

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360264

研究課題名（和文） 天井とスプリンクラー設備の耐震性に関する研究

研究課題名（英文） Study on seismic performance of ceiling and sprinkler system

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、近年の地震において多発している天井およびスプリンクラー設備の被害を受けて、それぞれの地震時の挙動を詳細に解析するための数値解析法を提示するとともに、それらの力学的特性を実験的・解析的検討を通して明らかにしている。特に、天井落下に大きく関与している天井下地材の接合金物の特性、天井の地震時の揺れを考える上で重要となる固有周期、地震時に天井面に発生する慣性力を負担する能力、および、スプリンクラー設備における接合部の破断特性などについて定量的に明らかにしている。

研究成果の概要（英文）：

In this project, the mechanical characteristics of ceiling and sprinkler systems which have had serious damages in the recent earthquakes are examined through results by experimental tests and numerical analyses. Particularly, we clarify the mechanical characteristics of joint metal parts in the steel furring of ceiling, the natural period of ceiling, the compressive strength of a ceiling surface and the fatigue behavior of plumbing in a sprinkler system quantitatively. Furthermore, the numerical method to simulate such systems accurately is developed in this project.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：耐震設計、非構造材

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 天井の耐震性に関する背景 2001年の芸予地震以来、天井面が大きな面積が一塊となって落下する被害が多発している。特に、2003年十勝沖地震による釧路空港ターミナルビルの天井落下および2005年宮城県沖の

地震による屋内プールの天井落下は、それまでの天井落下被害に比し甚大な被害であった。また、これらの被害事例が極めて深刻な問題として位置付けられた理由は、当該建物の主要構造体には殆どあるいは全く被害が発生していなかったにもかかわらず、天井が大

大きく損傷したためである。上記の2つの事例で被害を受けた天井は鋼製下地在来工法天井と呼ばれる同一の工法であったが、鋼製下地在来工法天井は現在最も使用されている工法であり、このことも天井落下被害を深刻化した。一方、鋼製下地在来工法天井の特性に関する力学的観点からの研究はほとんどなされておらず、地震時の被害を説明できる資料などは皆無に近く、そのために、鋼製下地在来工法天井の力学的性能の解明が緊急課題とされていた。

(2) スプリンクラー設備の耐震性に関する背景 スプリンクラー設備についても地震被害の報告は従来から少なからずなされてきた。特に、過去に使用されてきた鋼管タイプのスプリンクラー配管の仕様では地震時には散水口の損傷あるいは配管の接合部での破断が確認されていた。ただし、天井同様、被害発生メカニズムについては明らかにされていないために、

## 2. 研究の目的

天井とスプリンクラー設備との相互作用に関して予備実験を先行実施して、想定される損傷パターンを既に見出している。そこで本研究では、再度種々の組み合わせによる実験を通して相互作用による損傷パターンを整理するとともに、その発生メカニズムを明らかにし、最近の天井放射パネルなどの新たな天井付帯設備にも拡張可能とすることを目的とする。

天井落下に関しては、天井を吊るボルトのピッチや鋼製下地材の配置の各寸法について現在の標準仕様から逸脱した仕様の試験体をも含めた検討を通して仕様の差異が耐震性に及ぼす影響を検討し標準仕様以外の試験体の挙動を把握することにより、耐震性という観点から新たな標準仕様を策定するために必要な情報を構築すること、および、接合金物の客観的な脱落条件などを明確にし、天井落下被害の予測を可能とする数値解析法を構築することを目的とする。

3年間に於いて次に挙げる目的を達成することを目標とする。○天井とスプリンクラー設備の相互作用による損傷パターンの洗い出し、○天井とスプリンクラー設備の相互作用による損傷パターンの発生メカニズムの解明、○現在の標準仕様外までも対象とした接合金物の脱落条件を構築、○脱落条件を組み込んだ天井落下予測のための数値解析法の構築

## 3. 研究の方法

まず、天井とスプリンクラー設備の相互作用を把握するために、起振器を用いた天井と付帯設備から成る試験体の動的実験を実施する。この実験結果から相互作用による損傷

形式を洗い出す。このうちスプリンクラー設備に発生する損傷形式に対して損傷箇所を抽出した個々の要素実験を行うことにより損傷発生メカニズムを検討・解明する。並行して、既往の様々な要素実験を再現可能な数値解析モデルを構築し、本解析モデルを用いて、標準仕様から逸脱した天井の力学的特性を定量的に明らかにする。特に、標準仕様外を含めた天井の数値解析結果から各パラメータが天井の挙動、特に、天井の基本動的特性（固有周期および固有モード）および鋼製下地材の非線形挙動（接合部のすべり・脱落挙動、吊りボルトおよびブレースの座屈挙動）に及ぼす影響を整理する。

## 4. 研究成果

(1) 天井とスプリンクラー設備から成る試験体の動的実験では、天井とスプリンクラー設備から成る試験体に対して動的実験を行い、スプリンクラー設備に生じる損傷パターンを洗い出した。結果としては、鋼管仕様の場合にはスプリンクラーヘッド部と天井面との衝突によるヘッド部の損傷ならびに鋼管接合部での破断が観察され（写真1）、フルギョウ管仕様の場合にはスプリンクラーヘッド部自体はほとんど損傷がないながらも天井損傷によってヘッド部が天井懐に埋没してしまいスプリンクラーとしての散水機能が損なわれる現象が確認された（写真2）。

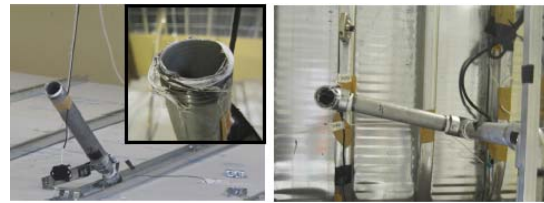


写真1 鋼管接合部での破断



写真2 スプリンクラーヘッド部のずれ

(2) 接合金物（クリップ）の脱落条件を組み込んだ天井落下予測のための数値解析法の構築を目的として、天井の下地材のクリップによる接合部を抽出した実験ならびに数値解析の再構築を行った。特筆すべき成果として、既往の研究での解析法に比し、クリップの接合方法、すなわち腹掛け・背掛け方法の如何に関わらず実験結果と一致する解析結果が得られるようになったことが挙げられる（図1）。実際の天井には両接合方法が用いられることから、本数値解析および力学モデルを用いることで天井の損傷時の挙動

が追跡可能となり、天井の耐震性能を客観的に評価することが可能となる。

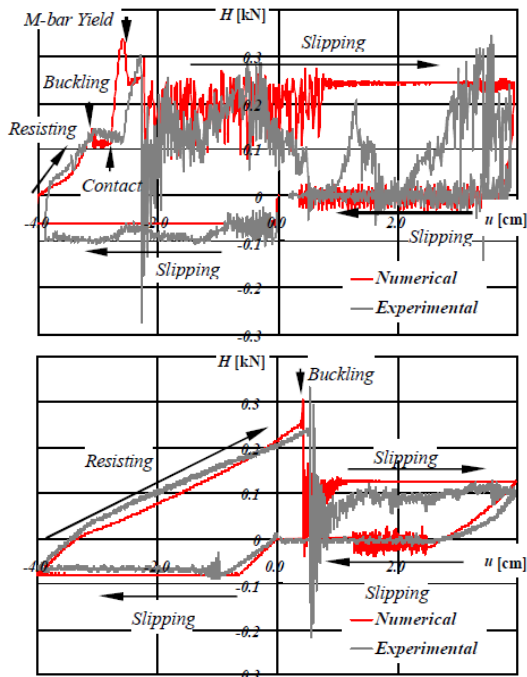


図1 種々のクリップ単体試験に対する数値解析

(3) 吊りボルトの長さおよびピッチをパラメータとする天井試験体による動的実験ならびに再現解析では、従来吊りボルトの長さを1,500mmとする試験体が一般的であったが、本研究では異なる吊りボルト長さ(500mm)を有する天井の動的実験を行うとともに当研究室で提案してきた天井の固有周期推定法の妥当性を検証した(図2)。その結果、本推定法は吊りボルトの長さが変化した場合にも十分な精度を有していることが確認された。

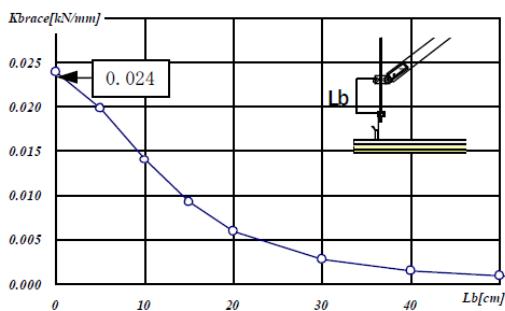


図2 天井の水平剛性とブレース偏心距離の関係

また、吊りボルト長さおよび吊りボルトピッチを変動させた数値解析により、それぞれが天井の耐震性に強い相関がある天井面の安定性に及ぼす影響を定量的に明らかにした(図3, 4)。特に、吊りボルトの材長とは単なる形態上の長さではなく、座屈長さ、言い換えれば吊りボルトの細長比によって

天井面の安定性が規定されることを明らかとした。このことは従来天井下地に設置される斜め振れ止めを水平力抵抗部材として位置付けられてきたが、天井面を安定させる効果をも有していることを示したものであり、天井の耐震設計上極めて重要な意味を有する。

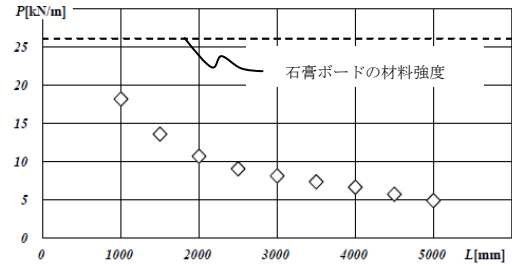


図3 天井面圧縮耐力と吊りボルト材長関係

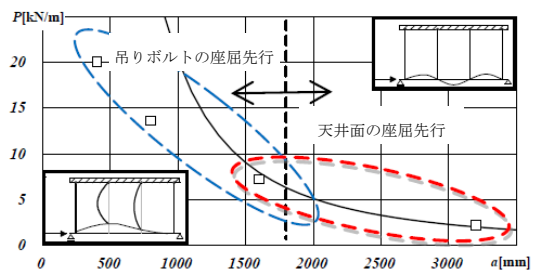


図4 天井面圧縮耐力と吊りボルトピッチ関係

(4) 損傷形式に対する損傷箇所を抽出した要素実験では、図5に示すようなスプリンクラー配管の典型的な接合部を抽出し、鋼管ネジ部での破断現象に関する実験を実施した結果、実際の地震被害に見られるような破断現象は低サイクル疲労破壊によって発生することを確認した(写真3、図6)。また、配管からの漏水は完全な破断に到る前の僅かな損傷レベルでも生じることが確認されたことから、損傷の定義としては破断ではなく漏水発生を以って定義する必要があることも明らかとなった。ただし、実際のスプリンクラー設備において漏水するためのデータ、すなわち、損傷発生確率分布などを求めるには、試験体数が不足しており、今後、試験体数を増やして実験する必要があることも確認された。

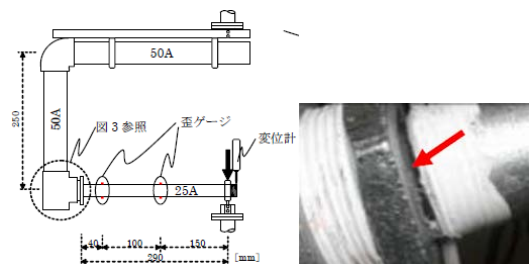


図5 試験体図

写真3 破断部



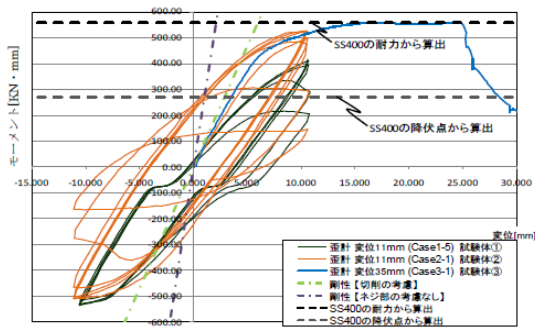


図6 繰返載荷時の鋼管の挙動

(5) クリップ接合部の要素実験を通してクリップ接合部耐力の定量的な把握を行うとともに、この接合部耐力のバラツキが天井の損傷に及ぼす影響を数値解析的に検討し、図7に示すような天井面に作用する加速度（慣性力）に対する損傷確率を fragility curve として提示した。また、提示した fragility curve の結果は過去の実験と比較することで妥当性の検証を行った。このような評価は設計時の安全率の設定にあたって工学的に重要な意味を有するものである。

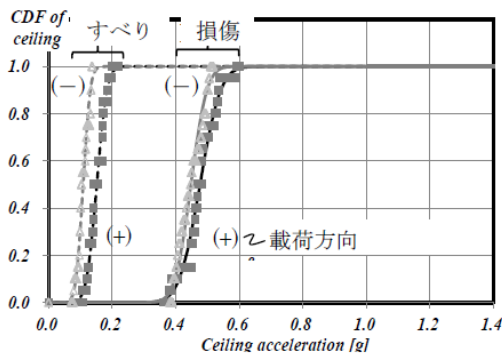


図7 天井の fragility curve

また、2011年3月11日に発生した東北地方北太平洋沖地震による天井ならびにスプリンクラーの被害調査を仙台、茨城、東京、神奈川を中心に行い、本研究で想定した形式による被害が多く発生していることを確認し、本研究の妥当性・必要性を再確認した。

さらに、上記地震被害を受けて設置された国土交通省による基準整備促進事業「地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討」（事業主体：一般社団法人建築性能基準推進協会）では、天井耐震計画WG主査として参画し、本研究にて培ってきた内容、特に、接合耐力および天井の剛性ならびに固有周期評価方法などを用いて、天井の耐震計画のあるべき姿について具体的な方策を提示した。このことは、本研究成果が単なる学術論文としてではなく、実効性のある知見として評価されていることを意味している。

## 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1件）

- ① 佐藤恭章、元結正次郎、モンテカルロシミュレーションを用いた鋼製下地在来工法天井の損傷評価、構造工学論文集、査読有、Vol. 58B、2012、pp. 527-531

〔学会発表〕（計15件）

- ① ニノ宮裕樹、水谷国男、菊地原雅則、石澤友和、内山博之、中井拓也、地震時のスプリンクラー設備の挙動とその損傷に関する研究 その3 スプリンクラーヘッド固定金物と天井下地との関係に関する振動台実験、空気調和・衛生工学会、2011年9月15日、名古屋
- ② 菊地原雅則、水谷国男、上田翔太、石澤友和、ニノ宮裕樹、中井拓也、建築設備機器の耐震性に関する研究 その1 防振された機器の地震時の挙動に関する振動台実験、空気調和・衛生工学会、2011年9月15日、名古屋
- ③ ニノ宮裕樹、水谷国男、菊地原雅則、石澤友和、建築設備のライフサイクルリスクマネジメントに関する研究 その2 スプリンクラー設備の耐震性能に関する振動台実験、日本建築学会、2011年8月25日、東京
- ④ 佐藤恭章、國崎洋、元結正次郎、モンテカルロシミュレーションを用いた在来工法天井の損傷評価 鋼製下地在来工法天井の損傷評価に関する研究 その2、日本建築学会、2011年8月25日、東京、他5編
- ⑤ Yasuaki Sato, Shojiro MOTOYUI、Ceiling Fragility of Japanese Ceiling Systems、Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society、, 2011年4月15日、Auckland, New Zealand
- ⑥ Shojiro MOTOYUI、Mechanical Characteristics of Metal Joint Parts in Japanese Style of Ceiling、8th International Conference on Urban Earthquake Engineering、2011年3月8日、Tokyo
- ⑦ Shojiro Motoyui、Japanese Post-Seismic Experience、CANTERBURY STRUCTURAL GROUP, DARFIELD (CANTERBURY) EARTHQUAKE MEETING、招待講演、2010年10月6日、Christchurch、New Zealand
- ⑧ 元結正次郎、佐藤恭章、川西拓人、船積宏彰、クリップ接合部の解析モデルにおけ

- るマスター・スレーブ節点の設定 鋼製下地在来工法天井の数値解析 その1、日本建築学会，2010年9月11日，富山、他5編
- ⑨ 木村貴之，水谷国男、地震時のスプリンクラー設備の挙動とその損傷に関する研究 その2 大規模振動台実験におけるスプリンクラーヘッドと天井との衝突現象に関する検討、空気調和・衛生工学会，2010年9月2日，山口
- ⑩ Shojiro MOTOYUI、Collapse Analysis of Structures in Nonstructural Component - Ceiling system in Japan、2nd International Workshops on Advances in Computational Mechanics、2010年3月31日、招待講演、Yokohama
- ⑪ Shojiro MOTOYUI、Yasuaki Sato、DYNAMIC CHARACTERISTICS OF JAPANESE STYLE OF CEILING、JOINT CONFERENCE PROCEEDINGS 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)、2010年3月4日、Tokyo
- ⑫ 菊地原雅則，水谷国男，元結正次郎，佐藤泰章、地震時のスプリンクラー設備の挙動とその損傷に関する研究、空気調和・衛生工学会，2009年9月16日，熊本
- ⑬ 後藤裕晃，元結正次郎，佐藤恭章，船積宏章：鋼製下地在来工法天井の動的性状 その1 最小ユニット試験体による鋼製下地在来工法天井の固有周期に関する一考察，日本建築学会，2009年8月28日，仙台、他8編
- ⑭ 菊地原雅則，水谷国男，元結正次郎，石原直、鋼製下地在来工法天井の動的性状 その7 スプリンクラー設備を有する鋼製下地在来工法天井の動的性状、日本建築学会，2009年8月28日，仙台
- ⑮ Shojiro Motoyui，Yasuaki Satoh，DAMAGE IN EARTHQUAKES AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF HANGING CEILING SYSTEM IN JAPAN、APCS，2009年5月29日、Nagoya

## 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

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：