

3. 天井の耐震対策の検討

3. 1 天井の耐震対策を考える際の基本的な枠組

天井の耐震対策を考える際の基本的な枠組みとして、耐震対策の適用範囲と耐震対策の方法を設定する必要がある。

耐震対策の適用範囲については、次節で述べる。

耐震対策の方法については、耐震的な天井の仕様を定める方法（仕様ルート）、天井の耐震性を計算で検証する方法（計算ルート）、その他高度な計算や実験などの特別な手段によって天井の耐震性を検証する方法（特殊検証ルート）が挙げられる。なお、いずれのルートにも共通する項目として、腐食等に関する耐久性の項目を設定する。また、仕様ルートについては、耐震的な天井の仕様（仕様1）に加え、地震時に天井が脱落しても人的被害を防ぐフェールセーフ機能を付加した仕様（仕様2）が代替として考えられる。

以上のことを、模式的に整理すると図3.1となる。

仕様ルート（耐久性の項目を含む。）については4章において、計算ルートについては5章において検討結果を記載する。なお、特殊検証ルートについては、その具体的な内容の検討まで踏み込んでいない。

ルートの選択に関する明確な判断・区別は行っていないが、集会室や体育館などは仕様又は計算ルートで対応することを目指して検討を行った。前提条件等は4章と5章で記述している。実務的な運用を考えると仕様ルートを選択することが多いと考えられるが、提案する仕様1・仕様2を適用し難い場合や、構造躯体に比較的高度な構造計算が適用される場合などでは計算ルートを選択することを想定した。また、音楽ホールに代表されるような、大空間で構造躯体や天井が特殊なもの（形状が複雑で重量が大きい天井、など）は特殊検証ルートでの個別の対策が必要と考え、本検討では特に取り上げないこととした。

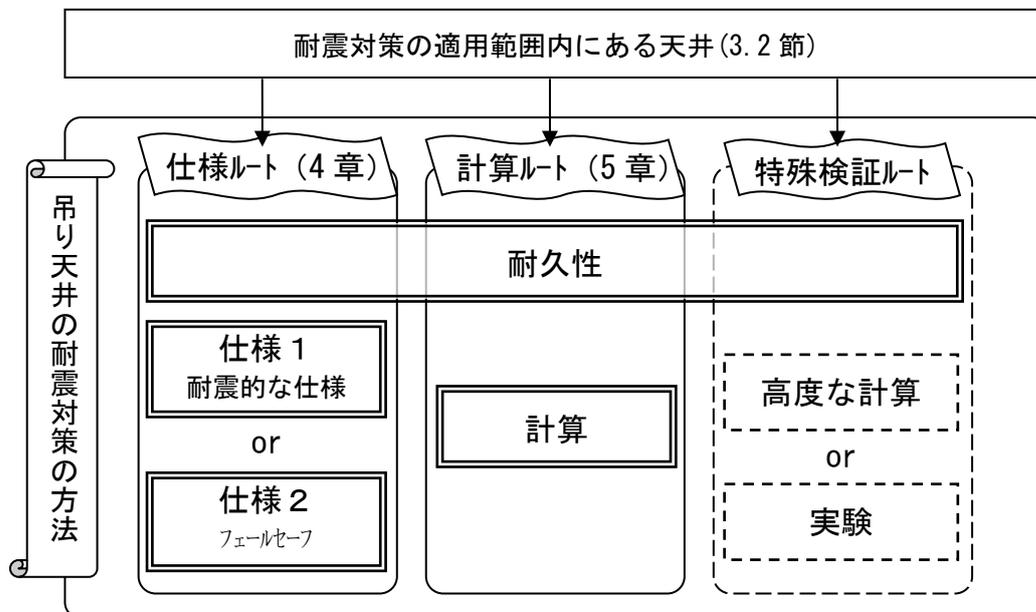


図 3.1 天井の耐震対策を考える際の基本的な枠組みの模式図

3. 2 天井の耐震対策の適用範囲

3.2.1 適用範囲の検討に用いる指標

天井落下による人身への危害を考えた場合に関係する項目から、適用範囲を絞る際のパラメータを取り上げる。

天井落下が生じた場合の天井による人身への危害の発生度合いは、天井や室の面積、天井の質量等により影響される。人身への危害の大きさを、天井が落下して人体に衝突する際の運動エネルギー（落下により失った位置エネルギー）によると考えると、落下する天井の重量（単位質量×落下面積×重力加速度）、落下高さ（天井の設置高さ）により影響される。

これらより、適用範囲を絞る際のパラメータとして、本案では以下の3つを取り上げた¹。

- ・天井単位面積質量
- ・面積（天井総面積、室面積）
- ・天井高さ

表 3.1 では、室面積、天井高さ、による分類について、該当する空間のイメージ（室用途）をあてはめて整理したものであり、各室用途に対して想定される天井単位面積質量を記号で示している。天井単位面積、天井総面積・室面積、天井高さ、について以下に説明する。

（1）天井単位面積質量（w）

地震時に一体となって脱落すると想定される部材を算入する（在来工法の天井材については、野縁受けを含めて下）。独自に吊り元を持っている照明や空調等は算入しない。

各種の天井について、上記の定義で単位面積質量を求めると、以下の通りに例示できる（PB：せっこうボード、RW：ロックウール吸音板、GW：グラスウール板。※は野縁等を用いるもの。）。

RW9mm+PB9.5mm+下地材	: 10.2~13.1 kg/m ² ※
PB9.5mm+下地材	: 7.1~10.0 kg/m ² ※
グリッドタイプ（木目ツキ板）	: 9.2kg/m ²
グリッドタイプ天井（RW）	: 5.5kg/m ²
ルーバー天井	: 2.9~5.8kg/m ²
クロスタイプ天井（GW）	: 4.8kg/m ²
膜天井（天井膜材のみ）	: 0.5kg/m ²
金属スパンドレル	: 6.5kg/m ² ~ ※

天井単位面積質量について検討するにあたり、6 kg/m²、10 kg/m²、20 kg/m²のあたりに区分の線を引いた。4つの区分はそれぞれ以下のように想定した。

¹適用範囲に関する議論では、以下のような項目も言及された。

1. 用途・属性（音楽ホール・避難経路、非常口周辺）
2. 居る人の属性（年齢、健康状態、その場所への慣れ）
3. 人が居る程度（人数の多さ、頻度）
4. 退避行動の可否（机の下に潜るなど）
5. 退避行動のし易さ（障害物の有無、非常口への距離）
6. 天井の吊り長さ
7. 天井面の断面形状
8. 天井材の鋭利さ

1～5は利用状況に依存するものであって建築物自体の状況に関わるものではない。耐震対策の適用範囲を検討する際に落下後の人身への危害に着目して位置エネルギーを取り上げていることに対し、6と7は損傷・落下等の起こりやすさに関する項目であり、位置エネルギーとも直接的には関係しない。8は吊り天井が損傷又は破壊した後の状態に関わっており状況に依存する。本検討では、建物自体に関するもので天井の位置エネルギーと関わり、状況に依存しない指標を取り上げて検討を行った。

- 6kg/m²未満：グラスウール板やロックウール吸音板を天井板とする軽い天井
- 6～10kg/m²：せっこうボード直張り程度の比較的軽い天井
- 10～20kg/m²：せっこうボード捨て張り（天井板2枚張り）程度の一般的な天井
- 20kg/m²以上：せっこうボード3枚張り以上で、音響に特に配慮する天井

（2）面積

（a）天井総面積（A_c）

天井総面積は、同一階にあり、壁（天井勝ちの壁を含む）で囲われ、一体的に使われる室の、天井の総面積（床面への投影面積ではなく）とする。図 3.2 の平面概要図では天井が張られたハッチング部分の総和を、図 3.3 の断面図では勾配に沿った面積を天井総面積と考える。

（b）室面積（A_r）

室面積は、利用の際に室として一体的に用いられる範囲を合計した面積と考える。室面積について検討するにあたっては、表 3.1 のように、200 m²、500 m²、1000 m²のあたりに区分の線を引く。4つの区分はそれぞれ以下の様に想定した。

- 200 m²未満：会議室程度までの比較的小さな室の区分。
- 200～500 m²：小規模な体育館程度までを含む区分。
- 500～1000 m²：中規模な体育館程度までを含む区分。
- 1000 m²以上：大規模な体育館や劇場等を含む区分。

500 m²は、建築物防災週間に実施されている国土交通省の調査で、体育館等の天井を調査対象とする際の面積区分の数字でもある。小学校の体育館はアリーナ部分のみであれば 500 m²を切ることも多い。

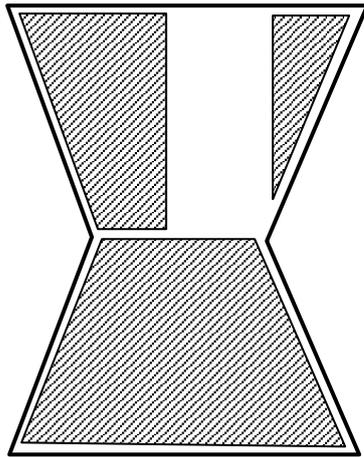
（3）天井高さ（h）

天井高さは、床面から鉛直上向きに天井下面までの距離とする。天井高さとしては、最高天井高さ、平均天井高さ、などが挙げられるが、高所からの落下物が危険であることを考えて、最高天井高さをパラメーターとすることが考えられる（図 3.3）。ただし、採光等のための部分的に高くなっているごく狭い面積の天井等は、天井高さを算定する際の対象とはしない。天井高さの一例は以下とする。

- 住宅 : 2.5m 程度
- オフィス、スーパー : 2.5～4m
- ホームセンター : 4～5m
- 国体でのバレーボール会場設置基準 : 7m（10m 以上が望ましい）

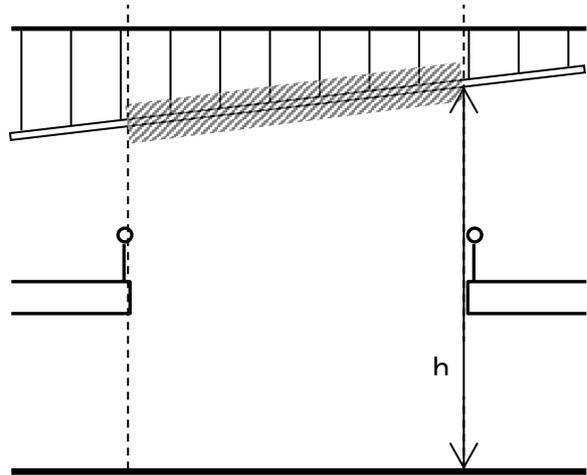
天井高さについて検討するにあたり、4m、6m、10mのあたりに区分の線を引く。4つの区分は、それぞれ以下のように想定した。

- 4m 未満：住宅、オフィス、スーパーなど
- 4～6m：ホームセンター、郊外型電器店、博物館展示室など
- 6～10m：体育館、宴会場など
- 10m 以上：音楽ホール、劇場、体育館など



※上記平面伏図（概要図）の室のハッチング部分が天井とすれば、3つの総和が天井総面積。

図 3.2 天井総面積のイメージ



※上記断面概要図の室について、hが天井高さ、ハッチング部分が天井総面積。

図 3.3 天井総面積、天井高さのイメージ

表 3.1 室面積(Ar)-天井高さ(h)、と、空間のイメージ(室用途)

	$0 < Ar < 50\text{m}^2$	$50 \leq Ar < 100\text{m}^2$	$100 \leq Ar < 200\text{m}^2$	$200 \leq Ar < 500\text{m}^2$	$500 \leq Ar < 1000\text{m}^2$	$1000\text{m}^2 \leq Ar$
$10\text{m} \leq h$	吹き抜け空間				●映画館(中) ●宴会場(中) ●★体育館(中)	■音楽ホール ■●劇場 ●映画館(大) ●宴会場(大) ●★体育館(大) ●★プール(大)
$6 \leq h < 10\text{m}$				■ライブハウス ●▲★体育館(小) ●★プール(小) ▲博物館展示室	●宴会場(中) ●★プール(中) ▲博物館展示室	▲倉庫建物
$4 \leq h < 6\text{m}$			▲博物館展示室	●図書館 ●★プール(小) ▲博物館展示室	●図書館 ▲博物館展示室	▲デパート(1階) ▲ホームセンター ▲郊外型電器店 ▲工場ライン
$h < 4\text{m}$	●教室 ●オフィス個室 ●ホテル個室 ●会議室(小) ▲病室	■音楽スタジオ ●宴会場(極小) ●会議室(中) ▲コンビニ ▲保育室	●宴会場(小) ●会議室(大)	●宴会場(小) ●図書館 ▲ファミレス(中)	●図書館 ▲スーパー(小) ▲ファミレス(大)	●ボウリング場 ▲デパート(一般階) ▲スーパー(中・大) ▲超高層ビルオフィス

■: $20\text{kg}/\text{m}^2 \leq w$ ●: $10\text{kg}/\text{m}^2 \leq w < 20\text{kg}/\text{m}^2$ ▲: $6\text{kg}/\text{m}^2 \leq w < 10\text{kg}/\text{m}^2$ ★: $0\text{kg}/\text{m}^2 < w < 6\text{kg}/\text{m}^2$

3.2.2 天井脱落による危害の可能性

平成13年芸予地震から平成23年東北地方太平洋沖地震までの地震による天井の落下事例について、横軸を天井単位面積質量、縦軸を天井高さ、としてプロットすると、図3.4のようになる。図中の番号は表3.2にまとめた被害事例の番号に対応している。△で示したものが人身被害報告のあった事例であり、事例2に関して重傷者が報告されている。

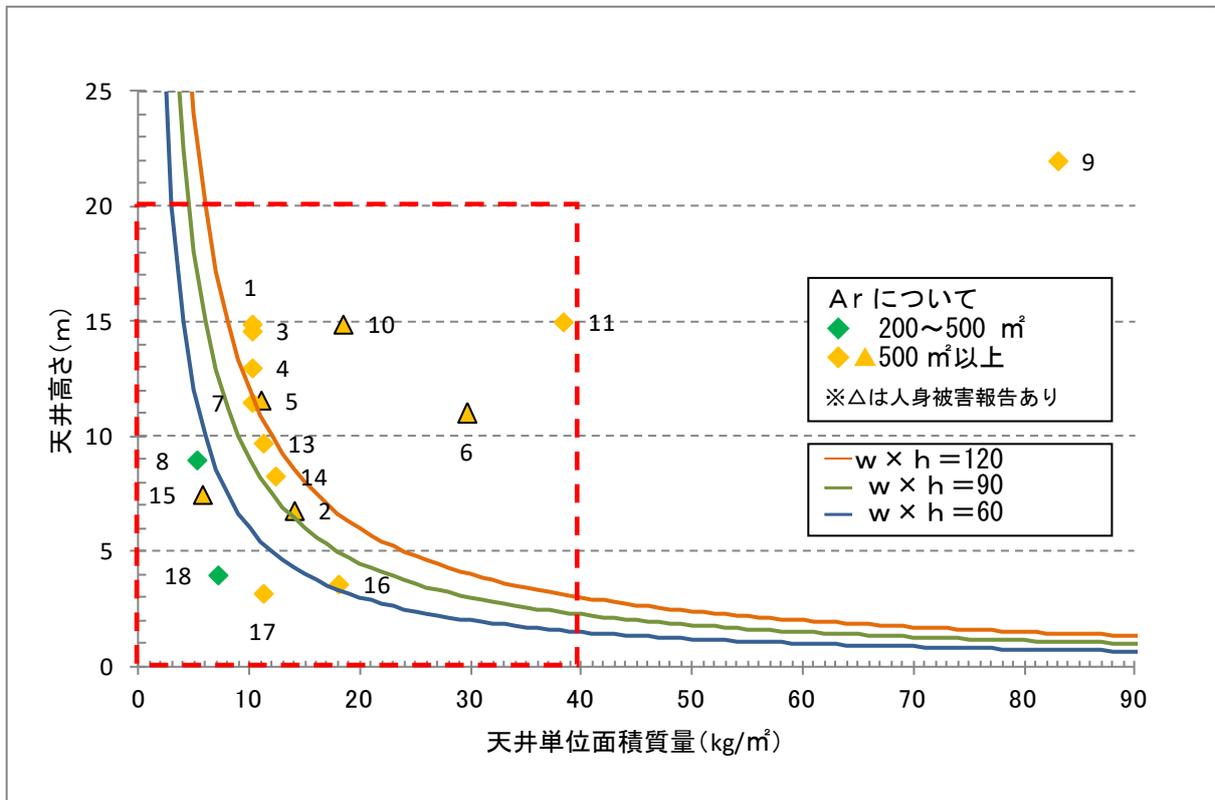


図3.4 地震被害事例の天井の分布（赤枠内の範囲が図3.5～図3.7の範囲）

3.2.3 天井の耐震対策の適用範囲

天井の耐震対策の適用範囲の検討では、室面積、天井高さ、天井単位面積質量の3つのパラメータについて取捨選択し、以下の4つの設定方法について検討した。天井総面積（ A_c ）は適用範囲の判断が難しくなるため実用性に欠けると判断し、パラメータから外した。また、軒裏の天井（軒天）は検討対象外とした。それぞれ合理的に検討されているが、4つめの単一の閾値を設ける方法が、一連の設計活動の中で適用範囲を判断する際の容易さという点では最も実用的な設定方法と言える。

（1）単位面積位置エネルギーによる設定方法

<考え方>

天井落下の際に、人体に衝突して危害を加える面積は限定されると考え、天井の単位面積位置エネルギーをもって適用範囲を設定することを考える。つまり、 $w \times h$ が一定以上になるものを適用範囲とする、という考え方である。

図 3.4 には、単位面積の天井の位置エネルギーが一定となる、ラインを、 $w \times h = 60, 90, 120$ 、についてそれぞれ示している。落下事例の中で重傷者の報告があったものは事例 2 のみであり、この事例では $w \times h = 95$ であるから、少なくとも $w \times h = 95$ 以下とすることが考えられる。

<合理性・実用性>

適用範囲の設定方法として合理的であるが、基本設計の段階で天井の材料の詳細が分からない場合もあり、実際の設計プロセスの中に必ずしもきちんと乗らない可能性もある。適用範囲の設定に際して面積が出てこないため、どんなに小さな空間（例：回り階段の吹き抜け）の天井でも適用範囲内になる可能性がある。

（2）一室の総位置エネルギーによる設定方法

<考え方>

天井の脱落はある広がりを持って生じるため、その被害の広がりや程度を含む指標として、一室の総ての天井に関する位置エネルギーを指標とする適用範囲の掛け方を考える。つまり、 $w \times h \times A_r$ が一定以上になるものを適用範囲とする、という考え方である。この場合、天井の総面積が広い場合に天井単位面積質量が比較的小さいものも適用範囲内となり、天井の総面積が狭い場合には天井単位面積質量が比較的大きいものでないと適用範囲内とはならない、という特徴がある。また、軽量の天井が高所にある場合（室面積 1000 m^2 超で、膜天井やガラスウール板など軽量の天井を用いる）は適用範囲外としても良い（下地材が落下しないという前提において）とする考え方もあり得る。

<合理性・実用性>

適用範囲の設定方法として包括的であるが、基本設計の段階で天井の材料の詳細が分からない場合もあり、実際の設計プロセスの中に必ずしもきちんと乗らない可能性もある。

（3）室面積に応じた天井高さと天井単位質量による設定方法

<考え方>

具体の室および面積帯を想定しながら、閾値を、天井高さと天井単位質量について設定する、という考え方である。表 3.1 のように、室面積が小さくなるほど、天井高さは低くなる傾向がある。適用範囲を考えるにあたっては室面積（3.2.1（2）(b)）における検討を踏まえて、面積帯 3 区分を設定して検討を行った。

[$0 \text{ m}^2 < Ar < 200 \text{ m}^2$] (図 3.5)

- ①在来工法で2枚張り以上 ($10\text{kg}/\text{m}^2$ 以上) の天井を適用範囲と考える。
 - ②在来工法で2枚張り ($10\sim 20\text{kg}/\text{m}^2$) の天井が 10m以下の高さにある場合を適用範囲外と考える。
- これらより、適用範囲が青色の網掛け部分となる。

[$200 \text{ m}^2 \leq Ar < 500 \text{ m}^2$] (図 3.6)

- ③在来工法で2枚張り以上 ($10\text{kg}/\text{m}^2$ 以上) の天井を適用範囲と考える。
 - ④在来工法で2枚張り ($10\sim 20\text{kg}/\text{m}^2$) の天井が 6m以下の高さにある場合を適用範囲外と考える。
- これらより、適用範囲が緑色の網掛け部分となる。

[$500 \text{ m}^2 \leq Ar$] (図 3.7)

- ⑤グラスウール板の天井よりも質量のあるもの ($6\text{kg}/\text{m}^2$ 以上) を適用範囲と考える。
 - ⑥在来工法2枚張り ($10\sim 20\text{kg}/\text{m}^2$) 又はそれより軽い天井が 6m以下の高さにある場合を適用範囲外と考える。
- これらより、適用範囲が橙色の網掛け部分となる。

<合理性・実用性>

空間の使われるイメージ(室用途)と関連させながら適用範囲について具体的に検討している。しかしながら、室面積により適用範囲となる天井高さが変わることについては、室面積により天井の落下による危険度が増すという説明は難しい(天井面が大きいほど衝突時衝撃が大きくなる、などは規定としての説明が難しい)。また、場合分けが多すぎると複雑になるという難点もある。

(4) 天井高さと室面積による設定方法

<考え方>

天井高さについては 3.2.1 (3) で区分の閾値として、4m、6m、10m という数字が挙げられている。また、室面積の区分を 3.2.1 (2) (b)で検討した際に、 200 m^2 、 500 m^2 、 1000 m^2 が区分の閾値として挙げられている。想定される室の具体の用途等を踏まえると、天井高さは 6m 以上～10m 以上、室面積は 200 m^2 以上～ 500 m^2 以上に、それぞれ閾値を設けるのが適当と考えられる(図 3.8)。

<合理性・実用性>

設計の初期段階でも適用範囲内かどうか判断でき、適用範囲として分かりやすい方法である。

3. 天井の耐震対策の検討

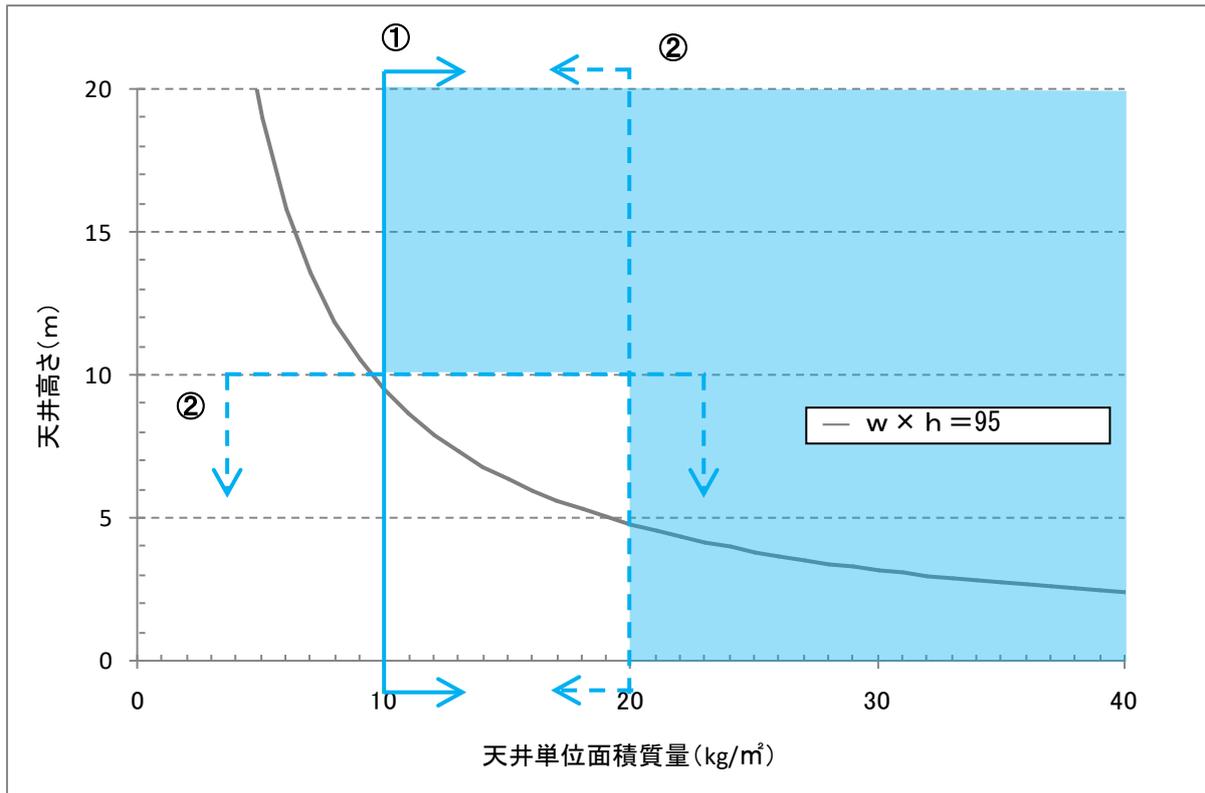


図 3.5 室面積 $A_r < 200 \text{ m}^2$ の適用範囲

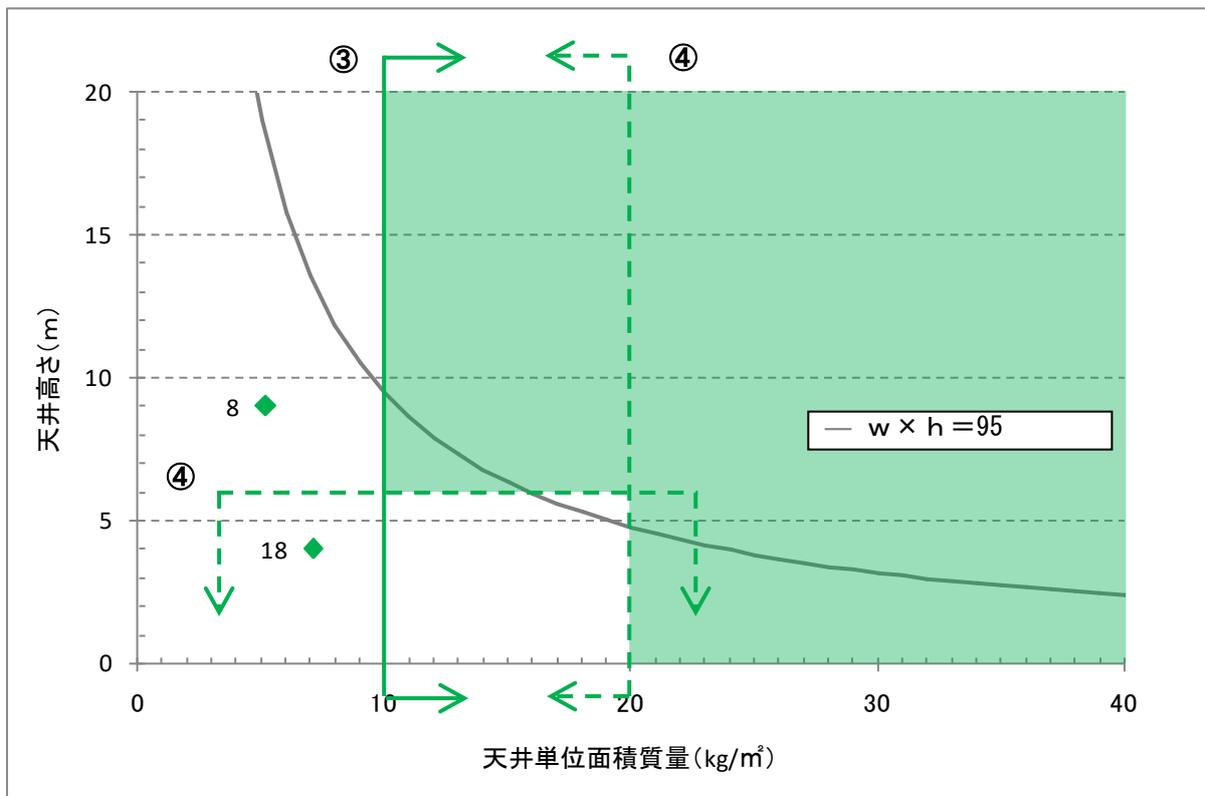


図 3.6 $200 \leq A_r < 500 \text{ m}^2$ の適用範囲 (緑色印は床面積で該当する事例)

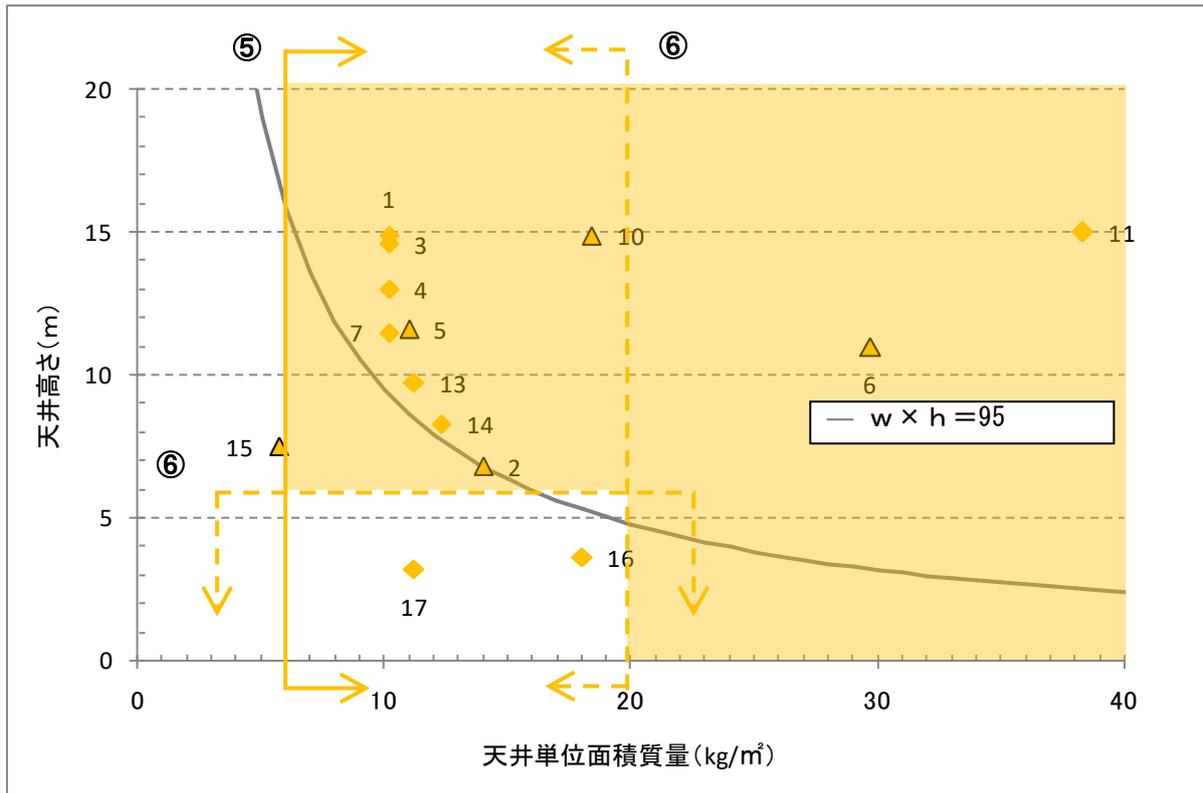


図 3.7 500 m² ≤ Ar の適用範囲（橙色印は床面積で該当する事例。△は人身被害報告あり）

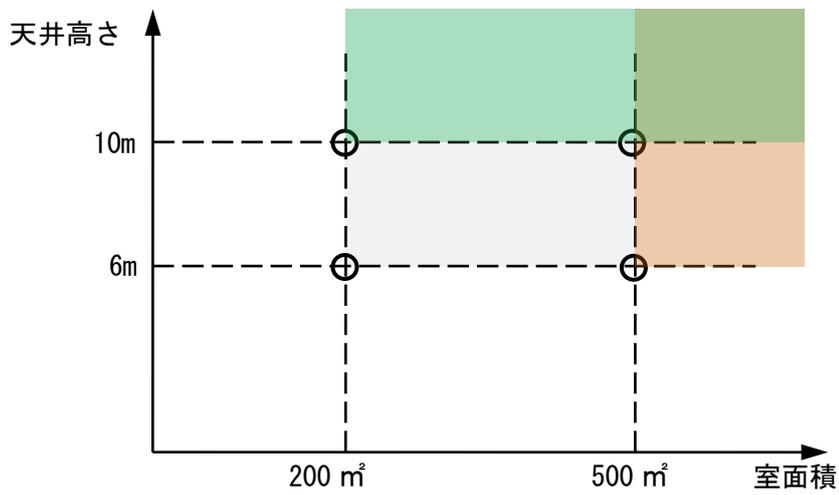


図 3.8 天井高さと室面積による設定方法

3. 天井の耐震対策の検討

表 3.2 地震による天井被害事例 (※表 2.19 から、脱落天井の詳細仕様と被害状況を外し、天井面材・単位面積質量、被害写真、パラメーター等を追加)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
中間報告での名称	建築物B	-	建築物F	-	建築物E	-	-	-	-	建築物C	建築物D	建築物J	
被災地震	2011東日本	2005宮城	2011東日本	2001芸予	2011東日本	2001芸予	2001芸予	2007能登	2011東日本	2011東日本	2011東日本	2011東日本	
建築物の諸元	建設地	茨城県	宮城県	宮城県	広島県	宮城県	愛媛県	石川県	神奈川県	宮城県	宮城県	福島県	
	建設年	昭和60	平成17	平成6	平成元	平成17	平成元年?	不明	不明	昭和62	昭和48	昭和45	
	構造	SRC造・S造・RC造	S造	S造	SRC・RC・S造	S造・RC造	RC造・S造	SRC造・S造	S造	S造	RC造・S造	SRC造	SRC造
被害発生時の諸元	被害発生地震 /本震震度	本震・余震 6弱	5強	本震・余震 6強	6弱	本震・余震 6強	5弱	5強	6弱	5弱	本震・余震 6弱	本震・余震 5強	本震・余震 5強
	被害発生時の使用状況	使用中	使用中	使用中	使用中	使用中	(不明)	(不明)	不使用	使用中	使用中	不使用	使用中
被災場所の主な用途	体育館	プール	体育館	体育館	体育館	体育館	武道館	体育館	ホール	ホール	ホール	ホール	
被災場所のおおよその広さ(m ²)	1800	1200	942	857.5	850	726	535.5	496	1400※1	1100	900	700	
被災場所の天井高さ(m)	10.7~14.9	6.5~6.8	11.6~14.6	8~13	10.7~11.6	平均11	9.5~11.5	7~9	22	14.9	15	15	
一続きの天井の 平面的広さ(m ²)	天井1枚の広さ		約6×27 =162		約4.5×26 =117			-					
	1室の天井の広さ ※2 吹き抜け上部の天井広さ ※2	(1800)	1200	162×4.5 =729	990	117×7 =819	(726)	500	(496)	(1400)	(1100)	(900)	(700)
天井種類	在来工法	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	
	システム天井 木製下地							○				○	
天井面材 PB:せっこうボード、RW:ロックウール吸音板 数字は、それぞれの材の厚みを示す。		けい酸カルシウム板8+RW12	PB9.5+RW9	PB9.5+RW	PB9.5+RW12	強化PB12.5+不燃せっこう積層板9.5	PB+RW	RW15	繊維混入PB13.6×5	PB(12.5×2)	けい酸カルシウム板12+繊維混入PB(10+B)	木製板	
天井単位面積質量	10.2	14.0	10.2	10.2 ※3	11.0	29.7 ※4	10.2 ※3	5.2	83~88	18.4	38.3		
天井の断面概念図													
被害状況等写真													
天井の床面への落下 人的被害の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
wh	109	95	149	133	128	327	117	47	1,826	274	575		
wAh	-196,452	114,240	108,569	131,274	104,504	237,184	58,650	-23,213	2,556,400	301,576	517,050		

※1 図面より概算

※2 () がついた数値は室面積で代用しているもの。

※3 天井板の厚さが不詳のためPB=9.5mm、RW=9mmと仮定して算定。

※4 不燃せっこう積層板は、同じ厚さの不燃積層PBと同等として算定。

パラメーター	吊元上下振動	大スパン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	複雑な形状の天井	重量	6kg/m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		室面積	1,000m ² 以上	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×
	500m ² 以上		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	200m ² 以上		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	1枚の天井面積	300m ² 以上	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	
		100m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	天井高さ	10m以上	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
		6m以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		4m以上	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
用途	座席等で移動困難	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○		
	不特定多数	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○		

表 3.2 地震による天井被害事例（続き）

（※表 2.19 から、脱落天井の詳細仕様と被害状況を外し、天井面材・単位面積質量、被害写真、パラメーター等を追加）

	13	14	15	16	17	18	19
中間報告での名称	—	建築物A	—	建築物G	建築物H	建築物I	建築物J
被災地震	2003十勝沖	2011東日本	2007三重	2011東日本	2011東日本	2011東日本	2011東日本
建築物の諸元	建設地	北海道	茨城県	三重県	宮城県	福島県	福島県
	建設年	平成15	平成22	平成19	平成12	平成5.7	昭和45
被害発生時の諸元	構造	S造	S造	S造	S造	S造(一部SRC造)	SRC造
	被害発生地震 /本震震度	5強	本震 6弱	5強	本震・余震 6弱	本震 5強	本震・余震 5強
	被害発生時の使用状況	不使用	使用中	使用	使用中	不使用	不使用
被災場所の主な用途	空港ロビー	空港ロビー	飲食店	展示室	観覧席・通路	会議場	展示室
被災場所のおおよその広さ(m ²)	756	942	980	1450	1450	207	500
被災場所の天井高さ(m)	9.73	8.3	3.6~7.5	3.6	2.5~3.2	3.1~4	4.5
一続きの天井の 平面的広さ(m ²)	天井1枚の広さ		3×11=33	—			
	1室の天井の広さ ※2 吹き抜け上部の天井広さ ※2	450	33×6 =198	486	(1450)	(1450)	207
天井種類	在来工法	○	○		○	○	○
	システム天井 木製下地			○			○
天井面材 PB:せっこうボード、RW:ロックウール吸音板 数字は、それぞれの材の厚みを示す。	PB9.5+RW12	PB9.5+RW15	PB9.5+木枠	PB15+PB15	PB9.5+RW12	PB9.5	
天井単位面積質量	11.2	12.3	5.7	18.0	11.2	7.1	
天井の断面概念図							
被害状況等写真							
天井の床面への落下	○	○	○	○	○	○	○
人的被害の有無			○				
wh	109	102	43	65	36	28	
wAh	49,039	20,214	20,777	93,960	51,968	5,879	

※2 () がついた数値は室面積で代用しているもの。

パラメーター	吊元上下振動	大スパン	○	○	○	×	○(観覧席)	×	△
	複雑な形状の天井		△	×	×	○	○	△	×
	重量	6kg/m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○
	室面積	1,000m ² 以上	×	×	×	○	○	×	×
		500m ² 以上	○	○	○	○	○	×	○
		200m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○
	1枚の天井面積	300m ² 以上	○	○	○	○	○	×	○
		100m ² 以上	○	○	○	○	○	○	○
	天井高さ	10m以上	×	×	×	×	×	×	×
		6m以上	○	○	○	×	×	×	×
		4m以上	○	○	○	×	×	○	○
	用途	座席等で移動困難	×	×	○	×	○	×	×
		不特定多数	○	○	○	○	○	×	○

3. 天井の耐震対策の検討