スプリンクラ巻き出し配管の動的加力実験

建築の非構造部材・建築設備の耐震補強と改修に関する研究 その2

THE DYNAMIC LOADING TESTS ABOUT ARM - OVER DROP PIPING OF SPRINKLER

A study on seismic retrofit and renovation of building equipment and non-structural elements Part 2

米山嘉貴 — * 1 西川豊宏 — * 2
大橋一正 — * 3

Yoshiki YONEYAMA — * 1 Toyohiro NISHIKAWA — * 2
Kazumasa OHASHI — * 3

キーワード：
建築設備, スプリンクラ, 巻き出し配管, 耐震性能, 振動台実験

Keywords:
Building equipment, Sprinkler, Arm-over drop piping, Seismic performance, Shaking table test

If an earthquake occurs, damage to sprinkler piping, thus need to be kept in working order, can lead to secondary damage such as water leaks, making it difficult for the building to be used. Therefore, a refurbishment plan need understanding the seismic performance around the sprinkler head and arm-over drop piping of sprinkler. So, this study what shaking table tests about flexible piping. It grasped vibration characteristic from vibration, and the effectiveness of the arm-over drop piping in shaking table tests, response value of the piping for structural frame with vibration characteristics, the basic date for the numerical analysis.

1. はじめに

前報告^{*)}では、スプリンクラ(以下 SP)設備における配管相互、非構造部材との振動性状の違いを原因とする配管接合部、SP ヘッド部の破損が多く報告されたことを過去の建築設備に係る地震被害調査¹⁾を用いて整理した。また、工学院大学新宿校舎(以下 評価建物)における可とう性の少ない配管接続による SP 巻き出し配管の耐震性能の検証を目的に静的加力実験を行い、SP 巻き出し配管のねじ部における破断強度を求めた。

超高層建築物である評価建物は、長周期地震動への対策が必要とされている。本報告においては、評価建物の SP 設備の耐震改修策の有効性を示すべく、SP 巻き出し配管にフレキシブル配管を用いた場合での振動台実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 動的加力実験の目的

SP 設備は、天井内で水平展開されており、配水主管から枝管は、受け持ちヘッド数に応じて徐々に縮径され SP 巻き出し配管を用いて天井面の SP ヘッドに連結されている。SP 巻き出し配管は、天井面に設置された SP ヘッドに連結するための配管として定義され、在来工法である配管接続によるものとフレキシブル配管による接続に分類される。これら SP 配管などの吊り支持配管は、地震動による天井との相対変位が最も大きい部材の1つであり、耐震性能の確保のため、地震時の挙動に対する措置を講じる必要がある。

文献²⁾によると、SP 設備の配水主管や配水管などの吊り下げ配管に関して、呼び径 65A を超える配管の耐震対策には、「地震動によって建築構造躯体を介して配管系に生じる応答加速度、強制変位に対

して十分な振れ止め措置を講じ、構造躯体と一体的に応答すること」と示されており、呼び径が 50A 以下の小口径配管は、「耐震対策の規定はなし」とされている。

東日本大震災後に改訂された文献³⁾においても、「40A 以下の配管は耐震支持の適用除外とした。」と示され、加えて天井に接続される SP 巻き出し配管の耐震対策は、「フレキシブル配管は±200mm 程度の変位に対応できる長さとするものを選定することが望ましい」と示されている。しかしながら、SP ヘッド周辺の配管は 25A・32A・40A を用いて構成されるため、構造躯体と同様な挙動を示す配水主管、配水管に対する変位差や継手部へのせん断力が要因となり、損傷被害が過去の大規模地震の際に確認されている。文献²⁾、³⁾の規定によると、大口径配管に比べ 40A 以下の小口径配管の耐震対策に関する明確な記述やその判断材料も少ない。

評価建物における SP 設備の概略の耐震性能は、電子計算機上での数値計算により評価することもできるが、地震時の天井材に取り付けられた SP ヘッド周辺の挙動が複雑であるため、本実験は SP 設備末端部を実大で再現し、フレキシブル配管の耐震性や変位追従性について実験的に評価することにより、数値計算に展開するための基礎資料を得ることを目的とした。

3. 実験概要

3.1 振動台概要

表1に加振装置の仕様、図1に振動台および上部フレームの概要を示す。実験で使用した加振装置は、水平1方向(長辺方向)に加振可能な振動台(幅 4,000mm、長さ 6,000mm)であり、荷重出力は±

^{*)} 工学院大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程
(〒163-8677 新宿区西新宿1-24-2)

²⁾ 工学院大学建築学部まちづくり学科 准教授・博士(工学)

³⁾ 工学院大学 名誉教授・博士(工学)

^{*)} Graduate Student, Kogakuin Univ.

²⁾ Assoc. Prof., School of Architecture, Kogakuin Univ., Dr. Eng.

³⁾ Prof. Emeritus, Dept. of Architecture, Kogakuin Univ., Dr. Eng.

200kN、速度は±500mm/s、最大ストロークは±1,250mm で、主として超高層建築物の長周期地震動を再現することを目的としている。振動台上には、構造躯体と想定した振動台フレームから 1,200mm 下部にシステム天井(シングルライン工法)を設置し、評価建物の既存状況を再現した。また、SP 巻き出し配管の振動性状について評価を明確にするため、天井材の揺れによる SP ヘッドへの衝突現象を防止することを目的に、クリアランスは設けず、天井下地材を振動台フレームに堅固に設置した。

表 1 加振装置の仕様

	項目	仕様
加振装置	加振方向	水平 1 方向(長辺方向)
	荷重出力	±200kN
	速度	±500mm/s
	最大ストローク	±1,250mm

図 1 振動台及び上部フレームの概要

3.2 計測概要

計測装置として振動台フレームの上部および試験体の枝管端部の 2 箇所サーボ型加速度計^{注 1)}を設置し、加振方向の加速度を 0.01 秒間隔で計測した。また、SP 巻き出し配管(枝管端部)の振動性状を把握するため、応答加速度は、加速度計の計測データに対して、高周波数成分(10Hz 以上)を除くフィルター処理を行い、変位はフィルター処理後の加速度データを二階積分することで算出し、振動台フレームの上部と試験体の変位差を相対変位とした。

3.3 試験体概要

図 2 に SP 設備末端部と実験での評価範囲、表 2 に試験体の概要、図 3 に試験体の設置条件と実験条件、図 4 に自由振動を示す。評価建物における SP ヘッドは文献⁴⁾の規定に基づき、正方形配置の 3,200mm 間隔で設置されており、その SP 設備末端部の概略を示したものが図 2 である。枝管および SP 巻き出し配管に関する評価は、配水主管や配水管の地震時振動による影響を考慮する必要があるが、水平力に対する SP ヘッド周辺の挙動特性を把握するため、文献²⁾³⁾に示される耐震対策に基づき呼び径が 50A 以上の配管は構造躯体の振動に対して共振増幅しないものと仮定し、枝管から SP 巻き出し配管を介した SP ヘッドまでを実験の対象とした。

図 3 のように試験体は、評価建物の施工調査を基に、振動台に設置可能な長さ 2,460mm の枝管を振動台フレームから 800mm 下部に吊りボルト 2 本を使用し、吊りバンドを用いて吊り下げて設置した。その際は、吊りボルトを振動台フレームにシングルナットで固定し、剛接合と境界条件を与えた。また、SP ヘッドは、枝管端部から水平方向に 800mm と立ち下がり部分の長さが 400mm の位置に設置されて

おり、SP 巻き出し配管の長さは、枝管端部が管軸直交方向に 200mm 変位した際の SP ヘッドまでの直線距離である 916mm を満たす規格長さ 1,100mm のフレキシブル配管を選定し、SP ヘッドは天井の野縁受けに金物を用いて固定している。なお、枝管内に充水されている水

※振動台実験は 図2内を再現した。

図 2 SP 設備末端部と実験での評価範囲 (単位: mm)

表 2 試験体の概要

	枝管	SP 巻き出し配管	吊りボルト
材料、規格	SGP、25A	SUS316	w3/8
長さ	2,460mm	1,100mm	800mm
質量	7.1kg(2.9kg/m)	1.0kg(0.91kg/m)	-
総質量	8.1kg

図 3 試験体の概要と実験条件 (単位: mm)

の重量は、それに相当する鉛テープを均等に取り付けて考慮した。

図4では、試験体の固有周期を把握するため、枝管端部(加速度計設置位置)に初期変位 20mm を X 方向(管軸直交方向)に取り、加力解放により試験体を自由振動させた。計測の結果から試験体の固有周期は 0.3s、固有振動数は 2.73Hz と算出され、枝管固定部から枝管端部において、同位相で枝管端部の振幅が大きい振動が再現された。

図4 自由振動

3.4 入力波概要

図5～図7に振動台実験に使用した各入力波の概要を示す。入力波は、地震波を2条件と漸増正弦波を使用した。各図中の(a)は、振動台フレーム上に設置した加速度計の計測データを、(b)は入力地震動に対する試験体の振動性状を把握するため、それらの計測データ

(a) 入力加速度

(b) 振動台フレームの加速度フーリエスペクトル

図5 入力地震波(東北地方太平洋沖地震)の概要

(a) 入力加速度

(b) 振動台フレームの加速度フーリエスペクトル

図6 入力地震波(首都直下型地震)の概要

に対して、分析ツール(高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transformation))により、各入力波の卓越振動数を求めた。

図5は、東北地方太平洋沖地震時に評価建物の29階床で観測した応答波⁵⁾を示したものである。周波数特性として、経過時間約150秒を境にそれ以前では1Hz、以降は0.3Hzが卓越する入力波となっている。東北地方太平洋沖地震時のSP巻き出し配管の長周期地震動による長く、大きな揺れに対する配管の振動性状の把握と変位対応性について検証を行う。

図6の入力条件では、評価建物の首都直下型地震を想定した強震動予測⁶⁾の地震動として、立体フレームモデルによる弾塑性解析⁷⁾から得られた29階床の揺れと想定される波形を入力波として用いた。短周期地震動による評価建物における配管の振動性状の把握、SP巻き出し配管の変位対応性についての検証を行う。

これら地震波に加えて、一定の規則性を持ち振幅を続ける構造躯体に対するSP巻き出し配管の振動性状の把握を行うため、図7に漸増正弦波を入力波とした。入力周波数^{注3)}は、枝管単体^{注4)}を自由振動させることによって算出した固有振動数1Hzとしたが、振動台の性能上、3Hzの成分も持つ入力波となっている。

(a) 入力加速度

(b) 振動台フレームの加速度フーリエスペクトル

図7 漸増正弦波の概要

4. 実験結果

4.1 各地震波におけるSP配管の振動性状

文献⁸⁾を参考に、各地震波における試験体の振動性状を把握するため、図8の(a)に東北地方太平洋沖地震入力時、(b)に首都直下型地震入力時の試験体加速度フーリエスペクトル比を示す。

地震波(東北地方太平洋沖地震)入力時の卓越振動数は0.3Hzと1Hzであった(図5)のに対して、SP巻き出し配管(枝管端部)は3.39Hzで振動していることが分かる。また、地震波(首都直下型地震)入力時の卓越振動数は1Hzであった(図6)のに対して、SP巻き出し配管(枝管端部)は3.01Hz及び、入力加速度が大きいことに対応して、約1.2Hz～1.5Hz付近も卓越している。各入力により試験体の卓越振動数は異なるが、自由振動にて算出された試験体の固有振動数2.73Hzに近い値で振動している。

各地震波における振動数特性を踏まえ、図9に各地震波入力時のSP巻き出し配管(枝管端部)の復元力特性を示す。地震波(東北地方太平洋沖地震)におけるSP配管の最大応答加速度は約623gal、

最大相対変位は約 19mm であり、SP 巻き出し配管に損傷は確認されなかった。また、応答加速度と相対変位の関係も概ね線形であることや地震波の卓越振動数と試験体の固有振動数の違いにより、長周期かつ振動時間が長い特性を持つ地震動に試験体の変位が追従しており、SP 巻き出し配管は余長範囲内で挙動していた。

図 9 (b) の地震波（首都直下型地震）における試験体の最大応答加速度は約 1,911gal が計測され、最大相対変位は約 109mm が算出された。入力加速度がピークである経過時間 30 秒付近において、試験

(a) 地震波（東北地方太平洋沖地震）

(b) 地震波（首都直下型地震）

図 8 各地震波における試験体の加速度フーリエスペクトル比

(a) 地震波（東北地方太平洋沖地震）

(b) 地震波（首都直下型地震）

図 9 各地震波における復元力特性

体は弾塑性応答を示しており、履歴ループは加振時の変形を減らしているため、フレキシブル配管は耐震性能を増す働きをしていることが分かる。短周期地震動で加速度が大きい入力に対しても SP 巻き出し配管に損傷は確認されなかった。

4.2 漸増正弦波における SP 配管の振動性状

4.1 のような地震波の入力では、入力波と試験体の固有振動数の違いにより、SP 巻き出し配管（枝管端部）に発生する負荷は一時的なものであった。そのため、継続的な加振による最大負荷での SP 巻き出し配管の最大相対変位と応答倍率を把握することが数値計算へ展開するために必要とされる。

図 10 に SP 巻き出し配管（枝管端部）の復元力特性を示す。図 10 は漸増正弦波において、最大応答加速度が計測された前後 0.5 秒間（経過時間 66 秒～67 秒）のデータと最大相対変位が算出された前後 0.5 秒間（経過時間 76.5 秒～77.5 秒）のデータを分類して示した。最大応答加速度は約 2,141gal が計測され、最大相対変位は約 66mm が算出された。SP 設備末端部の過大な応答加速度やフレキシブル配管による振れ止め効果から、振動台に比べて、試験体の応答加速度は約 2.5 倍となった。各データともに、加速度と変位の変化は概ね線形の関係にあり、原点付近を通過するため試験体は地震動に対する復元力を有している。また、時間相互で比較すると、応答加速度に対する相対変位の関係に差異は少なく、剛性を応答加速度と相対変位の傾きで表すと、概ね同等の傾向を示しており、試験体の剛性が確保されている。SP 巻き出し配管は、過大な加速度で振幅を続ける入力においても、損傷は確認されなかった。

図 10 漸増正弦波における復元力特性

4.3 SP 巻き出し配管（枝管端部）の内挿評価

フレキシブル配管を用いたこれまでの試験体条件において、漸増正弦波では継続的に相対変位が算出されることから地震波での振動性状を内挿できていると考えられるが、SP 巻き出し配管特有の振動性状については過小評価となっている。よって、SP 巻き出し配管の内挿評価と数値計算の基礎材料となることを目的に、図 3 に示している試験体条件より、SP 巻き出し配管を取り除いた試験体での漸増正弦波による振動台実験を行った。

図 11 に漸増正弦波入力時のフレキシブル配管の設置の有無による SP 巻き出し配管（枝管端部）の復元力特性の比較を示す。図 10 は、両試験体条件における最大相対変位が算出された前後 0.5 秒間のデータを示している。フレキシブル配管を設置していない条件では、最大相対変位は約 97mm と算出され、履歴ループは示されず、フレキ

シブル配管を設置すると剛性が増し、履歴ループを描きながら挙動していることが分かる。SP 巻き出し配管における挙動の複雑さについては、フレキシブル配管を取り除いた試験体での最大相対変位 97mm との補完により数値計算に適用できるものとする。

図 11 フレキシブル配管の設置有無での比較

5. まとめ

本報告では、評価建物の SP 配管末端部を実大で再現し、フレキシブル配管の耐震性や変位追従性について実験的に評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・数値計算に展開するための基礎資料として、2 条件の地震波（東北地方太平洋沖地震、首都直下型地震）及び漸増正弦波によって、SP 配管末端部の振動性状を把握した。
- ・異なる周波数特性を持つ 2 条件の地震波の入力に対しても、余長範囲内で挙動しており、損傷は確認されなかった。
- ・規則性のある漸増正弦波においても試験体の剛性は確保されており、フレキシブル配管の有効性が示された。

本報告は、評価建物の SP 配管末端部における SP ヘッド周辺に限定した動的加力実験であり、本試験体周辺との境界条件を考慮した評価が必要とされる。今後は、これまでの実験データを基に、実大実験では再現できない配主管、配水管を含めた広範な SP 配管システムを電子計算機上でモデル化し、耐震性能と耐震補強、改修の有効性について、評価結果を報告する予定である。

謝辞

本研究は、工学院大学都市減災研究センター(UDM)の研究活動の一環として行ったものである。なお、久田嘉章教授、山下哲郎教授にご指導いただきました。また、本論文の作成に当たっては、志津えりか氏(研究当時大学院生、現(株)森村設計)、武田和也氏(研究当時大学院生、現(株)石本建築事務所)、矢ヶ崎啓介君(現大学院生)にご協力頂きました。ここに記して深謝します。

注記

- 注 1) サーボ型加速度計は、AS-301C2W6：株式会社東京測器研究所を用いた。
 注 2) 枝管端部（配水管側）は、配水管からの立ち下がり部のねじれ挙動などを考慮し、振動台フレームに固定した。
 注 3) 地震時において、SP 配管の破断に伴う地震被害の拡大を考慮した。
 注 4) 枝管単体は、図 3 の試験体条件に示す SP 巻き出し配管と枝管固定を取り除いた状態である。

本論文に関連する研究論文

- *1) 志津えりか、大橋一正、西川豊宏、山下哲郎、増田真也：建築の非構造部材・建築設備の耐震補強と改修に関する研究(その 1)，日本建築学会技術報告集，第 18 巻 第 38 号，pp. 249-254，2012. 2
 *2) 武田和也、西川豊宏、山下哲郎、大橋一正：事業継続計画策定における建築設備の地震リスクに関する研究(第 2 報)，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 21-24，2013. 9

参考文献

- 1) 建築設備技術者協会震災復興支援会議：東日本大震災による建築設備被害状況に関する調査報告書，pp. 8-16，2011. 10
- 2) 公益社団法人 空気調和・衛生工学会：新版 建築設備の耐震設計 施工法，pp. 98-102，2012. 11
- 3) 一般財団法人 日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針 2014 年度版，pp. 75-106，2014. 9
- 4) 財団法人東京防災指導協会：予防事務審査・検査基準Ⅱ 改訂 8 版，pp. 232，2008. 4
- 5) 久保智弘、久田嘉章、相澤幸治、大宮憲司、小泉秀斗：東日本大震災における首都圏超高層建築における被害調査と震度アンケート調査，日本地震工学会論文集，第 12 巻，第 5 号(特集号)，pp. 1-20，2012. 9
- 6) 田中良一、久田嘉章：首都圏にある超高層キャンパスの地震防災に関する研究(その 2)，首都直下地震の強震動予測，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)B-2，pp. 615-616，2007. 8
- 7) 島村賢太、山下哲郎、久田嘉章、鱒沢曜、星幸男：首都圏に建つ超高層キャンパスの地震応答と制震補強に関する研究(その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)B-2，pp. 475-476，2009. 7
- 8) 野田卓見、松島信一、川瀬博：長周期構造物の地震時挙動シミュレーションのための模型振動実験，日本建築学会構造系論文集，第 80 巻，第 716 号，pp1549-1577，2015. 10

[2016 年 2 月 2 日原稿受理 2016 年 6 月 27 日採用決定]