超高層建物におけるスプリンクラー設備の耐震性能に関する研究

建築設備　スプリンクラー　吊りボルト　数値解析 　　　　　　　　　池谷　勇祐\*　西川　豊宏＊\*

１．はじめに

1.1　過去の震災における建築設備の被害割合

図1に東日本大震災で報告された建築設備の被害割合1)を示す。建築設備の被害のうち、消防設備における被害は、最も少ない127件であったが、被害拡大を抑止する役割を担う消防設備が機能不能になった場合、二次被害の発生が懸念される。また、消防設備の被害割合では配管における損傷が半数を占めており、配管を有している消防設備は消火栓設備およびスプリンクラー(以下 SP)設備が挙げられる。

|  |  |
| --- | --- |
| 所在地／用途 | 東京都新宿区／教育施設 |
| 延床面積 | 約36,000m2(高層棟) |
| 竣工年 | 1989年7月 |
| 階数 | 地上29階，塔屋2階，地下6階 |
| 建物高さ | 142m |
| 構造種別 | 地上部：S造／B1F，B2F：SRC造／B3F～B6F：RC造 |
| 給水 | 上水：100Aで引き込み，B3Fにて貯水中水：65Aで引き込み，B6Fにて貯水 |
| 排水 | 上水，中水ともにB1Fにて排水 |
| SP方式 | 閉鎖型湿式方式 |
| SPヘッド | 熱感知式 |
| 消防用水量 | 150m3 |

表1　評価建物の概要

図1　建築設備の被害割合

建築設備

(1037件)

消防設備(127件)

給排水設備

(303件)

電気設備(188件)

空調設備

(419件)

20%

40%

60%

80%

0%

100%

40%

60%

80%

0%

100%

消防設備

(127件)

配管の損傷

(57件)

SP･泡消火ヘッド(24件)

被害割合[%]

20%

1.2　研究背景・目的

近年の震災では建築構造体の損傷が軽微であっても、建築設備の損傷が多数報告された。また、消防設備では、初期消火を担うSP設備の地震損傷が最も多い。内閣府は今後30年以内に首都直下地震を筆頭にした大規模地震の発生を懸念しており、各事業では関連する被害想定や対策が進んでいる。建物を対象とした事業継続計画においては、建築設備のハード面からの対策が効果的であり、建築設備システム固有の応答性状を考慮した被害予測及び対策案が必要である。

これらの背景から本研究では、超高層建物である工学院大学新宿キャンパス(以下 評価建物)を評価対象とし、数種類の間仕切りプランにおいて、数値解析による耐震性能及び耐震補強効果の予測を目的とする。

　\*　 工学院大学　建築学部　建築学科　学部4年

\*\*　工学院大学　建築学部　まちづくり学科　教授

２．評価建物概要

2.1　建築及び設備概要

表1に評価建物の建築及び設備概要を示す。評価建物は、東京都新宿区に所在する地上29階、地下6階の超高層建築であり、給水設備は高置水槽方式、排水通気設備は重力式である。評価建物では、上水と雑用水がそれぞれ引き込まれており、低層系統(B6～6F)、中層系統(7～17F)、高層系統(18～28F)の3系統にそれぞれ給水される。また、SP設備は、配管内に充水される湿式が採用され、地下6階のSPポンプにより、低層系統、中層系統に圧送され、16階の中間水槽を介して、SPブースターポンプにより、高層系統に圧送される。

2.2　基準階平面における評価範囲

　図2に評価建物における本研究の評価範囲を示す。評価建物は両端にコアがある平面方式となっており、SP配管は建物東側の縦管より各階のSP横走り配管に分岐し、西側に向かって設置基準に基づき施工されている。評価範囲の平面プランは様々で各階用途によって簡易的な間仕切りがあり、レイアウトの変更を容易にすることができる。

:配水主管　　　:配水管　　　:評価範囲

図2　評価範囲及び基準階平面図

３．回転角による吊りボルトの耐震性能

3.1　実験概要

　3次元方向に加振可能な振動台上に建物躯体を想定したフレームを堅固に設置した。また、試験体は文献2) 3)を参考に耐震支持を必要としない条件下でボルトの径、吊り長さ、錘の重量の3つの要素を変更し、加振を行った。吊りボルトの径は、M6、W3/8、W1/2の3種類、吊り長さは150mm、200mm、300mmの3条件、錘の重量は2.5kg、7.5kg、25kgの3条件とし、これらを組み合わせ16パターンの試験体を作成した。

　入力波は、正弦波と神戸波の2波を用い、吊りボルトが破断に至るまで繰り返し加振を行った。正弦波は、最大負荷に対する耐震性能を把握するため300gal、500gal、700gal、900galの4種類を用い、試験体の固有振動数と同様の振動数で加振を行った。神戸波は、実際の地震動に対する耐震性能を把握するための入力であり、1軸方向、2軸方向、3軸方向へ加振を行った。

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

:配管径40A 　:配管径25A

3.2　回転角概要

図3に累積回転角の定義と算出式を示す。振動台実験により吊りボルトは、継続的な加振による損傷の蓄積で破断に至ることが確認されたため、吊りボルトの耐震性能評価を行う際には、損傷の蓄積を考慮する必要がある。そのため、既往研究4)を参考に吊りボルトの耐震性能を累積回転角により評価した。

疲労損傷度[％]

図3　累積回転角の定義と算出式

3.2　回転角概要

文献5) 6)を参考に評価建物に使用されている耐震支持を必要としない吊り支持配管を対象に、過去に発生した地震による吊りボルトの疲労損傷度を評価した。対象の地震動は、評価建物29階床で観測された2軸方向の床応答加速度波形であり、式(3)を用いて吊りボルトの疲労損傷度を算出した。なお、吊りボルト破断までの累積回転角は、振動台実験において正弦波300galで加振を行った試験体の結果を用いた。また、振動台実験にて3軸方向に加振を行った試験体の吊りボルト破断までの累積回転角は、1軸、2軸方向に加振を行った試験体に比べ、小さくなったことから、疲労損傷度算出の際には、0.62を乗じた値を吊りボルトの耐力値とした。

図4に支持配管径毎の吊りボルトの疲労損傷度を示す。評価建物における施工調査を参考に、満水時における配管径25A配管、満水時における配管径40A配管を吊り支持する吊りボルトの疲労損傷度を算出した。その結果、過去に発生した地震により、25A配管を支持する吊りボルトは8％、40A配管を支持する吊りボルトは56％の損傷が算出され、重量の重い40A配管を支持する吊りボルトの方が、疲労損傷度が大きい結果が算出された。

1998

1999

2000

2001

2002

2003

2004

2005

2006

2007

2008

2009

2010

2011

2012

2013

2014

2015

図4　支持配管径毎の吊りボルトの疲労損傷度

評価対象期間[年]

４．スプリンクラー配管の数値解析概要

4.1　配管境界条件

評価建物のSP設備の耐震性能を評価するにあたり、本研究では、地震動に対する配管の応答計算が可能な配管応力解析ツール注1)を用いた。配管のモデル化は、評価建物の竣工図を参考に行った。図5及び表2に数値計算モデルを作成する際の各部位の接合条件を示す。配管の支持状況や固定状況、防火区画貫通の力学的条件を数値計算上で精密に再現することには限界がある。なかでも、巻き出し配管として用いたフレキシブル配管と天井材を含む、SPヘッドとの接合部は、挙動特性が極めて複雑で、数値計算における境界条件の再現が困難であるため、荷重を負荷することで再現した。その他の境界条件は、上階床スラブと吊り材の接点(要素Ⅰ)をダブルナットによる剛節点、吊りバンドと配管の接点(要素Ⅱ)をピン節点、スラブ貫通部(要素Ⅲ)を剛接点、Line Stop設置箇所(要素Ⅳ)をY軸方向揺れ止めとし、ブレース設置箇所(要素Ⅴ)をX軸方向揺れ止めとした。また、モデルの耐震補強としては要素Ⅴのブレースを用いたが、ブレースはX軸方向のみの揺れ止めであり、管軸方向の揺れは生じる。

図5　数値計算の概略モデル

Ⅰ

Ⅲ

Ⅳ

Ⅴ

Ⅰ

Ⅰ

Ⅱ

Ⅱ



表2　各部位の接合条件

|  |  |
| --- | --- |
| 接合要素 | 接合条件 |
| Ⅰ | 上階床スラブと吊り材の接点 | 剛 |
| Ⅱ | 吊りバンドと配管の接点 | ピン |
| Ⅲ | スラブ貫通部 | 剛 |
| Ⅳ | Line Stop設置箇所 | Y軸揺れ止め |
| Ⅴ | ブレース設置箇所 | X軸揺れ止め |

4.2　許容応力度及び継ぎ手条件

耐震性能評価は、建築設備の耐震設計に関する指針において、配管の応力度合成法がASME（American Society of Mechanical Engineers）規格に準拠しているため、配管の許容応力度は、式(4)に示すようにASME B31.3に則り算出する。配管の引張強さを安全率3.0で除し、長期荷重に対する許容応力度を算出する。地震力に対する評価を行うため、短期荷重に対する許容応力度を長期荷重に対する許容応力度の1.5倍として算出した。

表5　想定プラン及び耐震補強概要

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| プラン | 概要 | 補強パターン |
| 1 | 間仕切りのない空間 | ①主管②主管･配水管③主管･枝管④主管･配水管･枝管 |
| 2 | 窓際1∼15室利用 |
| 3 | 窓際16室利用 |
| 4 | 窓際&中央部28室利用 |
| 5 | 構造体による散水障害 |

・・・式(4)



：許容応力度　　　[N/mm2]

：引張強さ　　　　[N/mm2]

：安全率(=3.0)　　[-]







表3に各継ぎ手条件の継ぎ手効率と応力度倍増係数について示す。配管の継ぎ手部では、直管部分に比べて、耐力値が低いことが懸念される。そこで本研究では、継ぎ手部に対しては、文献4）を参考に見かけ上の発生応力度を大きくすることで継ぎ手部分を再現した。応力度増倍係数と継ぎ手効率の2つが示されており、これらは同時に考慮する必要がないため、発生応力度が大きくなるほうを選択し、数値計算に反映させた。溶接接合では、継手効率0.9、ねじ継手部では、応力度増倍係数0.43を用いた。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 継ぎ手条件 | 継ぎ手効率 | 応力度倍増係数 |
| 溶接 | X線検査あり | 1.00 | 1.00 |
| X線検査なし | 0.90 |
| ねじ継ぎ手 | 転造ねじ | 1.00 | 0.43 |
| 切削ねじ | 0.60 |

表4　各継ぎ手条件の継ぎ手効率と応力度倍増係数

モデルの耐震性能評価には、式(5)により算出した許容応力度比を用いて行った。許容応力度比は、各接点に発生した応力度を許容応力度で除すことで算出している。評価建物のSP配管には配管用炭素鋼鋼管が使用されており、引張強さは290N/mm2であり、許容応力度は145 N/mm2である。

５．スプリンクラー配管の耐震性能評価

5.1　数値解析モデルプラン概要

表5に想定プラン及び耐震補強概要を示す。評価建物の各階のプランは様々であると共に、用途に応じて間仕切り壁の増減が可能で、レイアウトの変更を容易に行うことができる。しかし間仕切りプランによってはSPヘッドの増設が必要でそれに伴い配管径も拡大しなければならない。本研究では間仕切りプラン及び耐震補強の種類が耐震性能に及ぼす影響を評価すべく、5通りのプランに対し4種類の耐震補強パターンを試すことで、計20通りのモデルを作成し数値解析を行った。

評価建物は多くの階で窓際に研究室が配置され、中央部は通路兼共有スペースとなっているため、間仕切りの設置は窓際から行った。5つのプランはそれぞれ散水障害のないようSPヘッドを配置した。間仕切りのないプラン1のSPヘッド数は、最少の64個、枝管には25A配管と40A配管を使用した。間仕切りがある場合では、室数に応じてSPヘッド数が変化し、各プランのSPヘッド数は、プラン2では65∼70個、プラン3は現状のヘッド配置と同様の80個、プラン4では81∼100個を想定した。特殊階であるプラン5は、構造体による散水障害が生じている特殊階であり、想定SPヘッド数は103個と最多数で枝管には一部50A配管が使用されている。

5.2　耐震補強効果予測

図6にプラン別の枝管における耐震補強パターン毎の応力度比の割合を示す。解析結果は耐震補強パターン毎に特徴が表れ、補強パターン①,②では枝管が大きく揺れ、配水管からの枝管分岐部に許容応力度を上回る値が算出された。補強パターン③,④では枝管に設置したブレースにより枝管分岐部への応力集中はなくなり許容値を超える応力は算出されなかった。補強パターン①,②ではすべてのプランにおいて枝管にのみ許容値を上回る応力度が集中したため、枝管における応力度割合の変化をプラン毎に比較した。

補強パターン④

補強パターン③

補強パターン②

補強パターン①

許容応力度比の割合[％]

プラン5

60

80

40

20

100

プラン1

100

60

80

40

20

プラン2

60

80

40

20

100

プラン3

60

80

40

20

100

プラン4

60

80

40

20

100

　:0≦σr<0.2 :0.2≦σr<0.4　　:0.4≦σr<0.6

:0.6≦σr<0.8 :0.8≦σr<1.0 :1.0≦σr

図6　枝管における補強パターン別応力度比の割合

数値解析において応力度が算出される接点数は、モデル毎に異なるため、図6での補強パターン毎の比較には、モデル毎の枝管の総接点数に対し、許容応力度比(σr)を段階毎に百分率で表した。図6から、補強パターン①,②では何れのプランにおいても許容応力度比を上回る値が算出されているが、枝管に耐震補強を行った、補強パターン③,④では許容応力度比を上回る値が算出されていないため、耐震補強として枝管にブレースを設置することは有効であると予測できる。また、数値解析によって算出された時刻歴の変位量をもとに、3章で用いた手法により吊りボルトの増加損傷度を予測したところ、補強パターン③,④では何れも1％未満であったため、吊りボルトの予測損傷度も軽微であると予測できる。

６．まとめ

本研究で評価建物におけるSP配管及び吊りボルトの耐震性能評価を行い、以下の知見を得た。

・評価建物において、耐震補強を必要としない、40A以下の吊り支持配管に用いられている吊りボルトの損傷度は、最大56％程度であると予測された。

・20種類のモデルにおいて耐震性能を評価したところ、許容値を超える応力度は枝管に集中した。

・枝管に耐震補強を施した補強パターン③,④では、すべてのプランで低い応力度が算出されたため、吊りボルトの損傷も軽微であるため枝管への耐震補強は有効であると予測できる。

注記

注1)配管応力解析ツールには「AutoPIPE：㈱ﾍﾞﾝﾄﾚｰ･ｼｽﾃﾑｽﾞ」を用いた。

参考文献

1) 建築設備技術者協会 災害復興支援会議：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，pp8-34

2) 公営社団法人 空気調和・衛生工学会：建築設備の耐震設計　施工法,2012.11,　pp.276-278

3) 一般財団法人　日本建築センター：建築設備の耐震設計・施工指針,2014.9,　p.75

4) 吉田献一ほか：吊り式空調機器の落下再現実験,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集｛2012.9.5～7(札幌)｝,pp.2321-2324

5) 空気調和・衛生工学会便覧　第14版　4　給排水衛生設備編　,p.343,2010.2.28

6) 公益社団法人 空気調和衛生工学会:建築設備の耐震設計 施工法,p.104～106,2012.11.15