

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246094

研究課題名(和文) 吊り天井ならびに天井懐に設置された設備機器の耐震設計法に関する研究

研究課題名(英文) Seismic design method for suspended ceiling and facilities equipment

研究代表者

元結 正次郎 (Motoyui, Shojiro)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：60272704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：地震時における吊り天井および設備機器の被害を軽減することを目的として、既存の典型的な仕様の力学的性状を把握するための実験的・数値解析的研究を行った。吊り天井に対しては応力・変位を算定するための精算法ならびに簡便法を提案し、その妥当性を実験結果と比較することで示した。また、天井ボード単体の落下を引き起こすビスの頭抜け耐力やせん断耐力を定量的に明らかにした。設備機器については重大な損傷形式として吊りボルトの破断が挙げられ、この破断条件について整理した。また、ブレースが取り付けいた場合の地震時挙動について実験にて再現し、上記の破断現象が発生することならびに現状の仕様では不具合が生じうることを示した。

研究成果の概要(英文)：For the sake of mitigation for suspended ceiling and facilities equipment, the experimental and numerical studies are done to clarify the characteristics of typical style of them. For suspended ceilings, two types of accurate or convenient numerical methods are suggested to calculate the displacement and stresses and the validation is shown by comparison with experimental results. Furthermore, the pulling out strength and the shear strength of screws which are used for ceiling board to be attached to steel furring, are clarified quantitatively. For facilities equipment, the low cycle fatigue of a hanging bolt is considered as an actual serious damage type and the condition for such damage is summarized. Furthermore, the behavior of facilities equipment with braces is examined through the shaking table test and it is shown that the low cycle fatigue is occurred and the usual connection type of braces has some problems.

研究分野：建築構造

キーワード：天井 設備機器 耐震性能

1. 研究開始当初の背景

2001年の芸予地震以降、天井などの被害が注目され始めた。最も普及している鋼製下地在来工法天井に対する本格的な力学的性状に対する研究は、2003年の十勝沖地震における釧路空港ターミナルビル天井の大規模落下被害から開始されたと言える(参考文献1)。その中で、振動台実験および数値解析結果を報告し、天井段差部が脱落の引き金となる理由ならびに損傷発生する直接的原因を示している。さらに2005年宮城県沖地震における仙台屋内プール以後、天井の大規模落下の原因究明を目的とする研究がなされた。その中で最も重要な点は天井の大規模落下現象を室内実験で初めて確認することに成功したことである。これによって地震被害において見られる大規模な天井落下が必然的な現象として捉えられた(参考文献2)。2006年、日本建築学会では「非構造部材の地震・風被害軽減化特別研究委員会」が発足し、その傘下に「天井被害軽減化小委員会」が設置された。さらに同年、国土交通省国土技術政策研究所による「革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発/性能評価分科会」傘下に天井WGが設置され、地震時の天井の簡易応答予測および天井の耐震性能に関するクライテリアなどを整理している。2008年には国土交通省基準整備促進事業の一つとして「大規模空間を持つ建築物の天井脱落およびスリッリクラー設備の地震時機能維持等に関する調査」が採択され、勾配を有する天井の動的挙動あるいはスリッリクラーとの相互作用に関する振動台実験などが実施されている(参考文献3)。以上の研究では、天井を抽出した実験のみであったが、2009年に実施された独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターでの「E-ディフェンス鉄骨造建物実験研究」では、5層実大鉄骨建物の最上階に天井を設置することで、地震時の建物に設置された天井の動的挙動を明らかにするとともに、天井の落下挙動を再現することに成功している(参考文献4)。

東日本大震災では、主要構造体が無損傷に近い状態の建物においても天井ならびに天井懐に設置された設備機器の甚大な損傷・落下被害が発生し、天井等の耐震性能が極めて乏しいことが再確認された(写真1)。特に、今回の震災における天井等の被害では、これまでの地震被害とは異なる部位の接合金物の脱落や吊りボルト自体の破断・脱落、およびボードと鋼製下地との接合ビス部での頭抜けによる大規模な落下などの損傷形式が多数確認された。

天井の耐震性能に及ぼす部位の影響は天井システムの工法によって大きく異なる。工法は耐震的観点から2種類に分類される(図1参照)。1つは国交省による技術的助言等で提示されたものであり、天井面と壁との間に隙間を設けた上で天井面に作用する慣性

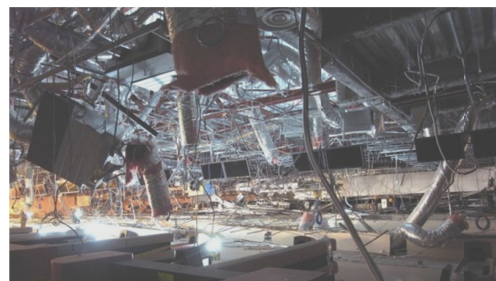


写真1 東日本大震災における天井等の全面的落下被害例(神奈川)

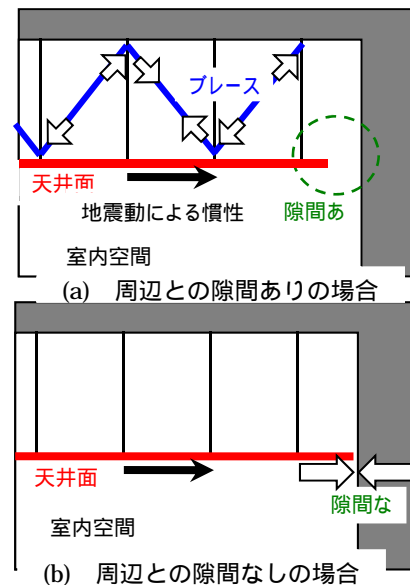


図1 工法の違いによる伝達機構の差異

力を、プレースを介して躯体に伝達するものであり(図1(a))、もう一つは天井面と壁との間に隙間を設けないことで天井面に作用する慣性力を壁(躯体)に伝達するものである(図1(b))。前者においては下地材の力学的特性が、後者においては吊りボルトや天井面の安定性が天井システムの耐震性能に大きな影響を及ぼす。両者とも今回の地震では被害を受けたが、前述した既往の研究によって鋼製下地在来工法天井の力学的特性について徐々に明らかにされてきてはいるものの、特定の接合金物に着目したものが殆どであったために、既往の研究成果だけでは今回の地震で発生した損傷形式を説明できないのが現状である。

参考文献

1. 中本康、元結正次郎、他：釧路空港ターミナルビル天井材落下に関する研究 その1～その5、日本建築学会学術講演梗概集、B-1、pp.883-890、2004
2. 倉本真介、高山正春、他：耐震性に優れた大規模在来天井工法の開発：その1 開発および実験概要、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、pp.505-506、2006
3. 稲井 慎介、渡壁 守正、石岡 拓、脇山 善夫、森田 高市、長谷川 隆、石原 直：学校体育館の振動特性調査 その2 天井に地震被害を受けた体育館の常時微動計測・強制加振実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、B- 査読無 589-590、2009
4. S. Motoyui : Japanese Post-Seismic Experience, CANTERBURY STRUCTURAL GROUP ; DARFIELD EARTHQUAKE MEETING ; Christchurch, NZ, 2010

2. 研究の目的

本研究では、天井等の耐震設計を行う過程で必要となる応力・変位の算定、応力の許容値の設定、設計用地震力の設定に関する具体的な方策の構築を目的としている。研究対象としては、天井ならびに天井懐に設置される空調用ダクト等の設備機器（以下、天井等）を対象とする。項目ごとに以下の点に重点をあてる。

応力・変位の算定に関しては、一部の接合金物に対して開発してきたすべり・脱落を評価可能な解析法を、天井等のすべての要素に適用することで、損傷以後の挙動も追跡可能な懸垂物用解析システムを構築する。ただし、上記の解析システムは精度あるは普遍性を優先しているために実用的ではない欠点を有している。そこで、天井の解析方法として実務者でも使用可能な簡易モデルを提示し、地震時の天井の挙動を所定の精度で推定可能とする解析方法を提案する。

また、応力の許容値の設定に関しては、天井面を構成する石膏ボードなどは湿気などの影響を強く受けることは知られているが、その影響を定量的に評価した研究は行われていない。また、その影響を踏まえたビス接合部の耐力を評価した研究も行われていない。そこで本研究課題では、天井面自体の環境変化に伴う材料的性質の変化あるいは天井ボードと下地材間のビス接合部のせん断耐力および頭抜け耐力を定量的に評価する。なお、施工誤差などによるバラツキの影響を考慮した確率的アプローチにより実効性のある設計用耐力を提示するべきであるが、これについては今後の課題とする。

設計用地震力の設定に関しては、重層構造に設置された天井等に対する設計用地震力の設定方法について提示したのち、体育館などの空間構造に設置された天井等にも適用可能な方法へと拡張・提示する。

3. 研究の方法

(1) 応力・変位の算定法に関して

これまでに研究代表者が構築してきた鋼製下地材の接合金物に対する解析法およびモデル化の考え方をを用いて天井等に用いられる接合金物に適用することで、それぞれの接合金物の解析法を融合した天井全体を解析可能とするシステムを構築する。また、本システムは設備配管・機器についても適用可能であり、この妥当性を振動台実験にて検証する。ただし、以上の解析システムは精度を重視しているために、実務者が設計現場で用いるには複雑すぎることから、振動台実験結果および本解析システムによる結果に基づき、天井全体の系を1質点系のモデルとして取り扱う簡便法について検討する。この場合には1質点系としてのバネは非線形バネとして取り扱うこととなるが、接合部要素実験にて得られた個々の金物の特性を踏まえた並列バネとして評価できることを、天井試験体を用いた動的实验結果と比較することで示す。

さらに、天井面が周囲の壁等に衝突するときの挙動を再現するための解析法をHertzモデルに基づき展開し、衝突時に発生する衝撃力なども把握できるようにする。

(2) 応力の許容値の設定法に関して

隙間を設ける工法の場合には、天井全体としての耐力は下地材接合部の耐力に強く依存し、その下地材接合部耐力についても明らかにされているのに対して、隙間を設けない工法の場合については、その損傷発生原因についてすら不明な点が多い。そこで、本研究課題では、天井ボードの圧縮性能およびビス接合部の頭抜けやせん断耐力を定量的に把握するために、ビスの押し抜き試験を実施する。このとき、石膏ボードなどは含水率の影響を大きく受けると考えられることから、恒温恒湿器にて含水率を管理し、乾燥状態・湿潤状態に変化させて行う。また、頭抜け耐力はビス頭の直径に依存すると予想されることから座金を用いることでビス頭径の効果を变化させた試験を行う。

(3) 設計地震力の設定法に関して

天井等に入力される加速度は、建物の屋根あるいは床に発生する応答加速度であり、これは建物に入力される地動による加速度と建物の応答性状によって決定される。この床レベルの最大応答加速度は、建物の固有周期ならびに刺激関数が既知であるならば、モード解析を適用することにより構造体を設計するための入力加速度を用いて容易に推定することができる。本研究では、まずビル建築のような重層構造物の場合に限定し、天井等の設計用地震力の算定方法の基本的な考え方を構築し、その後、重層構造物以外、例えば体育館など剛床仮定が成り立たない架構を対象として天井面に作用する慣性力をより簡便に算定する方法を提案する。

4. 研究成果

上述の研究目的および方法に則り、当該課題を推進し、以下の成果が得られた。

研究成果は大きく吊り天井の耐震性能に関する内容、天井懐に位置する設備機器の耐震性能に関する内容、および両者に共通する内容に大別されることから、それぞれの内容ごとに説明する。なお、(雑誌論文：*)などは当該成果に対応して発表した論文・発表であり、「5. 主な発表論文等」で示す雑誌論文などの番号を示す。

(1) 天井の耐震性能に関する成果

応力・変位算定法

吊り天井を耐震設計する場合に必要な水平剛性および水平耐力について実験的・数値解析的検討を行った。

天井と壁の隙間が十分にある場合には、天井の水平剛性および水平耐力は、接合部を含む下地材の剛性によって決定される。特に、剛性は、野縁受け・ハンガー・吊りボルトの影響が大きいことを明らかにした上で、剛性評価式を提示し、この妥当性を図2に示す試験体および過去に行った実験結果と比較す

表している。(雑誌論文:6 ならびに学会発表:2,8)

応力の許容値

天井面の力学的特性を確認するとともに(雑誌論文:2)、天井ボード自体の含水率を変化させた試験により、環境変化に伴うボードの力学的特性の変化を明らかにした(学会発表:6)。また、座金によってビス頭の直径を変化させた頭抜け試験においてビス頭の直径によって石膏部の損傷形式が異なることを見出し(写真3参照)、このことを踏まえて耐力評価することで、図8に示すようにビスの頭抜け耐力が定量的に評価されることを示した。さらに、頭抜け耐力を基に、ビス接合部のせん断耐力についても予測可能であることを示した。

設計地震力の設定法

重層構造物における天井面の慣性力の評価については応答スペクトル法を基に、これを簡略化した手法を提案した(雑誌論文:1)。また、地震時の被害が多発すると考えられている体育館を想定した架構を概念的にモデル化した問題(図9)について理論的な考察を行うことにより、天井面に作用する慣性力の評価を行った。このような架構の場合には図10に示すように、従来設定されている程度の屋根ブレースの剛性では剛床仮定が満足せず、その結果として天井面に入力される加速度は均一ではなくなることを、また、屋根面の変形による強制変位を天井面は受けることなどを定量的に明らかにした(雑誌論文:3)。

(2) 設備機器の耐震性能に関する成果

配管振れ止め金物の静的繰り返し载荷試験を行い、振れ止めの支持点と配管の重心位置のずれがある場合に、配管に大きな水平力が加わると、吊りバンドと振れ止め支持点の間の吊りボルトに大きな力が集中し、吊りボルトが破断する現象を再現した。このことから、配管の耐震性能を検討する上で、配管吊りバンドおよび振れ止め金物接続部の構造も重要であることを示した。さらに、建築設備に用いられる天吊り機器とそれに接続されるダクトならびに配管の地震時の応答を把握するために振動台実験を行い、天吊り機器とこれを支持する吊りボルト間に衝突現象が発生し、このことによって剛性が低下すること、また、ブレースを設けない場合の機器における共振による吊りボルトの破断現象発生することが実験的に再現された。また、機器類の崩落や吊りボルト破断に至る過程を評価するためのデータ収集がなされた(雑誌論文:5,7、学会発表:6)。

(3) 共通する内容としての成果

建物構造躯体から吊りボルトにて吊り下げられた天井等において東北地方太平洋沖地震で多数確認された吊りボルトの破断現象に至るプロセスや破断条件などについて検討を行い、吊りボルトの破断現象は吊り荷重、揺れの振幅(部材角)および回数にて規

定されることを明らかにした。ただし、実際

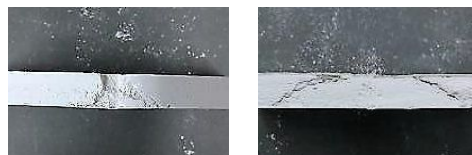


写真3 ビス頭の直径の違いによる損傷形式の差

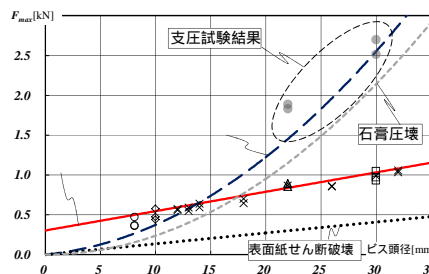


図8 ビスの頭抜け耐力とビス頭径との関係

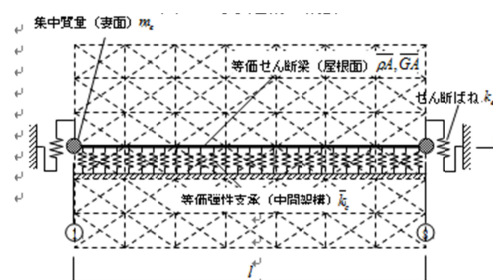


図9 概念化した解析モデル

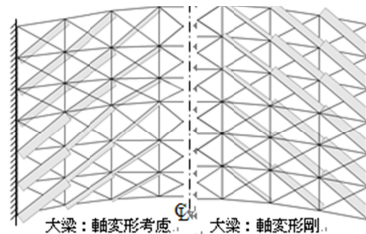


図10 屋根面の振動モード

の吊りボルトの応力状態は設置状態によっては単純なものでは必ずしもないが、本研究課題では吊りボルトが片持ち梁状態に限定して取り扱った。この点については今後の検討課題とする。なお、これらの成果については今後発表していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

1. 石原直、元結正次郎、脇山善夫: 床応答スペクトルの略算法に基づく非構造部材等の設計用地震力、日本建築学会技術報告集 第48巻、pp.511-514、査読有(2015)6月
2. 石原直、稲井慎介、森田泰弘、渡壁守正、脇山善夫、喜々津仁密: 鋼製下地吊り天井の天井面の曲げに関する力学特性、日本建築学会技術報告集 第21巻、pp.45-48、査読有(2015)2月

3. 金子健作, 元結正次郎: 鉄骨造平屋建てにおける屋根面柔性を考慮した水平方向振動特性の簡易評価手法、日本建築学会構造系論文集 NO.706 査読有 pp.1805-1812 (2014)12月
4. 元結正次郎, 佐藤恭章: 鋼製下地在来工法天井における野縁方向水平剛性評価法、日本建築学会構造系論文集 NO.703 査読有 pp.1395-1402 (2014)9月
5. 武田和也, 西川豊宏, 山下哲郎, 大橋和正: 建築設備における天吊り配管と吊りボルトの耐震性能に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会論文集, 208 pp.21-28, 査読有 (2014)7月
6. 小泉秀斗, 坂本有奈利, 久田嘉章, 山下哲郎: 振動台実験によるシステム天井シングルライン工法の力学特性および損傷評価に関する研究、日本地震工学会論文集, 14, 2, pp.144-163 査読有 (2014年)5月
7. 金恵英, 水谷国男, 橋本信, 元結正次郎: 吊りボルトに支持された建築設備配管の地震時の挙動に関する研究、構造工学論文集 Vol.60 pp.393-398 査読有 (2014)3月

〔学会発表〕(計26件)

1. Kazuhiko Kasai, Shojiro Motoyui, Yasuaki Sato: Ceiling Responses and Failures Observed from Shake Table Tests of a Full-Scale 5-Story Building, Second International Workshop on Seismic Performance of Non-Structural Elements、招待講演(2015)5月13日、Pavia(Italy)
2. 田中健一, 小泉秀斗, 鱒沢曜, 山下哲郎, 久田嘉章: シングルライン天井の耐震性と落下防止対策に関する研究 その1: 天井板の接着による落下防止対策の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(構造) 査読無 pp.967-968 (2014)9月14日 システム天井に関するもの他4編、神戸大学(神戸)
3. 石原直, 稲井慎介, 森田泰弘, 渡壁守正, 脇山善夫, 喜々津仁密: 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その1 全体計画と天井面の曲げ実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(構造) 査読無 pp.977-978 (2014)9月14日 他4編、神戸大学(神戸)
4. 角友太郎, 元結正次郎, 金子健作, 菅野嵩晃: 不可避的な隙間を有する天井の地震時衝突挙動に関する検討 その1 衝突に関わる基本特性および解析手法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(構造) 査読無 pp.987-988 (2014)9月14日 他4編、神戸大学(神戸)
5. 元結正次郎, 佐藤恭章: 天井の動的性状を踏まえた設計地震力について クリア

- ランスを有さない天井の動的挙動 その1、日本建築学会大会学術講演梗概集(構造) 査読無 pp.1043-1044 (2013)9月1日 他5編、北海道大学(札幌)
6. 金恵英, 橋本信, 水谷国男, 川島隆朗, 元結正次郎, 中井拓也: 地震時の建築設備用配管の挙動と損傷に関する実験(その2) 振動台実験による吊りボルト断裂現象の再現、日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学I) 査読無 pp.605-606 (2013)9月1日 他1編、北海道大学(札幌)
 7. Shojiro Motoyui, Yasuaki Sato: Impact force on JPN style of ceiling, US-JAPAN Joint Group Meeting of Earthquake Response of Non-structural Components, 招待講演(2013)4月22日、Reno (US)
 8. Shojiro Motoyui, Yasuaki Sato: THE BEHAVIOR OF CEILING WITH STEEL FURRING DURING EARTHQUAKES, Steel Innovations Conference 2013, 招待講演(2013)2月21日、Christchurch (New Zealand)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計0件)
取得状況(計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

元結 正次郎 (MOTOYUI, SHOJIRO)
東京工業大学・大学院総合理工学研究

科・教授

研究者番号: 60272704

(2)研究分担者

水谷 国男 (MIZUTANI, KUNIO)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号: 40468913

脇山 善夫 (WAKIYAMA, YOSHIO)

国土技術政策総合研究所・総合技術政策研究センター・主任研究官

研究者番号: 50339800

石原 直 (ISHIHARA, TADASHI)

独立行政法人建築研究所・建築生産研究グループ・主任研究員

研究者番号: 50370747

山下 哲郎 (YAMASHITA, TETSUO)

工学院大学・建築学部・教授

研究者番号: 80458992

西川 豊宏 (NISHIKAWA, TOYOHIRO)

工学院大学・建築学部・准教授

研究者番号: 80594069

(3)連携研究者 なし