Special edition paper

駅舎天井の落下防止対策

Fall Prevention System for Ceilings in Station



There was a fall victim of ceiling material in The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. We are promoting fall prevention measure from the point of view of safety of the station building. It takes many construction costs and construction period to the relocation of equipment in the ceiling bosom in Brace Construction Method that has been performed in the past. We have developed Support Construction Method as a countermeasure. It has explained the role and performance requirements of each member as an overview of Support Construction Method. It was subjected to static loading test and the dynamic vibration table tests in order to confirm the fall prevention performance of Support Construction Method. Effectiveness could be confirmed from the result. In addition, we were able to confirm the validity by analysis.

●キーワード:天井落下防止対策、サポート構法、実験、解析

1. はじめに

2011年3月11日に太平洋三陸沖で発生した東北地方太平 洋沖地震では、東日本一帯に甚大な被害をもたらした。そ の中で、非構造部材である天井仕上材の落下被害が報告 されている¹⁾。このような被害報告を受けて、駅をご利用にな るお客さまの安全性確保の観点から天井の耐震化を進めて いる。

2. 天井の耐震化構法

2.1 ブレース構法と落下防止構法

天井の耐震化構法については、構造の特徴からブレース 構法と、落下防止構法に分類している。

ブレース構法は図1(b)に示すとおり、天井ふところに組ま れている天井下地材に対して、ブレース材で補強する構法 である。この構法には、図1(a)で示しているとおり、現場で 天井ふところに設備機械等がある場合、ブレース設置が困 難となるという課題がある。ブレースを設置するためには設 備機械を別の場所へ移転しなければならないので、移転先



の調整や移転工事費や移転期間を要する。

その対策の一つとして落下防止構法に分類されるサポート 構法を開発した。サポート構法は天井の下面で、室内側(天 井仕上げ材の下方)から保持部材で支えるため、天井ふと ころの作業を大幅に軽減した。そのためブレース構法のよう な設備機器の移転などが必要になる可能性も大幅に軽減さ れた。

2.2 落下防止構法 (サポート構法)

図1 (c) にサポート構法の概要を示す。天井下地に耐震 補強を施すブレース構法と異なり、地震時の落下防止措置と して天井材を支持することが主な機能であるため、サポート 構法と名づけた。サポート構法は、駅で多く使用される仕上 材である金属系スパンドレルを対象とした。

脱落した天井を支持するために、保持部材を建築物の躯 体へ固定する必要がある。固定する箇所には、①柱等の 鉛直部材(図2(a))や②梁等の水平部材(図2(b))が考 えられる。①については、既往の開発成果2)があるため、 本開発では、駅コンコース等の柱スパンが大きい空間にも適 用性が高い②を深度化した。



図2 保持部材の固定方法

Special edition paper

開発構法は、室内側の天井面に設けた保持部材をワイ ヤー等の吊り材で梁等の上部躯体から吊り下げる構造形式 である。吊り材の両端は、図3に示すようなピン機構とし、吊 り材および保持部材が天井落下時の鉛直力に対して主に抵 抗し、水平力を極力負担しないようにすることで、構造の簡 素化を図っている。



図3 吊り材端部 (左:上部、右:下部)

保持部材は、天井を支持する重要な役割を果たすので、 サポート構法では、ケーブルやネットといった剛性の低い材料 ではなく、鋼材やアルミ材等の剛性の高い部材を用いること により、天井脱落後の垂下を抑えるようにする。また、保持 部材は、天井が脱落した際の衝撃荷重に耐える必要があり、 天井面直下に落下防止措置部材を設置した場合の天井落 下時の衝撃荷重3)を参考に、保持部材は天井の質量の3倍 の鉛直力に対して許容応力度以下となるようにする。また、 接合部は母材以上の耐力を持つように設計する。

図4に示すように、金属系スパンドレル1枚に対して、2本 の保持部材を配置する。



また、金属系スパンドレルと保持部材は図5に示すような接 続金具とビスを用いて緊結する。



3. サポート構法の性能確認実験

3.1 静的加力実験

天井脱落後の垂下を抑制できる剛性の高い保持部材とし て、駅での使用を想定した場合、現場での施工性や意匠性、 メンテナンス性を考慮すると、アルミ材が有効であると考えら れる。アルミ材に定尺の押出し型材を用いる場合、保持部 材が長くなると接合部が生じる。接合部には母材以上の耐 力が要求されるため、図6に示す接合部を検討し、曲げ試 験により性能を確認する。表1に試験体一覧を、表2に試験 で用いたアルミ材の材料性能を示す。



表1 試験体一覧

試験体No.	接合部材		
1	アルミ材30×90、M8ボルト×12		
2	突起付きアルミPL t=6、M8ボルト×4		
3	接合部無し		

表2 アルミ材 材料性能

材質	アルミニウム合金 A6N01S-T5	断面二次 モーパト	Ix	66. 26 × 10 ⁴
ヤング係数	70000MPa	(mm ⁴)	Iу	8. 44 × 10 ⁴
断面寸法	30×90	断面係数	Zx	14. 72 × 10 ³
単位質量	2. 44kg/m	(mm ³)	Zy	5. 62 × 10 ³

試験は、図7に示すように、両端ピン支持の長さ2mの試験体の中央部を一方向に静的に加力した。

図8に、載荷点の変位一曲げモーメント関係を示す。接 合部を設けた試験体はどちらも母材以上の曲げ耐力を有す る。主材と同じアルミ材を接合材とした試験体No.1は、アルミ 材同士のメタルタッチ部に滑りが生じ、変位30mm程度まで は母材に比べて剛性が低くなった。一方、アルミ材の溝に嵌



合する突起付きのPLを接合材として用いた試験体No.2では、母材と近い初期剛性を有することが分かった。



3.2 動的振動実験

開発構法において、吊り材で保持部材を支持した場合、 天井面及び保持部材の水平移動が拘束されていないため、 地震による構造躯体の振動により天井面が大きく振動する可 能性がある。保持部材で支持された天井面が、地震による 振動でどのような挙動となるか検証された事例は少ないた め、振動台実験により天井の地震時の挙動を確認する。

図9に振動台実験の試験体を示す。天井面の大きさは 4100mm×6600mmで、天井面は天井下地材である野縁と 野縁受けを固定するクリップの損傷による脱落を想定し、仕 上材 (アルミスパンドレルt=0.8)と野縁 (CS-19)をビスで固定し て構成した。天井面には設備等の設置による荷重増加を考 慮し、10kg/m²となるように重りを設置した。また、天井面は 照明や点検口の開口を想定し、スパンドレルを数か所切り欠 いており、天井面として連続しない状態での落下防止機能 が有効であることの確認を目的としている。

加振時の天井の状態は、吊り材に支持された保持部材の みで保持された天井面を想定し、吊りボルト等は設置せず、 構造躯体を模した鉄骨フレームよりφ6のワイヤー4本のみで吊 られた状態とした。

保持部材にはアルミ材を用い、X方向の部材については、 部材中央部に図6(a)に示す接合部を設けた。天井面と保 持部材は、図9(a)で示す箇所を接続金具とビスで緊結した。 吊り材や保持部材の接合部は、天井自重の3倍の鉛直荷重 でも損傷しないことを目標性能として、それぞれの仕様を決定 した。 図10、図11に実験前の試験体状況を示す。

実験では天井面が柱等と衝撃しない場合の挙動を把握す るため、振動台をX方向に水平1軸加振した。入力地震動 の選定にあたっては周波数特性が異なるJMA神戸、K-Net 柏崎とした。加速度を振動台に入力し、振幅については振 動台の性能にあわせて増幅させたものとした。また、建築基 準法による告示波 (JMA神戸位相) についても確認をしてい る。図12に入力地震動の加速度応答スペクトルを示す。





図10 実験前の試験体(天井ふところ)状況

Special edition paper



図11 実験前の試験体 (天井仕上面) 状況 C:告示波(極稀)建築物T=0.33秒応答波 D:告示波(極稀)建築物T=0.51秒応答波 10000 A: JMA神戸NS×1.5倍 [cm/sec²] B:K-Net柏崎NS ×1.2倍 加速度応答スペクトル ペクトル(極稀) 告示ス 100 A:JMA神戸NS×1.5倍 B·K-Net柏崎NS×12倍 C:告示波(極稀)建築物T=033秒応答波 D:告示波(極稀)建築物T=0.51秒応答波 - 告示スペクトル(極稀) 10 0.1 10 [秒] 周期 図12 入力地震動の応答スペクトル

3.3 実験結果と考察

図13にそれぞれの入力地震動で計測した加速度時刻歴 を示す。加速度はノイズをカットするため、10Hzのローパスフィ ルターによる処理を行った。

地震動の入力により、ワイヤーで吊られた天井面は振り子 のように挙動する。振り子の固有周期は質量によらず吊り長 さで算定でき、吊り長さ1000mmでは2秒程度となる。これは 加振の後半でみられる天井水平加速度の周期と一致する。 天井面の応答が最も大きくなったK-Net柏崎は、ほかの地震 動に比べ2秒付近の周波数成分が大きい。いずれの加振で も天井面の水平方向の応答に伴って鉛直動が発生しており、 最大鉛直加速度はK-Net柏崎入力で、2800cm/s²程度となっ た。また、天井面は大きく水平変位したため、天井面に設 置したレーザー変位計のターゲットが捕捉できず、データの 一部が欠損していたが、K-Net柏崎入力では500mmを超え る水平変位が観測された。今回の実験ではいずれの地震 動でも保持部材等に損傷は見られず、天井面は落下しなかっ た。全ての加振終了後の天井面の垂下量は図14のように 230mm程度であった。この試験体は、ワイヤーで4箇所吊ら れているため、4点の中央部分が垂下することになる。天井 面の垂下量としては、大地震後に発生しても大きな問題は発 生しない量といえる。



図13 加速度時刻歴



図14 実験後の試験体状況



4. サポート構法の解析

本章では、振動台実験の有限要素解析を行い、実験結 果と解析結果を比較する。

4.1 解析モデル

有限要素解析には、汎用非線形解析プログラムMarcを 使用した。図15に解析モデルの立面図を示す。解析では、 実験の天井試験体のうち、2本の吊り材ワイヤロープφ6)で 支持される1本の天井保持部材 (アルミニウム合金90×30)を 平面モデルで再現した。

解析における保持部材の剛性は、3章で実施した接合部 の曲げ試験の結果に基づき決定した。仕上げ材と野縁は、 天井面の開口で分断されているため、剛性に及ぼす影響は 小さいと考え、重量のみを考慮した。境界条件は、吊り元を ピン支持とし、振動台実験で天井吊り元の鉄骨フレームで計 測したX方向の水平変位を解析モデルの吊り元に強制変位と して与え、天井面の応答を計算し、実験結果と比較する。

保持部材の減衰は2%とし、吊り材の減衰は振動台実験 で得られたX方向の自由振動波形を元に決定する。図16に 天井面の水平変位の時刻歴を、図17に水平変位のフーリエ スペクトルを示す。フーリエスペクトルのピーク周期は1.9秒程



度であり、これは吊り長さ1mの振り子の固有周期2.0秒と概 ね一致する。変位波形の極大値を結ぶ包絡線を指数関数 exp(-hωt)で最小2乗近似して減衰を求めたところ、0.7% となり、この数値を吊り材の減衰として用いる。

4.2 実験結果と解析結果の比較

入力地震動がK-Net柏崎NS観測波の増幅波の場合について解析を行った。図18に解析結果の時刻歴を実験結果と比較して示す。また、図19に解析における天井中央部の水 平方向および鉛直方向の最大変位時の変形図を示す。

天井吊り元の鉄骨フレームで計測したX方向の水平変位 の時刻歴を図18(a)に示す。また、図18(b)に天井面で計 測したX方向の水平変位の時刻歴を、図18(c)に天井面で 計測したX方向の水平加速度の時刻歴をそれぞれ解析結果 と比較して示す。天井面の水平変位の時刻歴について、実 験では、天井がレーザー変位計の測定範囲を超過したため、 データが欠損しているが、データが取れている部分では、解 析結果は実験結果と概ね一致している。水平加速度の時刻 歴についても、振幅、位相ともに解析結果は実験結果を概 ね一致している。これより、吊り材で支持された天井が地震 動によって振動した場合の振り子運動の挙動を解析で再現 できることが分かる。

次に、保持部材に生じる地震時の鉛直動について検証す る。図18(d)に、吊り材下端に対する天井中央部の上下方 向の相対変位の時刻歴波形を示す。天井中央部では、吊 り材下端に比べて大きくたわんで振動し、振り子の固有周期 のおよそ半分の周期で鉛直変位が極大値となっている。ここ で、保持部材を考慮せずに、吊り長さ1mの単振り子の解析 を行い、吊り材下端の鉛直加速度を求めたところ、鉛直下 向きの最大値は1790cm/s²であった(図18(f))。単振り子の 解析の吊り材下端の鉛直加速度と比較して、保持部材を考 慮した解析から求めた天井中央部の鉛直加速度は大きく なっている(図18(e))。以上より、天井の振り子運動に伴う 上下動によって保持部材にたわみ振動が生じ、吊り材下端 に比べて、天井中央部の鉛直動が増幅したと考えられる。

実際の建物では、実験および解析とは条件が異なり、天 井周囲の壁や柱等が天井の揺れを拘束する。しかし、安全 側に考えると、今回の実験あるいは解析で検証したように、 天井脱落後の地震によって生じる落下防止対策の保持部材 の鉛直動についても考慮する必要がある。その際、吊り材 の長さやピッチ、支持部材の材料、入力地震動等によって 天井面の応答が異なるが、本報で述べた解析により天井の 挙動を適切に評価できる。



5. おわりに

駅コンコース等の金属系スパンドレル天井に対する落下防 止対策について、天井ふところでの作業が少なく、簡素な 構造形式のサポート構法を開発した。

サポート構法の地震時の安全性を確認するために、実物 大の天井試験体を用いた大型振動台実験を実施した。実 験において、極めて稀に発生する地震を入力波とした場合 でも、保持部材に生じる鉛直動は概ね3000cm/s² (3G)以下 であり、サポート構法によって天井の落下を防止することがで きた。

振動台実験の結果を有限要素解析により概ね再現することができ、今回実施した実験以外の天井の条件でも、地震時の挙動を解析により把握できることを示した。

参考文献

- 富樫ほか:仙台駅新幹線ホーム天井材落下に関する研究 (その1 仙台駅天井材の概要),日本建築学会大会学術講 演会梗概集(東海),2012年9月,pp.861-862
- 2) 小林ほか:スパンドレル天井の落下防止構法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集(北海道),2013年8月, pp.1039-1040
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか:建築物におけ る天井脱落対策に係る技術基準の解説,2013年10月
- 4) 防災科学技術研究所の運営するK-Netより、2007年新潟県 中越沖地震における柏崎 (NIG018)の観測データ