

Ｅ－ディフェンスを用いた大規模空間構造物に 設置された吊り天井の脱落被害再現実験

佐々木智大¹・青井淳²・田川浩之³・梶原浩一⁴

¹正会員 博(工) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

²修(工) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (同上)

³Ph.D 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (同上) (現 武庫川女子大学)

⁴正会員 博(工) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (同上)

1. はじめに

2012年に発生した笹子トンネルの天井板落下事故では、頭上に設置された重量物の落下により、重大な被害が生じることが広く知られるようになった。特に都市内高速の高架下では、高架下を走る道路の反響音を軽減させるため、桁下に裏面吸音板を取り付けることが多く、これらの落下による被害の発生も懸念される。

一方、東日本大震災では本震に加えて最大震度6弱以上の余震が多数回発生し、学校体育館などでは天井材等の非構造部材や照明等の設備機器の落下被害により、地震後の避難拠点としての機能を満たさない事例が報告されている¹⁾。このような被害は人命保護の観点から、あってはならない事象であり、最優先で対策されるべき課題であるといえる。これらの天井脱落被害を受け、国土交通省では平成25年7月に建築基準法施行令を改正（平成26年4月施行）し、「6m超の高さにある水平投影面積200m²超、単位面積質量2kg/m²超の吊り天井で、人が日常利用する場所に設置されているもの」を「脱落によって重大な危害を生ずる恐れがある天井」（特定天井）とし、脱落防止対策を義務づけることとした²⁾。

吊り天井の構造は、詳しくは後述するが、溝形断面を持つ軽量鉄骨下地材を金具で組み上げた下地構造の表面に、石膏ボードもしくは石膏ボードと岩綿吸音板を組み合わせた表面仕上げを貼り付けた部材を、吊りボルトで構造躯体からつり下げた構造である。この構造は高速道路高架下に取り付けられた裏面吸音板の構造によく似ており、吊り天井の脱落防

止対策は、裏面吸音板等の似た構造に対しても応用できると考えられる。

防災科学技術研究所では、大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害メカニズム解明を目的とした加振実験を実施した。本実験では、鉄骨造体育館を模擬する実大試験体の内部に吊り天井を施工し、振動実験により脱落被害の再現を行った。ここでは、実験より明らかとなった脱落被害メカニズムについて述べる。

2. 大規模空間吊り天井試験体

写真-1に試験体を、表-1に試験体の主な仕様を示す。この試験体は、小中学校で使用される鉄骨造体育館を想定して設計した。平面寸法は18.6m×30mであり、E－ディフェンス震動台を大きくはみ出す試験体である。試験体の屋根は、約10:3の勾配を持つ山形屋根とし、試験体の高さは最も高いところで9.09mである。試験体の設計では、標準層せん断力係数(設計水平震度にあたる) $C_0 = 0.2$ に対して許容応力度設計を行い、地震時保有水平耐力に基づく地震時安全性の照査を実施し、これを満たすことを確認した。この試験体の内部に吊り天井を設置して加振実験を実施した。吊り天井の動きを外部から確認できるよう、屋根、外壁材は省略した。ただし、屋根材の質量の分については、振動特性に与える影響が大きいことから、これと等価な質量を持つ鋼板(1m×1m×64mm)を大梁の上に60枚(30t分)設置し、試験体の応答が実際の体育館の挙動を再現できるよう調整した。

表-1 試験体の主な仕様

項目	仕様
構造、階数	鉄骨造 平屋建て
質量	約 250t(天井材を含む)
最大高さ	9.090m
平面寸法	30.0m×18.6m (6 スパン×6 スパン)
設計	許容応力度設計 ($C_0 = 0.2$) 地震時保有水平耐力に よる照査を実施
使用部材	柱(妻面除く)
	H400×200×8×13 (SS400)
	妻面の柱
	H250×125×6×9 (SS400) H300×150×6.5×9 (SS400)
	大梁
	H400×200×8×13 (SS400)
使用部材	小梁
	H248×124×5×8 (SS400)
使用部材	鉛直ブレース
	M20、M27 (SNR400B) T.B.付き (パイプ式)
使用部材	水平ブレース
	M16 (SNR400B) T.B.付き (パイプ式)



写真-1 実大体育館試験体

表-2 天井の仕様

設計水平震度	なし
吊りボルト	3/8"吊りボルト (3分)
吊り長さ	1500mm
吊り間隔	1147×1000mm
野縁受け	野縁受け 19 形 (38×12×1.2)@1000mm
ハンガー	JIS ハンガー加工品 (勾配天井用)
シングル野縁	シングル野縁 19 形 (25×19×0.5)@364mm
ダブル野縁	ダブル野縁 19 形 (50×19×0.5)@1820mm
クリップ	野縁 19 形用 クリップ
ブレース	なし
クリアランス	なし
天井仕上げ材	石膏ボード 9.5mm + 岩綿吸音板 9mm
天井質量	13.1kg/m ²

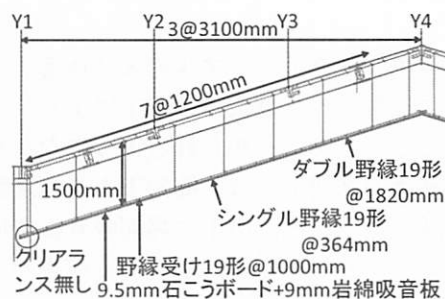
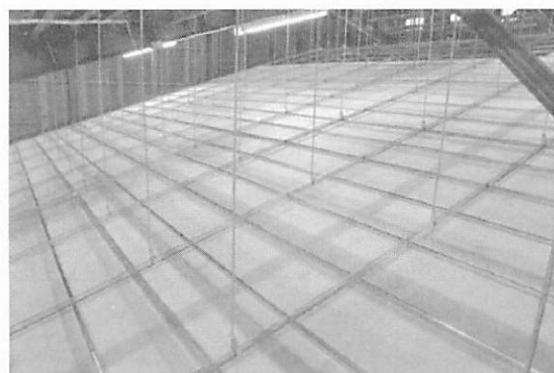
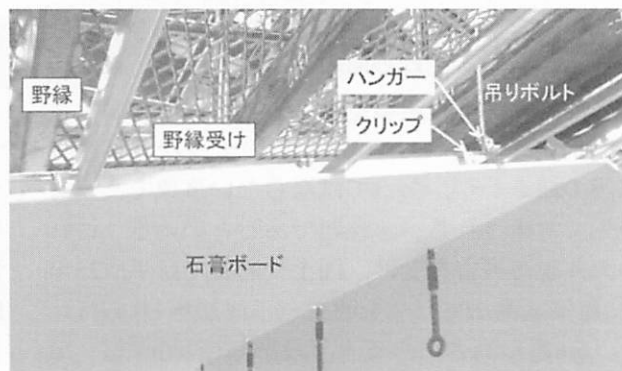


図-1 天井試験体に使用した部材



(a) 全景



(b) 接合金物と下地材

写真-2 天井試験体

表-2は天井の仕様である。また、写真-2、図-1に試験体内に施工した未対策天井を示す。未対策天井は、過去の地震被害で観測された脱落被害の再現によりその被害メカニズム解明することを目的として設計した。勾配は屋根勾配と同じとした。

使用する下地材は、既存の施設で一般的に使用されてきた天井と同様に、JIS規格の部材、金具を使用した。野縁(表面仕上げ材を貼り付ける部材)には、50×19×0.5(ダブル野縁)もしくは25×19×0.5(シ

ングル野縁)の断面を持つ溝形鋼を、野縁受け(野縁と交差する部材)には38×12×1.2の断面を持つ溝形鋼を用いた。なお、ダブル野縁は石膏ボードの境目と一致する1820mm間隔で配置し、シングル野縁は、ダブル野縁の間を364mm間隔で配置している。

野縁と野縁受けの間には、JIS規格に準拠したクリップと呼ばれる接合金物を使用した。この接合金物は、鋼板を加工した金物で、片手で握り込むだけで取り付けが可能となっており、施工性が高められ

ているが、強度が低く、脱落の原因の一つと言われている。

野縁受けはJIS規格相当のハンガーと呼ばれる接合金物を介してw3/8吊りボルトで吊り上げられている。このハンガーも、野縁受けをはめ込むだけで爪に係り固定されるよう作られており、施工性が高められている。しかし、天井が強い振動を受け、野縁受けが変形すると、この動きに併せてハンガーも変形し、野縁受けがずれて脱落すると言われている。

なお、天井の耐震対策では、揺れ止めの斜め部材（ブレース）を導入したり、壁との境界にクリアランスを設けるのが一般的であるが、この試験体では、耐震対策のない既存天井の脱落被害を再現するため、これらの耐震対策はすべて省略した。使用した部材の詳細は表-2に示したとおりである。

天井の吊り元となる母屋材はC形鋼（C-100×50×20）とし、これに吊りボルト用の穴を開けたアングル材を工場溶接にて接合し、w3/8吊りボルトで天井を吊り下げる構造とした。吊り元の仕様としては既存の天井に比べるとより頑丈な構造となるが、これは屋根を省略したことにより、吊り元の挙動の再現性に難があることから、この部分での損傷を避けるようにしたためである。吊り長さは1.5mとし、小中学校の体育館で設置される天井の中でも長い吊り長さを採用した。技術基準の仕様ルートによる照査では3mの吊り長さまでが適用範囲となっているが、ブレースの設置の難易度なども考慮した場合、1.5m程度の吊り長さが施工可能な最も長い例と考えたものである。吊りボルト間隔は、梁間(短辺)方向は1147mm（屋根面沿いに1200mm）、桁行(長辺)方向は1000mmとした。

表面仕上げは9.5mm厚石膏ボードと9mm厚岩綿吸音板を組み合わせたものを使用した。仕上げ材のうち石膏ボードは、石膏ボード用ビスで野縁に固定し、岩綿吸音板は接着剤で貼り付けた後、タッカーを打ち込んで石膏ボードに固定した。この工法は、一般的な吊り天井の施工で用いられる方法である。最終的に、下地材を含めた単位面積あたりの天井質量は13.1 kg/m²である。

加振実験では2011年東北地方太平洋沖地震において防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)の仙台観測点で観測された加速度記録（K-NET仙台波）1)を用いた。図-2はK-NET仙台波の応答スペクトルである。入力方向は、K-NET仙台波、JMA神戸波いずれも梁間方向にNS成分、桁行方向にEW成分、上下方向にUD成分とした。加速度振幅を25%に縮小して1回、50%に縮小して2回加振した。

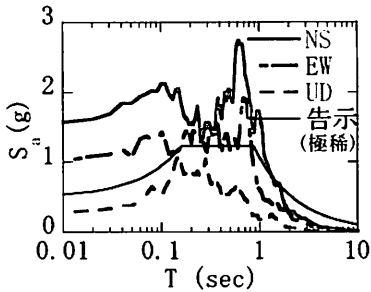


図-2 加速度応答スペクトル(5%減衰)

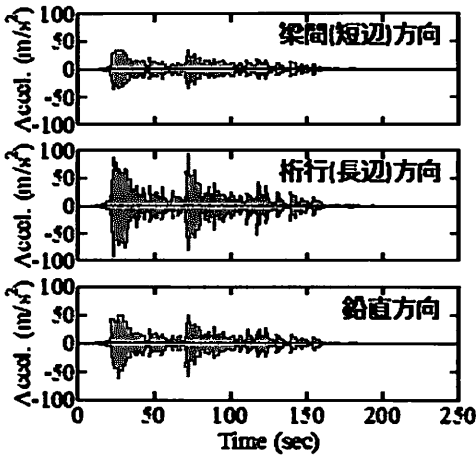


図-3 屋根面応答加速度

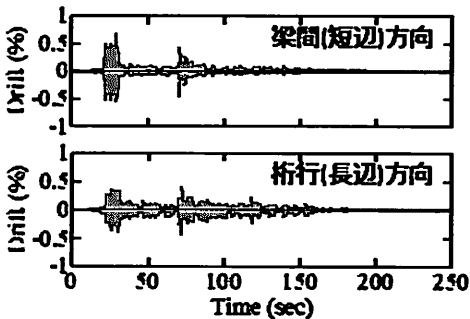


図-4 屋根頂部中央の全体変形角

表-3 全体変形角(%)の最大値

種別	入力地震動 加振レベル	全体変形角	
		梁間方向	桁行方向
未対策 天井	仙台波 25%	0.27%	0.17%
	仙台波 50%(1)	0.68%	0.42%
	仙台波 50%(2)	—	—

3. 脱落被害再現実験結果

(1) 構造躯体の応答

未対策天井試験体のK-NET仙台波50%加振1回目に対する屋根面X4-Y2通りにおける桁行方向の加速度応答の時刻歴を図-3に示す。10Gにも達する大きな

加速度を示しているが、これは屋根面に設置した錘の鋼板が母屋材等に接触し衝撃を与えたためと考えられる。

K-NET仙台波50%加振1回目に対する梁間、桁行方向の全体変形角の時刻歴応答を図-4に示す。ここで、全体変形角とは屋根頂部中央に設置したワイヤー変位計の伸縮量から求まる水平変位をその計測点の高さ9.09mで割った値である。仙台波による加振に対する全体変形角の最大値の一覧を表-3に示す。K-NET仙台波50%加振の2回目は計測点近傍の天井落下によりワイヤーが破断するなどしていたため最大値は得られなかったが、1回目加振とほぼ同等の応答を示したと考えられる。この結果に寄れば、最大変形角は0.68%であり、通常設計で考える限界状態の変形角1%よりも小さいことから、試験体は大きな損傷は受けていないといえる。

柱と屋根大梁の断面で貼付した歪みゲージの値により山形ラーメン架構の曲げモーメント分布を、鉛直ターンバックルブレースに取り付けたひずみゲージの値からブレースに作用した軸力を推測し、全柱のせん断力と鉛直ブレースの軸力の水平成分の総和

をとることで層せん断力を算出する。図-5は、K-NET仙台波50%加振における層せん断力～全体変形角の関係を示したものである。K-NET仙台波50%加振は構造躯体はほとんど塑性化しておらず、弾性の範囲内で応答していたことがわかる。これは、表-3に示した最大変形角の結果と一致する。

(2) 天井脱落被害の再現

未対策天井を対象に実施した加振ケースおよび天井面応答加速度3成分の最大値、損傷状況をまとめたものを表-4に示す。K-NET仙台波25%加振時には天井に大きな損傷はなく、ハンガーやクリップ等の接合金物の滑り程度の軽微な損傷に留まった。その後のK-NET仙台波50%加振時では、主要動最初の激しい揺れに伴い天井が大きく振動し、天井頂部周辺のハンガーが外れ、天井重量を負担していない状態となった。この時点でハンガーは既に関ってしまったものと考えられる。その後、揺れは一旦小さくなるものの再び加速度が大きくなり、天井頂部中央付近の複数のクリップが外れ、天井面が大きいたわんだ状態となった。加振後の状況を写真-3に示す。まだこ

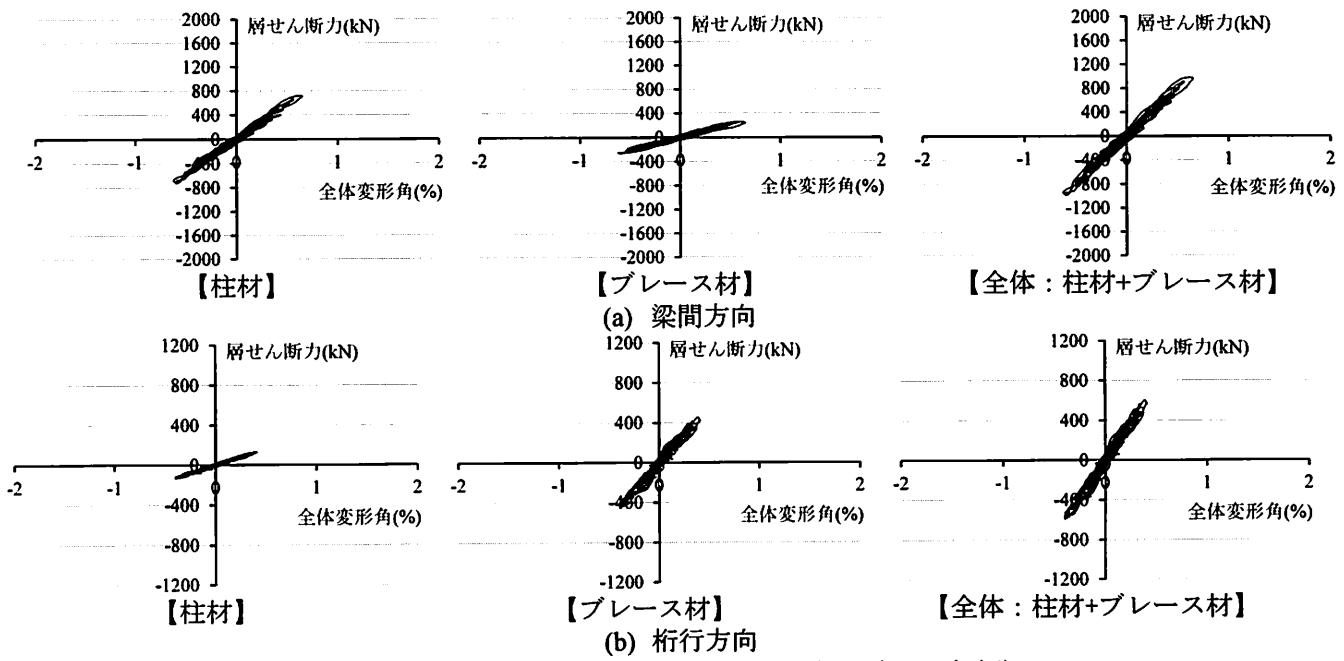


図-5 層せん断力～全体変形角の関係（仙台波 50%加振）

表-4 未対策天井実験結果

加振ケース	天井面応答加速度* (G)			損傷状況
	梁間 方向	桁行 方向	鉛直 方向	
K-NET 仙台波 25%	0.81	0.60	0.74	ハンガー・クリップの滑り等の軽微な損傷。
K-NET 仙台波 50% (1 回目)	4.21	1.35	5.16	ハンガー・クリップが外れ、天井が大きいたわんだ状態となった。天井面は脱落寸前。
K-NET 仙台波 50% (2 回目)	5.54	2.33	6.05	たわんだ天井面が大きく振動し、脱落。

* 40Hz のローパスフィルタ処理を施した時刻歴波形より算出

の時点では天井面は脱落していないが、クリップが外れ、たわんだ天井面を周囲がかろうじて支えている状態であり、いつ脱落が生じてもおかしくない状態であったと言える。その後、余震を想定し、K-NET仙台波50%を再度入力した結果、たわんでいた天井面が大きく振動し、激しい揺れと共に天井が脱落した。たわんでいた箇所が天井脱落の起点となったが、野縁で繋がった天井面も引きずられて脱落しており、全体の約1/5の天井が脱落した。天井脱落後の状況を写真-4に、天井脱落範囲を図-6に示す。なお、本実験では、ネットとワイヤを組み合わせたフェイルセーフ機能を設けていた箇所では写真-3(c)に示す様に天井を受け止めて被害を抑えており、設置されたフェイルセーフ機能は有効であったと言える。

写真-3に示すような勾配屋根の頂部付近を中心とした天井脱落被害は、過去の地震にて報告されている大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害¹⁾の様子に類似しており、それらの天井脱落被害を再現できたものと考えられる。本試験結果より、天井脱落は突発的に生じるのではなく、まずハンガー・クリップ等の接合金物の損傷・外れが発生し、その結果天井面が大きく応答するようになって最終的に脱落、といった段階的なプロセスを経て脱落に至ることがわかった。

図-7に脱落した天井面に取り付けた加速度計により計測された応答加速度を示す。また、応答加速度の最大値は表-4に示したとおりである。応答加速度の最大値は、K-NET仙台波25%加振では梁間方向に0.81Gであったが、天井面が大きくたわんだK-NET仙台波50%加振の1回目では4.21Gと大きく増加している。クリップが外れたことにより天井面の振動が大きくなったためである。

図-8に天井面に取り付けた加速度計により計測された応答加速度の、その直上で計測された屋根面の応答加速度に対する伝達関数を示す。なお、ここでは、屋根面と天井面の応答加速度（梁間方向）のフーリエスペクトルの比を天井の伝達関数としている。また、バンド幅0.4HzのParzen windowを用いた移動平均により平滑化を行った。0.1~0.2秒間にピークがあり、未対策天井の固有周期がおおよそ0.1~0.2秒であることがわかる。K-NET仙台波50%（1回目）加振時には複数のハンガーやクリップが外れ、天井面が大きくたわんだ状態となったが、この段階で0.2~0.3秒間に大きなピークが現れた。この周期のピークは、たわんだ天井面の振動の周期に対応しているものと考えられる。フレーム構造の梁間方向一次

固有周期は0.40秒であることから、天井面で応答が増幅されやすい状態になっていたと考えられる。

K-NET仙台波50%（2回目）の加振では、たわんでいた天井面が大きく振動し、激しい揺れと共に天井が脱落した。この加振では、伝達関数のピークは0.2~0.3秒にあり、1回目と同じ傾向を示している。ただし、伝達関数は全周期帯で、1回目よりも大きくなっており、1回目の加振時よりも大きく応答していたことがわかる。



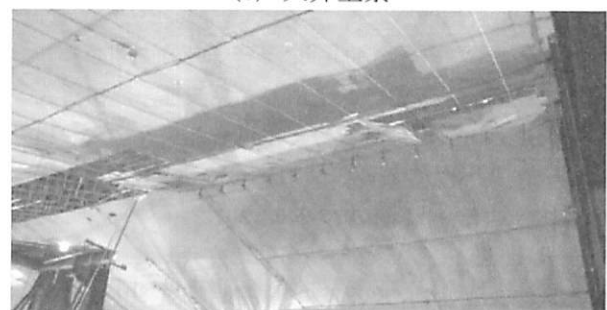
写真-3 K-NET 仙台波 50%（1回目）加振後状況



(a) 天井頂部中央



(b) 天井全景



(c) フェイルセーフ機能設置箇所

写真-4 K-NET 仙台波 50%（2回目）加振後状況

4. 結論

大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害メカニズムの解明のため、吊り天井を有する体育館を模擬する実大規模試験体を製作し、加振実験を実施した。本研究の結論は以下の通りである。

- 天井脱落被害は、まずハンガー・クリップ等の各下地材を接合する金物が損傷し、これらが外れることにより、天井面が大きく応答するようになった結果、脱落に至ることが明らかになった。
- 脱落しなかった状態で大きな余震を受けると連鎖的に崩壊することがあることを確認した。高所に設置された構造物の地震後の安全点検は重要であると言える。
- 脱落した天井をワイヤ／ネットで受け止めるフェイルセーフ機能は有効であった。

謝辞：(独)防災科学技術研究所の運営費交付金PJによる学校施設における大空間建築物の実験研究分科会では、東京大学壁谷沢寿海教授(委員長)、東京大学清家剛准教授、(独)建築研究所福山洋氏、東京工業大学山田哲准教授(50音順)より、実験検討ワーキングでは、(株)桐井製作所荒井智一氏、(独)建築研究所石原直氏、東京大学伊山潤准教授、横浜国立大学江口亨准教授、堀江建築工学研究所太田勤氏、三洋工業株式会社金井貴浩氏、(株)オクジュー高岡昌史氏、八潮建材工業株式会社岩下裕樹氏、(株)竹中工務店吉澤睦博氏(50音順)より、実験計画策定と試験体設計に関し、多数のご助言をいただいた。また、文部科学省大臣官房文教施設企画部施設企画課防災推進室の廣田貢氏に文教施設に関する情報を多数提供いただいた。ここに記して厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 山田哲，松本由香，伊山潤，五十子幸樹，吉敷祥一，池永昌容，島田侑子，小山毅，見波進，浅田勇人：東北地方太平洋沖地震等で被災した鉄骨造文教施設の調査 - 調査の概要 -，日本建築学会技術報告集，第18巻，第40号，pp.935-940，2012。
- 2) 一般社団法人 建築性能基準推進協会：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説，2013。

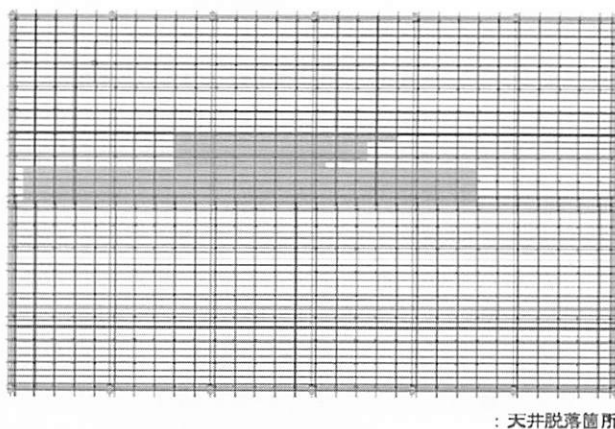


図-6 天井面脱落箇所

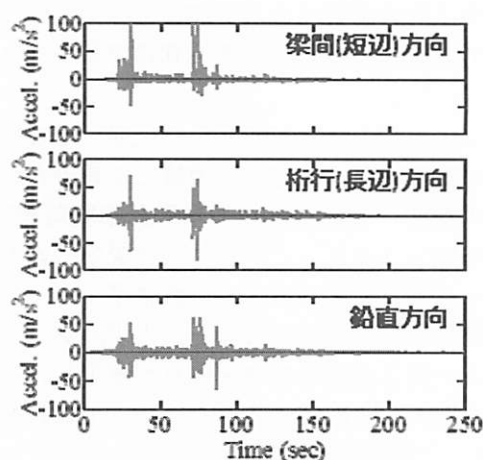


図-7 天井面応答加速度

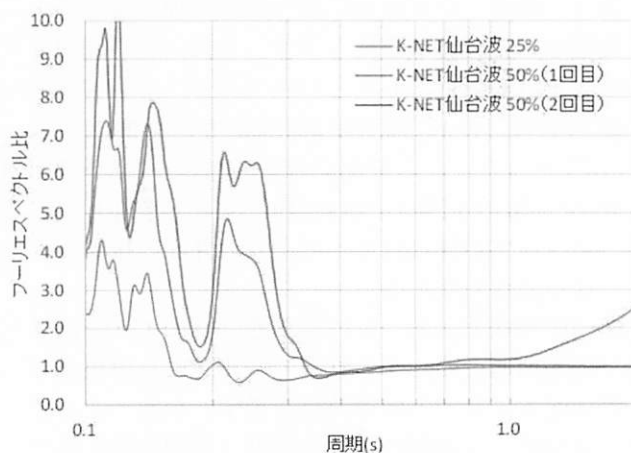


図-8 伝達関数