ね上がる現象)が起こり、水槽は大きく変形を繰り返した。特に、水槽上部での揺れは相当大きかったと思われる。しかし、配管接続部に変位吸収継手がなく、配管のねじ部が腐食劣化していたこともあり、破断に至った。

パネル型水槽(FRP・SUS共)は平常時には防振対策を行う必要がないので、フレキなどの変位吸収対策を忘れがちである。しかし、地震による変位量はかなり大きいと考えられるため、その変位量に見合った変位吸収継手を採用しなければならない。

また、高さのある水槽の場合はその揺れもさらに大きくなるので、水槽周辺の障害物、点検用キャットウォークなどとの離隔を取らないと、パネルが破損し、多量の水が流失する恐れがある。

3.4 防振架台の破断

(1) 被害の概要 屋上に設置された冷温水発生器(1,650W×1,650D×2,000H, 4,700kg)の防振架台の吸振体が飛び出し、架台の鋼材接合部の溶接が一部破断し、冷温水発生器が傾いた。

(2) 要因分析 防振架台(ユニット式スプリング防振装置、メーカー標準品)は吸振体で上部荷重を支え、コーナー部に耐震ストッパーを配置した構造であった。吸振体は架台に固定されていないが、ズレ防止のつめが設けられている形状であった。

防振架台の耐震ストッパーは振動を伝達させないように少し隙間(遊び)を取らなければならない。しかし、この遊びが大きかったと思われ、地震の上下動で機器、架台上部が相当暴れたようである。このため、Fig.4に示すように、まず吸振体のズレ防止のつめが外れて飛び出し、次に支えを失ったコーナー部に荷重が集中し、溶接部を破断させたと思われる。

メーカーは防振架台の出荷時に機器に合わせて吸振体の位置を設定しているが、現場据付時に再度、ストッパーボルトを緩め、機器だけでなく接続配管類を含めた荷重に対して吸振体を移動して重心調整を行っている。その際、Fig.5に示すような適切なストッパーの遊びが大きくなったと思われる。

これに類する事例として、キュービクル内変圧器の地絡事故がある。変圧器も防振対策として脚部に防振ゴムとズレ止めボルトを取っているが、水平地震力によりボルトの遊ぶ分と防振ゴムの圧縮分だけ変圧器がわずかではあるが傾斜する。この時、変圧器の頂部が予想以上に水平方向へ移動し、変圧器の充電部が周辺の金属物に接触

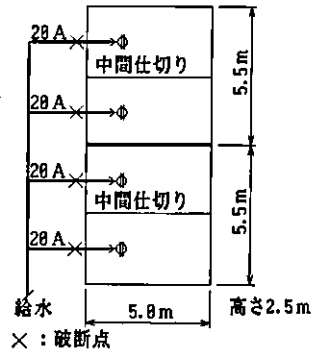


Fig.3 配管の破損があった受水槽平面図
Plan of Damaged Water Reservoir Tank

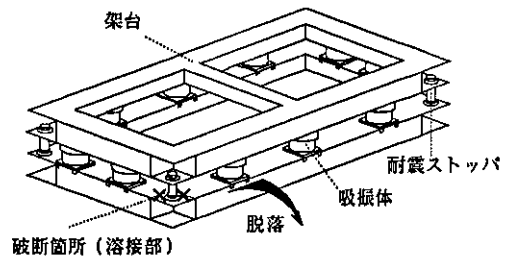


Fig.4 防振架台の破損
Damage of Vibration Protector

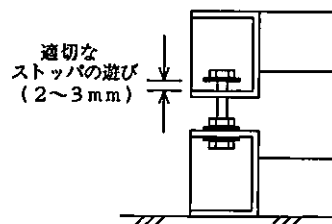


Fig.5 耐震ストッパー詳細図
Detail of Vibration Stopper

したためと思える。非常用発電機の2次側変圧器であれば、被害の影響も大きい事例である。

3.5 屋上置き式基礎の移動

(1) 被害の概要 屋上に設置したビル用マルチエアコン室外機(1,000W×940D×1,140H, 200kg)が、置き式のはり形基礎(200W×100H, コンクリート既製品)ごと移動した。

(2) 要因分析 機器と基礎に固定しているアンカーボルトは、径・本数とも『耐震指針』を満たしていたが、基礎の選定が適切でなかった。

置き式の基礎は、屋上の防水層を傷めず簡便に施工ができるため採用することが多いが、重量機器や重心の高い機器に使用すると、このような被害が生じる。『耐震指針』にTable 2の置き式基礎の選定条件が示されている。本事例を計算すると、機器のアンカーボルトに引抜力($R_b: 56\text{kgf} > 0$)が生じており、選定条件を満足していなかった。

重量機器や重心の高い機器の基礎を床スラブと別にコンクリート打設する場合は、配筋・ダボ鉄筋・つなぎ鉄筋で床スラブと一体化しなければならない。また、軽量の機器や配管類に置き式基礎を使用する場合は、選定条件を満たすだけでなく、床スラブの目荒らしを行い、打ち水をしたのち、コンクリートを打設すべきである。

3.6 乾式壁の破損による波及被害

(1) 被害の概要 エレベータシャフトのALC壁が破損し、破片がシャフト内に落下してかごを破壊させたり(Fig.6参照)、竣工後に増築された電気室のコンクリートブロック壁が崩壊して、壁に固定していたパイプフレームを倒壊させる被害(Fig.7参照)があった。また逆の事例として、乾式壁に固定を取った重量機器が転倒したため、壁にも大きな被害を与えていた。

これらはいずれも乾式または半湿式の壁材であった。一方、RC壁はひび割れなどの被害があっても、崩壊して機器に重大な影響を与えるものはなかった。

(2) 要因分析 近年、S造の壁材として、乾式のALCなどが多く使用されている。また、地下機械室の覆壁(二重壁)や増築などの壁材にコンクリートブロック(CB)を使用しているところも少なくない。

一般的に乾式壁の耐力は0.3Gで設計されているため、大きな地震ではこのような被害が出ることを認識し、重要な機械室やシャフトの壁については、設備設計者が意匠、構造設計者にその重要性を具申しなければならない。また、乾式壁を採用する場合は重量機器を固定しない、重要な機器はできるだけ離れた配置計画を取ることが大切である。

3.7 立て管の脱落による分岐枝管の折損

(1) 被害の概要 12階建ての建物の消火立て配管が約5~8mm程度脱落し、最下部の地下1階にある横枝管のねじ部が折損(Fig.8参照)した。このため、管内の水が

Table 2 置き式基礎の形状と選定条件
Classifications for Stand-alone Mechanical Foundations

基礎種別	ベタ基礎	はり形基礎	独立基礎
基礎形状			
選定条件	①設計用水平震度 $K_H \leq 1.0$ ②自重モーメント > 転倒モーメント	①設計用水平震度 $K_H \leq 1.0$ ②アンカ引抜力 $R_b \leq 0$ ③基礎幅 $B_F \geq 20\text{cm}$ ④基礎高さ $h_F/B_F \leq 2$	①設計用水平震度 $K_H < 1.0$ ②アンカ引抜力 $R_b \leq 0$ ③基礎幅 $B_F \geq 30\text{cm}$ ④基礎高さ $h_F/B_F \leq 2$

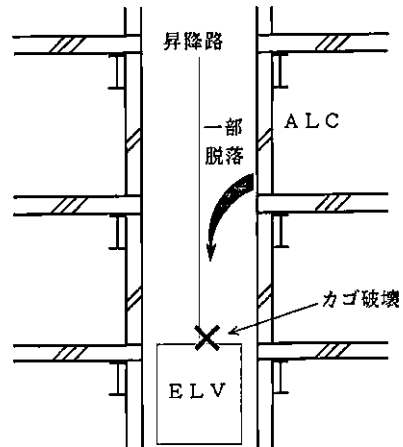


Fig.6 エレベータシャフト壁の破損
Wall Damage in Left Shaft

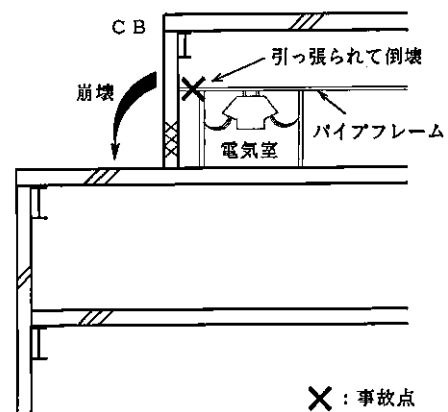


Fig.7 電気室壁の崩壊
Wall Damage at Electrical Sub-station

流出し、一区域が浸水する被害があった。

(2) 要因分析 配管は各階ごとにUボルトで締め付ける支持方法が取られていたが、配管と支持材を溶接で一体化した固定方法は取られていなかった。

地震によって鉛直に大きな力(約1,900kgf)が加わり、Uボルトの摩擦では耐えられなくなり配管がずり落ちた。しかし、最下部の枝管は直近でRC壁を貫通し、モルタルで穴埋めされているため変位を吸収できず、ねじ部で折損したと思われる。

立て配管の支持については「建築設備耐震設計指針・同

解説/空調和・衛生工学会」に詳細な計算方法が示されており、1) 振れ止め材の支持間隔、2) 振れ止め支持部材の強度、3) 自重支持部材の強度、以上3点についての検討が必要であると記述されている。

Uボルトは、配管の鉛直荷重に対する座屈を防止し、水平地震力に対する反力と層間変位による反力に対しては有効な支持材である。しかし、本事例から分かるように鉛直方向の自重支持材としては比較的弱いことを認識しなければならない。

平常時の自重支持はUボルトの摩擦力だけでも保つことが多いが、地震時には鉛直地震力が加わるため、確実な自重支持をとることが必要である。

3.8 横引きケーブルラックの脱落

(1) 被害の概要 地下1階配管用トレンチ内の横引きケーブルラックの吊り鋼材を固定していたアンカーボルトがせん断 (Fig.9参照) し、脱落した。しかし、ケーブルには損傷がなく大事には至らなかった。

また同様に、横引きの配管、ダクト、レースウェイのアンカーボルトが抜けたり、他のものと衝突して破損、変形する被害が見られた。吊り下げ機器では、照明器具が天井に衝突、破損したり、簡単な振止め斜材を設けた小型ファンの斜材止め金具が外れて壁に衝突するなど、吊り下げ形状の設備に被害が目立った。

(2) 要因分析 これらの被害は、振れ止め対策の不足によるものである。

本事例は鋼材同士がボルト1本で接合されており、全体が変形しやすい構造であった。今回の事例をアンカーボルトの被害状況から推測すると、重量のあるラックの横揺れが、上下2箇所あるアンカーボルトの上部を支点とし、下部のアンカーに作用したため、まず下部アンカーをせん断させ、次に片方の上部アンカーをせん断させたと思われる。(Fig.10参照)

また、せん断した箇所がルート直角部に近いので、この部分の横揺れだけでなく、直交するラックの軸方向の揺れも加わったと思われ、曲り部では軸方向の振れ止め支持も必要なことを示唆している。

「耐震指針」では最上階の電気配線は耐震支持(振れ止め支持)が必要だが、その下階は通常の施工法で良いとされている。しかし、本事例が示すように、重量のある電気配線は最上階でなくても耐震支持を取る必要がある。

4. 今後の対策

4.1 建築設備の耐震対策の目的

建築設備の耐震対策の目的は、1) 機器や配管類の転倒や移動などによる二次的被害防止や避難のための設備機能保持と、2) 震災後の生活や病院の治療などのように要求機能の保持に関するものがある。

1)については、機器類の十分な建築構造体への緊結と、配管類の建築構造体や設備機器類などとの相互の変形や変位量などへの追従性がある。

2)については、1)に加えて設備システムの機能保持が求められ、1)以上に建築構造体への緊結と変位量への追従性が求められ、さらにに機器本体の耐震強度と震災時および後のインフラが機能しなくなった場合に備えて、非常電源や水、排水施設などが必要となる。

4.2 機器・配管類の転倒・移動の防止

4.2.1 構造体への緊結と変位への追従性 今回の被害状況調査でも最も多くの被害が発生したのは、建物の位置では屋上であり、設備システムでは機器類の転倒や移

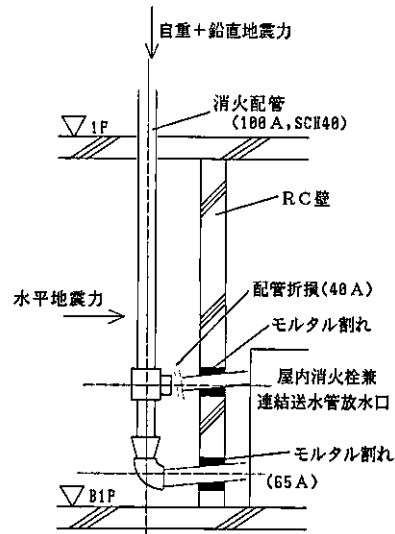


Fig.8 被害状況
Damages at Connection

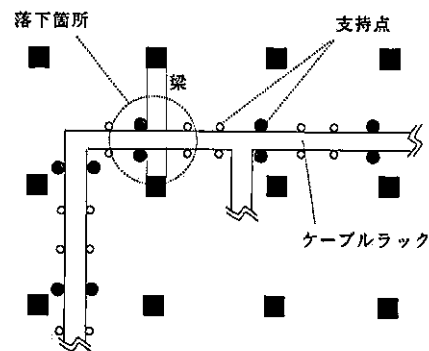


Fig.9 被害のあったケーブルラックの箇所
Location of Damaged Cable Ladder

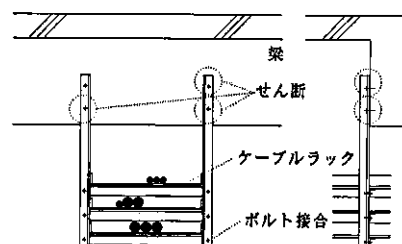


Fig.10 脱落箇所詳細図
Detail of Damages

動、およびその接続配管部分、天井取付け器具類などである。

屋上は建物で最も地震力が大きく作用すること、防水床であることから建築構造体への緊結状況が不利であることなどから被害例が多い。

機器類への配管類の接続部や、天井取付け器具類の被害はそれらの相対変位量に対する追従性の不足が大きな要因となっている。

(1) 建築構造体への緊結 最も多くの被害が発生した屋上などでは、防水床に設けられた機器類や配管類の転倒や移動が多かった。屋上の被害が多い要因は、建物で最も大きな地震力が加わる、重量機器が多い、防水立ち上げ基礎を設ける場合以外では構造体に緊結することができない、竣工後の機器の増設工事などでは防水立ち上げ基礎を設けることが防水との関連で難しい、新築工事でも中軽量機器や配管類では構造体への緊結の必要性の認識が甘い、などがある。

防水立ち上げ基礎が原則であるが、中軽量機器などや重要性の低い配管類で、色々な理由で防水立ち上げ基礎が不可能な場合には次のように行う。各種耐震関連の指針などに準じて転倒計算や引き抜き計算を行い、必要により周囲の押さえモルタルに鉄筋を入れたり、周囲に打ち増しコンクリートを設けて耐震強度を増す。

(2) 変位量への追従性 設備システム内では機器と接続配管との部分に最も被害が集中した。原因は可とう管が設けられていても、発生した相対変位量がそれ以上であったり、想定以上の変位があったからである。

変位量への追従性を確保するのは次のようにする。

1) 機器への接続配管には可とう管を設けて、その前後をきちんと固定して変位量が設計値に入るようにする。

2) 設備の配管類の必要耐震強度は、地震力ではなく変位量で決まるが、層間変位角は現行の $1/200$ より大きく、S造では $1/100$ とする案が有力である。そのような変位量が発生すると、 200ϕ を超える鋼管などではその継ぎ手固定方法などに注意を要する。

3) 立管から各階への取り出し配管には3クッションを設けたり、シャフト貫通部に配管の断熱を兼ねた岩綿を設けて、変位量を吸収できる取り出し方法とする。横引き主管からの取出し枝管も同じである。

4) 天井取付け器具類の据え付け方法は、システム天井ではその強度が弱く変位量が大いのでパーに固定し、天井裏の主ダクトなどとの接続にはフレキシブルな継ぎ手を設ける。在来天井の場合にはその変位量が小さいのでフレキシブルな継ぎ手を用いるか天井裏床スラブから強固に固定する。

4.2.2 その他設計施工の対応策 (財)日本建築センターの「建築設備耐震設計・施工指針」、または(社)空気調和衛生工学会の「建築設備の耐震設計指針・同解説」、同じく「1996年建築設備設計指針(案)報告書」などに準じて進めることが基本である。

しかし、今回の地震被害を基にそれらの基準の見直し

作業が一部で進んでいる。それらの大きな項目は、設備耐震の基本である機器類や配管類への地震入力値の算出方法を、45m以下の中小建物では原則として局部震度法を、45mを超える建物では動的設計法を適用する、地震力算出の基本である設計用震度を現行基準より大きな値を用いる、さらに建築構造設計側からは層間変位角を現行の $1/200$ より大きくする方向の検討が進んでいる。

そのような背景から、新築建物ではそれらに配慮した計画を、既設の建物では現行指針に準じた耐震強度を目標とする耐力向上努力をしなければならない。

建築設備機器や配管類へ作用する地震力の算出から、所用の耐力が発揮されるまで、次のような事項に注意を払うことが必要である。

(1) 地震入力

1) 水平地震力と鉛直地震力は同時に作用する。

2) 設備の重要度や、設備機器などの応答倍率を考慮する。

(2) 剛性 水槽などを設置する高架台などはその剛性を高くする。

(3) ストッパー ストッパーは原則として水平、鉛直の両方向に有効なものとし、機器類との隙間は運転時に触れない程度の最小限の間隔とする。

(4) アンカーボルト

1) アンカーボルトの設置計画では、機器本体や付属のベース金物などの剛性を考慮する。

2) 箱抜きアンカーボルトの充填モルタルはその品質管理に注意を払うこと。

原則として膨張モルタルを用いること。一般モルタルを用いて周囲コンクリートとの間に隙間を生じて抜けやすくなったり、水が入り込んでアンカーボルト強度が減じたためと考えられる被害例もある。

(5) 機器本体 機器本体の耐震強度は製造業者によるとされているが、付属のベース金物と建築構造体とを緊結することは、設計施工側の責任となるので、金物強度やアンカーボルトのサイズや位置などは必ず確認し、必要に応じて製造業者と協議することが必要である。特に特注機器については必ず必要となる。今回の被害例でも特注機器の破損事故があった。

4.3 機能保持

救急センターなどで設備機能を保持する必要がある場合には、必要設備について機器類の固定と変位量に対する追従性はより十分な余裕をもって行うことは当然であるが、機能保持にはさらに機器本体の耐震強度アップや地震に強いシステム的な対応、二重化など予備的な対応、震災時にインフラが停止した場合を想定して、必要最小限の油や水の備蓄や緊急時の入手方法を計画しておく必要がある。さらに何にも増して従業員の教育は重要である。

4.3.1 機器の耐震強度 槽類や冷却塔を除いて、量産されている機器などでも耐震強度の実証的な確認は、製造業者でも余りしていない場合が多い。まして特注機器な

どではその検証をする事は非常に難しい。輸送時の振動などを考慮するとそれなりに強度はあると推測されるが、現実には保証的な数値を提出させることは非常に難しい状況にある。

機器などの耐震強度の検証が難しいのはその構成部品が複雑で、同一機種でもその形式により固定するフレームなどとの相対的な振動特性などが異なることなどが推測される。

機器製造業者へのアンケート調査によると、ポンプやファン類など比較的構造が簡単な機器の耐震強度の標準仕様は、水平震度で1.0G程度、鉛直震度でその1/2との回答が多い。オプションの場合には、それぞれ約2倍まで対応可能との回答が多く注目される。

一方、冷凍機やパッケージ型空調機などのように複雑な機器では、上記のような明快な標準耐震仕様は設定されていないものと思われる。

4.3.2 設備システムの耐震対策

(1) 電気設備 最重要設備と位置づけられている。そのなかでも非常用発電機と受変電設備、幹線設備が重要である。

重要度に応じて機器設備室の配置を1階や地下に計画したり、分割化や細かく系統分けとバックアップ化を図るなどの計画をする。

(2) 非常用発電機 補器類が少ない空冷式を用いる。

室の配置に関しては、最重要設備に位置づけられている設備であり、その機能を果たすために必要に応じて最善の場所が必要となる。室の場所選択の判断では、油の供給と換気の確保があるが、1階などの地上階が最も望ましい。1階であれば、油タンクおよびその配管系などの保守にも目が届き、故障を生じても対処しやすい。

(3) 給水設備

ア) 給水設備全般

- 1) 高架水槽のない圧力給水方式の採用。
- 2) 受水槽や高架水槽の2槽化を図る。
- 3) 特に高架水槽の設置方向のX-Y軸を変える。
- 4) 給水系統を階や用途別に細かく系統分けを行い、

適時にバルブを設けて被害があった系統の給水を停止して漏水を防ぐ。

さらに救急施設などでは、

5) 重要施設や重要系統などでは、専用の圧力給水ポンプも併設する。

6) 井戸を設けられれば、極力設けておく。

7) 近隣に池や河川、建物内に蓄熱層や消防用水槽などがあれば、ハンドポンプや雑用水への浄化装置を計画する。

8) 多量の上水が必要な病院などでは、雑用水の上水への高度処理も計画する。

イ) 水槽の耐震化

給水は救急施設や住宅では重要度が非常に高い。今回の被害でも水槽の被害例が話題となった。

2.2.1にも被害状況が述べられているが、水槽は自由表面をもつ機器であるので、内部の水の挙動が建物および

高架台などの振動特性に大きく影響され、且つ水槽自体の形状にも大きく影響される。それゆえ設計・施工者としては総括的に判断して強度の高いものを、その特性を判断した据え付け方法を考慮して、計画する必要がある。

1) 鋼板一体形エポキシコーティング水槽（液体エポキシ樹脂を吹き付けたものを高温槽内で焼き付ける）を採用する。

2) パネル水槽の耐震強度は表示値は同じでもその強度の考え方は各社の判断で行っている。天板など水槽全体の強度をスロッシングまで含めて考慮してある製品を採用する。

3) 水槽の平面積はスロッシングの影響をあまり受けないように、適当な広さで仕切壁などを計画する。

4) 10~15階建程度の高層建物では、屋上設置形水槽の短辺方向、より高い建物では長辺方向でも、スロッシングの影響が考えられ、想像以上の地震力が作用する場合もあるので、据え付けには構造設計者と十分な協議を行う。

(4) 排水設備 今回の震災では建物と地盤との相対変位量が大きく、外に放流する排水管に破損被害が多発した。幸いにして地盤が下がった例がほとんどであったので、排水管結びさえすれば機能確保をする事ができた。そこで、排水系統を複数にして分散化を図り、より機能保持の必要性の高い系統ではGLより高いレベルで建物外に出す配管方法を採用する。このことにより最悪の場合でも排水は建物外に放出可能となる。

地下ピットなどで予備スペースがある場合には、積極的に排水槽や給水槽などへの転用可能な計画とする。

(5) スプリンクラー配管 枝管にはフレキシブル配管を用いるヘッダ方式は3.1にも記述されているように、今回の震災でも被害が非常に少なかった。ヘッドが設けられている天井と天井裏の主配管との相対変位量を吸収するのにフレキシブル配管が有効に作用している。

より散水事故を嫌う重要な部屋などにはヘッダ方式に加えて予作動式を採用する。

(6) ガス設備 プロパンガスの場合には、予備用ボンベの計画をする。

救急施設などで都市ガス使用の場合には、都市ガス会社に非常用のガス供給車が準備されている場合が多いので、日頃から折衝しておく。

一般需要家向けには現時点ではその体制は整備されていないが、最近非常用発電機に都市ガスボンベが一部認められていることから、将来は非常用として20または50kg用都市ガスボンベの利用も考えられる。

(7) 空調換気設備 耐震の強度を各機器類や配管類ごとに検討することはそれなりに意味があるが、空調設備は非常に複雑で規模も大きい場合が多いので、基本的には次の方針で計画する。

1) 供給エリアを極力小分割化をする

2) 重要なエリアは単独系統にし、さらに二重化などを計画する。

震災時には中央監視設備に支障を生じている可能性が高いので、これらのエリアの運転制御はエリアごとにローカルに切り替えて行えることが重要である。

3) 方式は補器などが少ない空冷式パッケージ方式などを採用する。

4) 最も重要なものは、非常用発電機室や電気室の換気設備である。それらはその重要度に応じて耐震的な据え付けや二重化を図る。

(8) エレベータ 今回の被害例から判断すると、非常用EVは比較的被害が少なかった。非常用EVのシャフトの構成などEVからだけの判断はできないが、重要な施設では非常用EVの設置基準に従って最少台数を計画することも意味があろう。

(9) 防災設備 地震時の避難に二次被害を受けないための重要設備である。それゆえに法規上の規制も多く、排煙設備にフレキシブルダクトを設けられないなど、自由に対処することができない項目もある。

許容される範囲で可能な対応策をとる。例えば、

1) 排煙口は極力天井裏チャンバー方式を採用する(天井面に排煙口がないので天井との接点がない)。

2) 防災盤などで卓上のものは、鉢巻状の押さえ部材などで卓に固定する。

4.3.3 その他の留意事項

(1) 二重化 重要度が高いものは極力二重化を図る。しかもその設置位置や設置方法、配管ルートなどは異なることが望ましい。

(2) 備蓄 電力などのインフラに支障が生じた場合に備えて、水などの備蓄を考慮することも必要である。

(3) 免震ビルの設備計画 免震ビルでは各階の床の震度が小さいので、設備的には耐震対策を計画しないでもよい、との誤った考え方もある。しかし免震ビルを採用する主旨からして、より十分な検討が必要である。

免震ビルでの設備的な耐震対策で異なることは、地震入力が建物高さにかかわらず動的設計法によることと、結果としてのその各階床の応答震度が小さいこと、免震ゴムが設置されている階での水平変位量が大いこと、がある。

ただし、鉛直方向では免震効果のない場合が多い。したがって、機器類や配管類の固定の計算では注意が必要である。

このようなことから、構造設計から与えられた各階床

の応答震度を基に、耐震的必要強度の計算やシステム的な配慮は十分になされなければならない。

おわりに

今回の震災から各設備機器などの被害程度とその特徴的な被害状況、それらの人命や機能への影響度などを調査分析した。これらの調査分析から次の事項が確認できた。

1) スプリンクラーヘッドの被害が多く、当社開発技術のヘッダ工法が耐震的に非常に有効である。

2) 水槽の被害が多く、耐震型水槽強度も各社ごとにバラツキがあり十分でない。

3) 屋上の被害例が多い。

4) 耐震固定をしていない吊り式の被害例が多い。

5) 配管では機器接続部と、立て配管からの各階の取り出し枝管部に被害が多い。

6) 各種引込み部の被害が多い。

7) ALC板などの壁が倒壊して、設備的な被害を生じたものが多い。

このような事情から、建築設備耐震の対策編ではそれらに有効と考えられる手法や考え方を述べた。

今後はより信頼性の高い設備システムの構築を目指して、より有効な機器や配管類の据え付けや相対変位量に対する追従性を確保する手法を検討していきたい。機器本体強度も現状では製造業者に任されているが、その強度の表示も求めたり、計画建物の耐震要求や据え付け条件などから設計者と製造業者との協議の場を確保していきたい。

さらに既設建物の耐震強度向上に有効な防水床上コンクリート基礎の耐力向上手法などの研究開発を進めるつもりである。

参考文献

- 1) 日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針，(1984年版)
- 2) (社)電気設備学会：兵庫県南部地震電気設備被害調査報告書，(1995)
- 3) 日本エレベータ協会：兵庫県南部地震のエレベータ項目耐震評価，(1995)