高層建物スプリンクラー設備の中地震振動実験 Shaking Table Test of High-Rise Building Sprinkler Systems on Level-1 scale Earthquake

高井 茂光*鹿籠 泰幸**Shigemitsu TakaiYasuyuki Shikamori飯塚 信一*金川 基*Shinichi IizukaMotoi Kanagawa

要 約

本実験では、代表的なスプリンクラー設備が中地震後も地震前と同等に機能を維持するために必要な 技術基準を検討するための基盤的情報を得ることを目的として、スプリンクラー設備を備えた実大試験 体について、高層建築物の応答を模擬した振動実験を行った.

本実験により、中・大規模事務室空間に標準的な仕様で施工されたスプリンクラー設備については、 中地震によって機能損失が起きる可能性が小さいことが示された.

- 目 次
- § 1. はじめに
- § 2. 実験における想定建物
 § 3. 試験装置及び試験体
 § 4. 実験入力加振波の作成と実験ケース
 § 5. 計測,確認方法
 § 6. 計測,確認結果
- § 7. おわりに

§1. はじめに

スプリンクラー設備については,稀に起こる地震(レ ベル1地震,中地震)後の機能維持に関わる基準が明確 になっていないこともあって,スプリンクラー設備の初 期消火能力等を避難安全性能等に組み入れる建築基準に はなっていない.地震時にはスプリンクラー設備に被害 が生じたとする調査結果^{1),2)}があり,被害発生を抑える ための検討³⁾がなされている.しかしながら,兵庫県南 部地震のような極稀に起こる地震ではなく,稀に起こる 地震に対するスプリンクラー設備の機能維持に関して, 実大規模で検討した研究はない.

そこで、本実験では代表的なスプリンクラー設備が中 地震後も地震前と同等に機能を維持するために必要な技 術基準を検討するための基盤的情報を得ることを目的と して、スプリンクラー設備を備えた実大試験体について、 高層建築物の応答を模擬した振動実験を行った.

- * 技術研究所建築技術課
- **技術研究所

§2. 実験における想定建物

スプリンクラー設備は、11 階以上の階を有する建物に 設置が義務付けられることから、本実験の対象として、超 高層事務所ビルを想定した.想定建物の概要は次の通り である.

建設場所:東京都内(第2種地盤)

- 建築規模:地上19階,地下2階
- 構造種別:地上階S造(柱CFT造)

地下階 SRC 造および RC 造

- 構造形式:制震ダンパー付ラーメン構造
- 基礎構造:直接基礎

基準階高:425 m

なお、上部構造の設計クライテリアは、稀に発生する 地震動に対して各階の層間変形角 1/200 以下、極めて稀 に発生する地震動に対して各階の層間変形角 1/100 以 下である.

§3. 試験装置及び試験体

3-1 試験装置

試験装置として, **写真-1**に示す3次元大型振動台 (5.5 m×5.5 m)を使用し, 天井試験体を設置するための 架台フレームを固定した. 架台フレームには剛性を確保 するために全構面にブレースを配置した.

架台フレームの固有振動数は,X軸方向(水平方向弱軸):約7Hz,Y軸方向(水平方向強軸):約10Hz,Z軸 方向(鉛直方向):約16Hzであった.

3-2 試験体

試験体平面図を図-1 に示す. 概要は次の通りである. (1) 天井

天井の形式は超高層事務所ビルで一般的に採用されて いる 600 mm グリッドタイプ (システム天井) とした. 天 井外周サイズは,5460 mm×5460 mm である. 試験体の 外観を**写真-2**に,天井の外観を**写真-3**に示す.

実験における天井四周の扱いについては、大規模天井 の一部を取り出した状況を再現するために、架台フレー ムから 270 mm 離し、自由に振動できることとした.た だし、本実験では天井被害が軽微な場合におけるスプリ ンクラー設備被害の原因特定を主な目的としたため、天 井の水平方向耐力は余力を持たせており、耐震ブレース については標準仕様より1対多い3対のブレース(一部 の実験では標準仕様の2対)を配している.また、標準 仕様より1対多いブレースは、天井四周の壁の拘束によ る変位抑制に対する模擬の目的も兼ねている.

(2) スプリンクラー設備

スプリンクラーヘッドは,事務所ビルに多く用いられ ているフラッシュ型を9個配置し,全てシーリングプレ ートを取り付けた.スプリンクラーヘッドおよびその固 定状況を**写真-4**に示す.

巻き出し配管は、次の3通りの方式を対象とした.

- 在来実管方式(図-1のBパターン):巻き出し方向 を変化させた3種類の施工を行い,設備プレートは 用いず,スプリンクラーを直接天井ボードに設置し た.
- ② フレキ単体方式(図-1のCパターン):横引き管から設備プレートに設けたスプリンクラーヘッドにフレキを用いて1対1で接続し、フレキは1m、2m、3mの3種類を用い、3mフレキについては吊りボルトにて支持を行った(一部実験では自由).
- ③ フレキ多口継手形式(図-1のAパターン):横引き 管に設けた1つの多口継手から設備プレートに設け た3つのスプリンクラーヘッドにフレキを用いて接 続した.フレキの長さ、支持方法は②と同様である. その他、横引き管は枝管を想定しスプリンクラー個 数に応じた配管径とした.堅管の配管径についても 同様である.堅管には圧力計およびバルブを設置し、 圧力漏れの監視に利用した.配管およびフレキ管内 の水重量については、写真-5に示す鉛テープおよ び鉛シートを巻きつけ再現している.

§4. 実験入力加振波の作成と実験ケース

実験における入力加振波(レベル1地震,中地震)は 地震応答解析により求めた.作成フローを図-2に示す.



写真一1 三次元大型振動台





写真一2 試験体外観



写真一3 天井外観



写真一4 SP ヘッド固定状況



4-1 入力地震動

告示平 12 建告第 1461 号による方法により,モデル建物の解放工学的基盤における模擬地震動を作成し,地盤 応答解析により基礎底位置の応答加速度を算定した.地 震動の位相は,海洋型地震を対象とした八戸位相および 直下型地震を対象とした神戸位相を採用した.表-1 に 入力地震動の諸元を,図-3 に応答スペクトル (h=0.05) を示す.

4-2 地震応答解析

水平方向の主要動, 直交動については質点系地震応答 解析, 上下動については2次元フレーム地震応答解析を 行い,各フロアの応答加速度を求めた.モデル建物の固 有周期を表-2に示す.解析の結果,主要動, 直交動お よび上下動ともR階における応答が概ね各周期帯に亘 り最大となることから,R階の応答結果を実験入力加振 波として採用した.図-4に実験入力加振波の応答スペ クトルを示す.実験入力加振波の応答スペクトルのピー クは,八戸位相および神戸位相とも表-2に示す建物固 有周期近傍に生じている.紙面の都合上割愛するが,各 階とも概ね同様のスペクトル性状が確認できる.

4-3 実験ケース

実験入力加振波(以下,目標波)について,加振軸・ 入力レベルなどを変えた実験ケース(表-3)を実施し た.ここで,入力レベルとは実験入力加振波に対する振 動台制御時の指令信号の倍率である.目標波と架台フレ ーム加速度(入力レベル[100,125%])の加速度応答ス ペクトル(八戸位相波,JMA神戸位相波)を図-5に示 す.0.4~2秒の周期帯域において,入力レベル100%で は目標波を下回っているため,本実験では中地震時のス プリンクラーの機能維持検証用として,入力レベル 125%を中地震時の加振と定義した.

表-3中の加振倍率は入力レベル 125%を基準(r= 1.0)としている. なお, 目標波にはフィルター処理 [0.2~ 50 Hz] を行っており, ケース⑦, ⑰については, 振動台 のストロークを超えないよう長周期成分をカット [0.5~ 50 Hz] している. また, ⑯, ⑰の実験は天井の耐震ブレ ースを3対から2対に減らして行っている.

4--4 自由振動実験

中地震応答波加振の前後の自由振動実験結果を表一4

表-1 入力地震動の諸元(レベル1地震,中地震)

	八戸位相	(海洋型)	神戸位相(直下型)		
	最大加速度	加速度 最大速度 最大加速		最大速度	
	(Gal)	(cm/s)	(Gal)	(cm/s)	
水平	722	102	736	100	
直交	413	60	508	73	
上下	433	51	316	54	







図-4 実験入力加振波の応答スペクトル

表一2 モデル建物固有周期

	1次	2次	3次
X方向	2.65	0.90	0.54
Y方向	2.68	0.91	0.54
Z方向	0. 41	0.34	0.30

単位:sec

に示す.加振は人力で天井を直接押す方法で実施した.T バー(4箇所)とボード(2箇所)のピーク値(X:5.62 Hz, Y:5.52 Hz)が同じであるため,天井全体が一体となっ て挙動したと言える.また,中地震応答波加振の前後に おいて,ピーク振動数に変化はなかったことや目視での チェックなどから,天井部材の応答は弾性範囲内に収ま っており損傷を受けていないと判断した.

§5. 計測, 確認方法

5-1 振動性状計測方法

振動性状の計測については、図-6に示すように架台 フレーム上、Tバー、ボード(スプリンクラー有り、無 し)、配管(フレキ接続部、在来実管部)の加速度および 天井の変位とした.ここで、Y方向が主要動、X方向が 直交動である.加速度計設置状況の一部を**写真-6、写 真-7**に示す.

5-2 スプリンクラー設備機能維持確認方法

スプリンクラー設備の地震時機能維持に関しては、そ れぞれ以下の確認方法を用いた.

(1) 天井部材目視チェック

加振後,外部から及び一部天井ボードを取り外して天 井内部を目視し,照明パネル,設備プレート,天井ボー ド,Tバー,ブレース及び接合部材等の破損や捩れ等の 異常の有無を確認した(**写真-8**).

(2) スプリンクラー設備目視チェック

加振後,外部からと一部天井ボードを取り外して天井 内部を目視し,スプリンクラーヘッド,配管,フレキ管, 吊りボルト,天井部材との取り合い等の破損や外れ等の 異常の有無を確認した(**写真-9**).

(3) 圧力変動監視

3種類の配管ルートの圧力をコンプレッサーで 0.3 MPa に加圧した後加振し,空気漏れによる圧力変動 をメーターにて 5~10 分おきに 20~60 分間監視した(**写 真-10**).

(4) スプリンクラー配管空気漏れチェック

配管の接続状況を確認するために,加振後,配管接続 部に石鹸水を塗布し,配管接続部の空気漏れの有無を確 認した(写真-11).

表一3 実験ケース

実験	加振波	加振軸	入力	加振	実験	加振波	加振軸	入力	加振
番号			レヘ゜ル	倍率r	番号			レヘ゛ル	倍率r
0	八戸	1軸	50%	0.4	9	JMA	3軸	125%	1.0
1	八戸	1軸	100%	0.8	10	JMA	3軸	100%	0.8
2	八戸	3軸	50%	0.4	1	JMA	3軸	100%	0.8
3	JMA	3軸	50%	0.4	(12)	八戸	3軸	100%	0.8
4	八戸	3軸	100%	0.8	13	JMA	3軸	175%	1.4
5	JMA	3軸	100%	0.8	14)	JMA	3軸	200%	1.6
6	JMA	1軸	100%	0.8	(15)	八戸	3軸	150%	1.2
Ø	八戸	3軸	100%	0.8	16	八戸	3軸	150%	1.2
8	八戸	3軸	125%	1.0	1	八戸	3軸	300%	2.4



表一4 自由振動結果

计测体元	X方向 ピーク	7振動数 [Hz]	Y方向 ピーク振動数[Hz]		
司测固则	⑦加振前	⑬加振後	⑦加振前	③加振後	
Tバー(4箇所)	5.62	5.62	5.52	5.52	
ボードSP有り	5.62	5.62	5.52	5.52	
ボードSP無し	5.62	5.62	5.54	5.54	



図-6 各部の計測位置



写真一6 加速度計設置状況①



写真一7 加速度計設置状況②



写真一8 天井部材目視チェック



写真一9 SP 設備目視チェック

§6. 計測, 確認結果

6-1 中地震応答波加振時の振動性状

中地震応答波加振時(ケース⑧, r=1.0)の試験体振 動性状(Tバー,ボード,配管)を計測データにより確 認した.

Tバー

図-7にY方向の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルを示す.図-7より自由振動と同様に5.5Hz付近に ピークが確認できる.計測位置による差異がほとんどないため,Tバー全体は一体となって挙動していたと言える.なお,最大変位はX方向15mm,Y方向18mmであった.

(2) ボード (スプリンクラー有り, 無し)

図-8にボード(スプリンクラー有り,無し)の加速 度時刻歴波形(Y,Z方向),加速度フーリエスペクトル (Y方向)を示す.Tバーと同様に5.5Hz付近にピークが 確認できる.Z方向の時刻歴波形で,スプリンクラー無 しは4Gを超える加速度となっており,ボードが浮き上 がって着地した時の波形と考えられる.スプリンクラー 有りは,ヘッド部とボードのクリアランスを設けている が,厳密にはシーリングプレートを介してつながってい るため,ほとんど浮き上がらなかったと考えられる.

(3) 配管(フレキ接続部,在来実管部)

図-9に加速度フーリエスペクトル(X,Y方向)を示 す.フレキ配管の水平方向の振動は,長さ方向と直交方 向で異なるのは,配管吊り治具の剛性差の影響と考えら れる.直結配管の水平方向の振動は,長さ方向と直交方 向で差はない.スプリンクラーヘッドとボードの摩擦に より直交方向の剛性が高くなっているためと考えられる.

(4) 耐震ブレース

耐震ブレースについては特にセンサーを設置していな かったが,加振後の確認では取付金具等の緩みはなく,健 全な状態であった.動画では耐震ブレースが細かい振動 をしていたが,取付金具は固定が維持されているのが確 認できる.

刻歴波形において最大加速度が10G(Z方向)を超え ているのが確認でき、ボードのすべりや浮き上がりがよ り激しくなり、Tバーと衝突していると考えられる.し かしながらボードが外れたり、損傷を受けた形跡は確認 されなかった.



写真一10 圧力変動監視 メーター



写真-11 SP 配管空気漏れ チェック













742



6-2 その他の加振結果

(1) 中地震以上の応答波加振時の振動性状

図-10に加振倍率r=1.0及びr=1.6のボード(スプ リンクラー有り,無し)のフーリエスペクトル(Y方向) を示す.加振倍率を上げてもピーク振動数に変化はなく, そのフーリエ振幅は約1.6倍になっている.図-11にr =0.4~1.6におけるボードの最大加速度を示す.Z方向 の増幅率が大きいのは,浮き上がりによるものと考えら れる.

(2) 耐震ブレース2対の応答波加振時の振動性状

ケース⁽⁶⁾では耐震ブレースを3対から2対に減らし, r=1.2 で加振した.加振前の自由振動実験結果から,Y 方向のピーク振動数が5.52 Hz から4.86 Hz となったが, 特に試験体の損傷等は認められなかった.

(3) ケース①

長周期成分をカット [0.5~50 Hz] して入力レベルを 300%とした加振がケース⑪である. 図-12 にボード(ス プリンクラー有り, 無し)の加速度時刻歴波形(Y, Z方 向),フーリエスペクトル(Y方向)を示す.加速度時刻 歴波形において最大加速度が10G(Z方向)を超えてい るのが確認でき,ボードのすべりや浮き上がりがより激 しくなり,Tバーと衝突していると考えられる.しかし ながらボードが外れたり,損傷を受けた形跡は確認され なかった.

6-3 スプリンクラー設備機能維持確認結果

それぞれの加振パターンにて試験体加振後,「5-2ス プリンクラー設備機能維持確認方法」に記した機能維持 確認方法により,確認を行った.その結果,一部のケー スにおいては目視及び石鹸水によるスプリンクラー配管 空気漏れチェックを省略したが,全てのケースにおいて 加振後の圧力低下は見られなかった.また,目視及び石 鹸水によるスプリンクラー配管空気漏れチェックを行っ た全てのケースにおいて天井及びスプリンクラー配管・ ヘッドの損傷,またスプリンクラー配管の空気漏れは確 認されなかった.これらは限られた試験条件における結 果ではあるが,中・大規模事務室空間に標準的な仕様で 施工されたスプリンクラー設備については,中地震によ って機能損失が起きる可能性は小さいと思われる.

さらに、レベル1地震に対する応答の2.4 倍程度の応 答を与えた場合(ケース①)でも今回の加振によって天 井及びスプリンクラー設備に損傷は生じておらず、本実 験で対象とした19 階を越える高層部分に対しても、本実 験と同様の仕様であれば、中地震に対してスプリンクラ ー設備の損傷は起きにくいと考えられる.

ただし、3mフレキ管の吊りボルトを外した場合(ケ

ース①~④)には、結果的には天井及びスプリンクラー 設備に損傷は無かったものの、フレキ管の振動は非常に 大きく、天井ボードに接触寸前となるケースも映像で確 認できた.今回の実験では天井空間にかなりの余裕があ ったが、実際の建物においては天井内に空調機や空調ダ クトその他配管類があり、その合間を縫ってフレキ管を 通すことになる.そのような場合には地震時にフレキ管 と他の設備及び天井部材との衝突によるお互いの損傷が 皆無とは言い切れない.それを避ける意味では、長いフ レキ管に対する吊りボルトの必要性は考慮の余地がある と思われる.

§7. おわりに

標準的なグリッド形システム天井とスプリンクラー設備を備えた実大試験体及び3次元大型振動台を用いて, 高層建築物の応答を模擬した振動実験を行った.その結 果,中・大規模事務室空間に標準的な仕様で施工された スプリンクラー設備については,中地震によって機能損 失が起きる可能性が小さいことが示された.今後は,今 回実験対象としなかった事務所以外の建築物,グリッド 形システム天井以外の天井,大地震時における機能維持 等について検討する必要がある.

参考文献

- 神戸市消防局予防部査察課:兵庫県南部地震による スプリンクラー設備の損傷に関する実態調査結果, 火災, Vol46, No3, pp5-8, 1996
- 2)大阪市消防局予防課:兵庫県南部地震における大阪市内の消防用設備等(スプリンクラー設備)の被害と耐震対策,火災, Vol46, No3, pp9-12, 1996
- 3) 國川明輝:地震に対するスプリンクラー配管の防御 (その1),火災, Vol46, No3, pp25-29, 1996, (そ の2), Vol46, No4, pp52-57, 1996
- 4)河野他:「スプリンクラー設備の地震時挙動確認実 大実験」平成21年度日本火災学会研究発表会概要 集
- 5) 桑他:「高層建物スプリンクラー設備の中地震振動 実験―第1報~第3報」日本建築学会2009年度大会 学術講演梗概集

謝辞.本研究は(独)建築研究所,戸田建設(株),西松 建設(株)および(財)日本建築センターの共同研究と して,平成20年度国土交通省建築基準整備促進補助金事 業により実施したもの^{4).5)}である.記して,関係各位に 心より感謝申し上げる.