

機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発 ～設備施設の耐震性能向上～

建築設備 ライフライン 配管の耐力 設備補強

西川 豊宏*

1. はじめに

東日本大震災時において、首都圏の超高層建築を中心に観測された長周期地震動は、建築構造躯体よりもむしろライフラインを掌る建築設備の配管にて多種多様な被害が顕在化した。本年度の活動成果としては、そのような被害を教訓とし、先ず超高層建築の隅々まで配管されているスプリンクラー（以降、「SP」と称する）を対象に、耐震性能を数値計算により評価し、SP 配管を吊り支持する吊りボルトについても、これまでに収集した振動台実験結果に基づきその耐震性能を評価した。さらに、脆弱箇所耐震対策を施した際の効果を検証した。

2. SP 配管の耐震性能

2.1 数値計算概要

評価建物の SP 配管の耐震性能を既報（第 5 報）で再現した SP 立て配管及び SP 横走り配管のモデルに対して動的外力を入力し、配管応力解析ソフト^{注 1)}を用いた数値計算により評価する。図 1 に評価に用いた入力波形の一例を示す。評価建物では、首都直下地震を想定した構造躯体の弾塑性応答解析により、各階の応答加速度¹⁾²⁾が評価されており、EW（東西）方向に比べ NS（南北）方向に大きな加速度が算出される。そこで、数値計算に用いた入力波は首都直下地震時に評価建物で想定される各階の応答加速度波形とし、入力方向は NS 方向とした。なお、SP 立て配管については床スラブ貫通部、区画貫通部、U 字バンド固定部に、SP 横走り配管については区画貫通部、

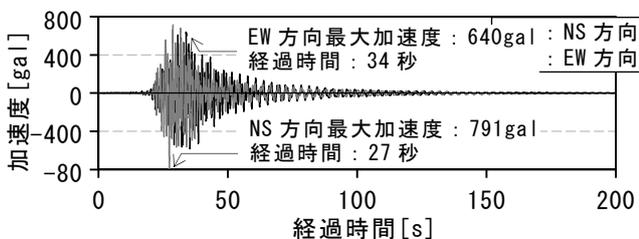


図 1 首都直下地震時の応答加速度波形（29 階）

吊りボルトの躯体への固定部に各階の応答加速度波形を入力した。

2.2 SP 立て配管の発生応力度

図 2 に SP 立て配管の応力分布図を示す。時刻歴応答解析の時間内における各部材の最大応力度を示した。応力分布図より、SP 立て配管の床スラブ貫通部及び SP 横走り配管への分岐部において応力集中が予測された。最大応力度は、階高が最大である 22 階の SP 横走り配管への分岐部に 11 N/mm^2 が生じたが、溶接継ぎ手部の許容応力度^{注 2)} 112 N/mm^2 に比べ極めて小さく、SP 立て配管は十分な耐震性能を有しているといえる。

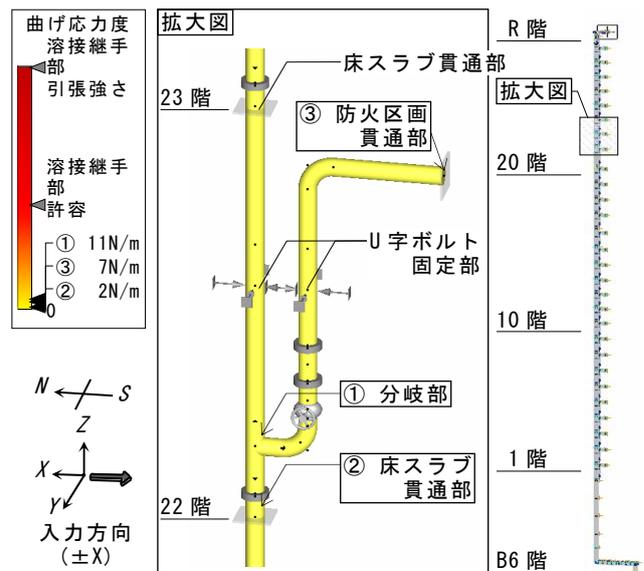


図 2 SP 立て配管における応力分布図

2.3 SP 横走り配管の発生応力度

図 3 に SP 横走り配管の応力分布図を示す。首都直下地震時に評価建物において、29 階床で最大応答加速度が生じることから 28 階を対象とした。時刻歴応答解析の結果、SP 横走り配管の応力度は、配水主管及び配水管に比べ枝管に大きく生じ、とりわけ枝管の曲がり部及び分岐部において応力集中が予測された。配水主管、配水管の応力度は、それぞれ 4 N/mm^2 、 32 N/mm^2 が生じたが、いずれも溶接継ぎ手部の許容応

* : 工学院大学建築学部まちづくり学科

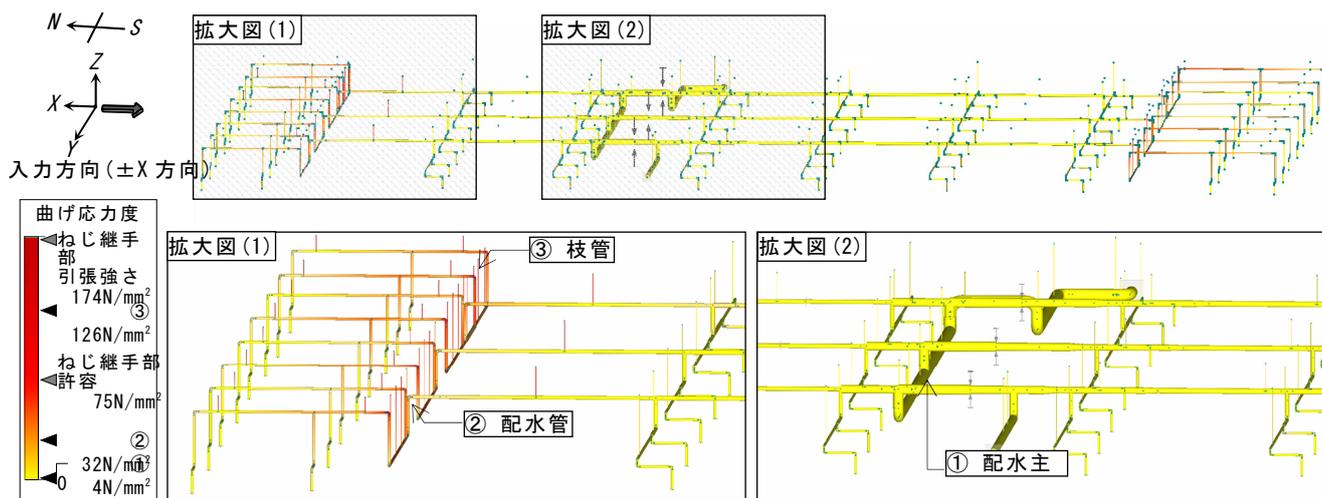


図 3 28 階 SP 横走り配管の応力分布図

力度^{注 2)}112 N/mm²よりも小さい。最大応力度は、枝管の曲がり部に 126 N/mm²が生じ、ねじ継手部の許容応力度^{注 2)}75 N/mm²より大きな応力度が生じた。しかし、SP 横走り配管全体でねじ継手部の引張強さ^{注 2)}174 N/mm²よりも大きな応力度は生じなかった。

3. SP 配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能

3. 1 吊りボルトの耐震性能に関する振動台実験

鉛直方向の揺れに対する吊りボルトの耐震性能の把握を目的とし、振動台実験を行った。既報(第 4 報)と同条件の試験体に対し、ランダム波(以下 神戸波)を用い水平 2 方向及び鉛直方向(以下 3 軸方向)へ加振した。図 4 に加振方向を変更した際の吊りボルト破断までの累積回転角^{※1)}を示す。図中には、振動台実験を同条件で 3 つの試験体に対し行いその平均値を示した。振動台実験の結果、神戸波を用い水平 1 方向(以下 1 軸方向)、水平 2 方向(以下 2 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概ね同等である。これに対し、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 軸方向、2 軸方向に加振を行った

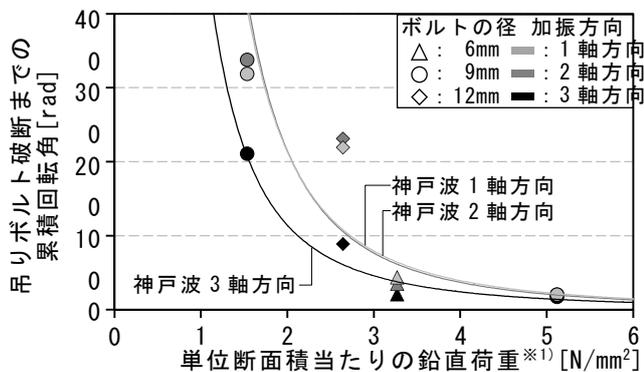


図 4 吊りボルト破断までの累積回転角

試験体に比べ平均で 6 割程度に小さくなった。このことから吊りボルトは、水平方向のみならず鉛直方向の揺れにより損傷することを示した。

3. 2 時刻歴応答解析概要

既報(第 4 報)では吊りボルトは瞬時的な力ではなく継続的な揺れにより損傷が蓄積し破断に至ることを示した。このことから、既存建物の吊りボルトは過去に発生した地震により耐震性能が低下していることが懸念される。そこで、本報では評価建物の SP 配管を吊り支持する吊りボルトを対象に、これまでの実験結果に基づきその耐震性能を回転角により評価した。その際、評価建物にて過去に観測された地震動^{注 3) 3)}(以下 観測地震動)による吊りボルトの回転角を時刻歴応答解析により算出することで、吊りボルトの耐震性能の低下を考慮した。なお、前章の評価にて評価建物の SP 配管は配管径 40A の枝管が脆弱箇所としてあげられることから、充水された配管径 40A の SGP 配管(以下 40A 配管)を吊り支持す

$$k = \frac{12EI}{L^3} + \frac{mg}{L} \quad \dots \text{式(1)}$$

k : 吊りボルトの水平剛性
 E : ヤング係数 (=205,000)
 I : 吊りボルトの断面二次モーメント^{注 4)} [mm⁴]
 L : 吊り長さ [mm]
 m : 吊りボルト 1 本当りりの配管の重量 [kg]
 g : 重力加速度 [m/s²]

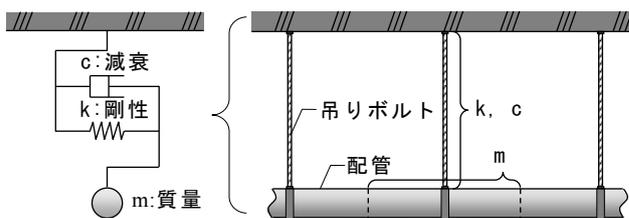


図 5 一質点系モデルの概要

る吊りボルトを対象とし、首都直下地震に対する耐震性能を評価する。入力波形はSP配管同様図1に示した首都直下地震時の29階床スラブ応答加速度波形とし、NS方向及びEW方向に入力した。

図5に時刻歴応答解析に用いたモデルを示す。剛性に関しては、式(1)を用い算出し、振動台実験にて継続的な加振による低下を確認したため減少率を与えた。また、減衰については吊りボルトの減衰係数を瞬間剛性比例型として与え、積分方法はNewmarkのβ法(β=1/4)を用い、刻み時間は0.01秒とした。

3. 3 観測地震動による吊りボルトの累積回転角

図6に40A配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能、図7に観測地震動による40A配管を吊り支持する吊りボルトの累積回転角を示す。文献⁴⁾を参考に吊りボルトの単位断面積当たりに加わる配管の鉛直荷重を算出したところ、40A配管は2.1 N/mm²であり、振動台実験結果^{注5)}に基づき吊りボルト破断までの累積回転角は198radと予測できる。時刻歴応答解析により算出した観測地震動による吊りボルトの累積回転角を総計すると23radとなり、吊りボルト破断までの累積回転角の12%に相当する。さらに、首都直下地震時には2.4radの累積回転角が算出され、観測地震動を考慮し総計は25radとなり吊りボルト破断までの累積回転角の13%にまで大きくなる。

4. 耐震対策の検討

4. 1 耐震対策の概要

評価建物において現状のSP配管は、枝管の曲がり部に最大応力度が生じた。そのため、脆弱箇所である枝管に耐震対策としてブレースを設置した際の耐震性能を検証した。既報(第5報)と同条件のブレース

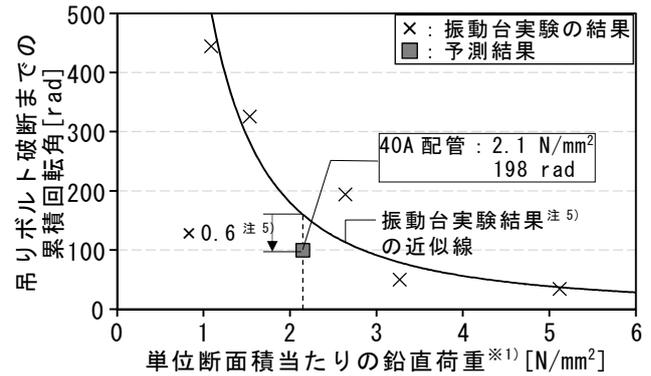


図6 配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能

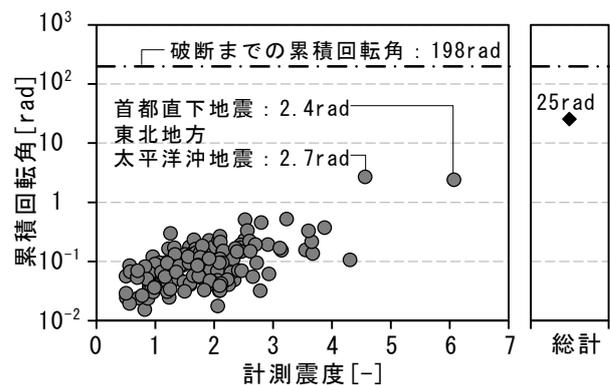


図7 計測震度と累積回転角の関係^{注6)}

ス^{注7)4)}を、枝管を吊り支持する既存の吊りボルト計8箇所に再現し、NS方向の変位を抑制した。

4. 2 耐震対策後の発生応力度

図8に耐震対策としてブレースを設置した際のSP横走り配管の応力分布図を示す。耐震対策としてブレースを設置することで、現状の評価において最大応力度が生じた枝管曲がり部にて生じる応力度は8 N/mm²と小さくなった。また、SP横走り配管全体で許容応力度より大きな応力度の発生は生じなかった。

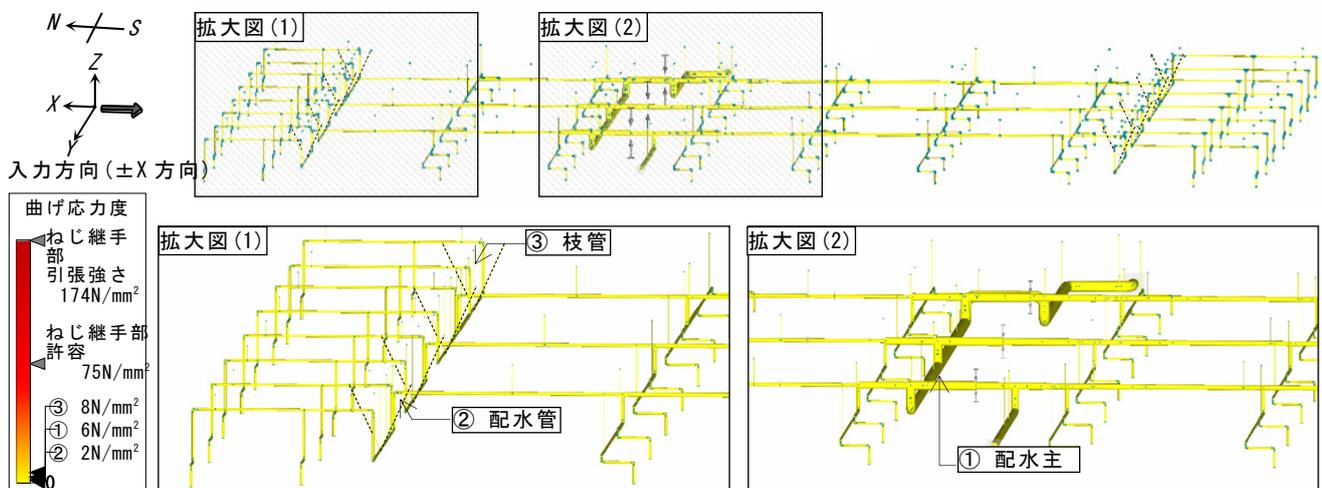


図8 耐震対策後横走り配管の応力分布図

5. 耐震対策前後の損傷確率

図9に評価建物における耐震対策前後のSP配管及び吊りボルトの損傷確率を示す。損傷確率は、既報（第1報）^{※5)}同様に文献⁵⁾を参考に算出した。その際、SP配管及びそれを支持する吊りボルトの耐力値の対数標準偏差^{注8)}は、それぞれ0.3、0.35とし、作用地震動の対数標準偏差^{注8)}は0.4とした。その結果、評価建物における現状のSP立て配管、SP横走り配管、吊りボルトそれぞれの最大損傷確率は、 $10^{-8}\%$ 、26%、0.01%となり、SP立て配管、吊りボルトに比べSP横走り配管が最大になった。なお、最大損傷確率は最大応力度が生じたSP横走り配管の枝管の曲がり部にて算出され地震リスクが大きいことを示した。対して、耐震対策としてブレースを施すことにより、SP横走り配管の損傷確率は変位量とともに小さくなり、その効果を示した。また、SP横走り配管の変位量が小さくなったことから、配管を吊り支持する吊りボルトに対しても対策の効果を期待できる。

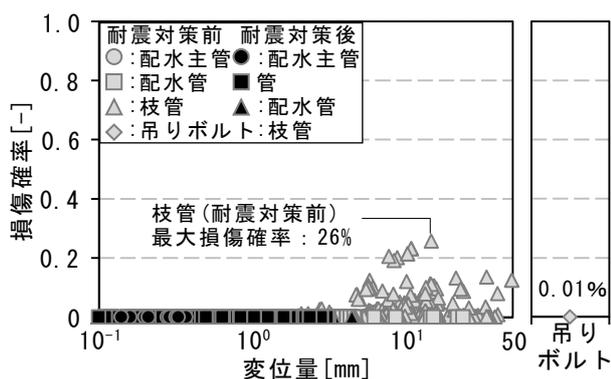


図9 SP配管及び吊りボルトの損傷確率

6. まとめ

評価建物のSP配管及びそれを吊り支持する吊りボルトを対象に、首都直下地震に対する耐震性能と損傷確率を評価し、地震リスクを分析した。以下に得られた知見を示す。

- 振動台実験より配管を吊り支持する吊りボルトは、水平方向のみならず鉛直の加振により損傷する。
- 首都直下地震に対する評価建物のSP配管及びそれを支持する吊りボルトの損傷確率は、SP横走り配管の枝管曲がり部で26%と最大となった。
- 耐震対策として枝管にブレースを設置することで、評価建物のSP横走り配管の枝管曲がり部の損傷確率は小さくなり、耐震対策の効果を示した。

今後は、消火設備のみならず、常用設備も含め、地震リスクに関する分析を行う予定である。

注記

- 注1) 配管応力解析は、AutoPIPE (楢ベントレイ・システムズ)を用いた。
- 注2) 配管における許容応力度及び引張強さは、文献⁴⁾においてASME規格に準拠しているため、ASME規格に基づき、安全率は3.5、継手効率は配管の直管部1.0、溶接継手部0.9、ねじ継手部0.6の値を用いた。
- 注3) 評価建物29階で1998年4月から2015年6月の期間に観測された床スラブ応答加速度波形全219波を対象とした。
- 注4) 吊りボルトの直径は、設置した試験体を自由振動させ得られた固有振動数より算出した7.1mmとした。
- 注5) 吊り長さ300mmを同条件として、吊りボルトの径、錘の重さを変更し、東北地方太平洋沖地震の際に評価建物29階にて観測した最大応答加速度³⁾と同等の加速度300galの正弦波を用い加振した際の振動台実験結果を用い、鉛直方向に加振した際の吊りボルト破断までの累積回転角は水平方向のみに比べ、小さくなったため0.6を乗じた。
- 注6) 気象庁の算出方法⁶⁾を参考に、観測地震動各々の計測震度を算出した。
- 注7) 文献⁴⁾p.160表3・19のNo. D-11を参考にブレースを再現した。
- 注8) 耐力値の対数標準偏差は、SP配管については文献⁵⁾を参考に仮定し、吊りボルトについては振動台実験に基づき算定した。また、作用地震動の対数標準偏差は文献⁵⁾を参考に仮定した。

本論文に関連する研究論文

- ※1) 米山嘉貴ほか：事業継続統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4報)吊りボルトの振動台実験結果に基づく耐震性能評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.189-192，2014年9月
- ※2) 武田和也ほか：事業継続統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5報)地震時におけるスプリンクラー配管の耐震性能について，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.193-196，2014年9月
- ※3) 島倉雅宗ほか：事業継続統計画策定を支援する建築の非構造部材・建築設備の地震リスクに関する研究(その9)数値計算によるスプリンクラー配管の耐震性能予測，日本建築学会大会学術論文集，2016年9月
- ※4) 矢ヶ崎啓介ほか：事業継続統計画策定を支援する建築の非構造部材・建築設備の地震リスクに関する研究(その10)実験結果に基づく建築設備配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能予測，日本建築学会大会学術論文集，2016年9月
- ※5) 志津えりかほか：事業継続統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1報)東北地方太平洋沖地震における水使用とその設備被害の評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.2333-2336，2012年9月

参考文献

- 1) 田中良一，久田義章ほか：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)首都直下地震の強振動予測，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，2007.8
- 2) 島村賢太，山下哲郎，久田義章ほか：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)弾塑性地震応答解析に基づく構造被害の予測，日本建築学会学術講演梗概集(東北)，2009.8
- 3) 久田研究室：工学院大学観測波形公開ページ(新宿キャンパス)，http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/new_hp/index.html，参照2016.1.7
- 4) 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，pp.103-105,160,314,276-278，2012.11
- 5) 遠藤透，中村孝明ほか：被害相関を考慮した建築設備の地震時復旧曲線の評価，日本建築学会技術報告集，vol.14，No.28，pp.503-508，2008年
- 6) 気象庁：計測震度の算出方法，http://www.data.jma.go.jp/svd/egev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html，参照2016.4.2