人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する研究（その1）：

高所に設置された天井材の安全性評価法の提案

A RESEARCH ON THE SAFETY CRITERION OF CEILINGS
USING HUMAN TOLERANCE INDEX (PART 1):

A PROPOSAL OF THE SAFETY CRITERION OF CEILING BOARDS SET AT A HEIGHT

川口 健一^{*1}, 中 楚 洋 介^{*2}

Ken'ichi KAWAGUCHI and Yosuke NAKASO

Accidental fall of suspended ceilings can easily spoil the safety of a room. Since the main force that drags down ceiling boards is the gravity, the safety of ceiling boards can be defined according to its material, suspended height and impact to the human head. The authors show experimental results that they have conducted by dropping ceiling boards on a dummy head from various heights. Then they propose the quantitative criterion for the safety of ceiling boards, which is based on the study of human tolerance, and the threshold proposed by Nahum et al. which is equivalent to AIS 2.

Keywords : Nonstructural components, Ceilings, Human tolerance, Safety criteria, Drop test, Dummy head

非構造部材, 天井, 人体耐性指標, 安全性評価, 落下実験, 人頭模型

1. はじめに

建築物には様々な外乱から人命を護るシェルターという基本的機能が期待されている。しかし、天井等の高所設置の非構造材の落下が発生すると、安全なはずの屋内で多くの人命が危険に曝され、建築物の本来の機能を喪失させる深刻な事態を招く。

天井が損傷劣化し落下に至る原因は結露、雨漏り、地震、風、種々の振動、錆、経年劣化、温度変形、天井裏への生物の侵入など様々であり、例えば地震はそのうちの一つに過ぎない。最終的に落下を引き起こし人命を脅かすのは重力である。重力加速度は地球上でほぼ一定である。従って、天井落下時の安全性は設置高さ天井の材質が与えられれば、概ね一意に評価できる。

天井は仕上げ材であり、その目的は快適な建築空間の実現である。建物を外力に抗して支える構造部材とは根本的に役割が違う。したがって、構造部材とは異なる発想で、空間の質を劣化させない、健全かつ賢明な対策を開発していくことが望ましい。

著者らは1995年1月17日の阪神大震災の調査時から多数の天井落下被害の調査を行い、その危険性を指摘し続けてきた^{1)~3)}。地震による天井落下被害は震度5を超える地域で発生し出す傾向があり、構造被害に比べ広範囲にわたり同時多発的に発生する⁴⁾。2011年3月11日の東日本大震災でも広域で多くの天井落下被害が発生した。

しかし、著者らが調査を重ねていく過程で明確になってきたこと

は、天井等の非構造材の落下事故は、地震時のみならず平時にも発生しており、その原因も一通りではないということである(Photo1)。天井落下被害は、世界各国で地震の有無に関わらず日常的に発生している。落下の発生原因や様態は上述のように多様であり、水泳場や温浴施設、商業施設、劇場、駅といった集客施設での被害も多い。こうした被害はある日突然起こるため、利用者は身を守ることが難しい。また、水平力に着目した耐震補強などではこれらの落下被害を防止することは難しい。予防安全に加えて事後安全の発想が必要である。

本研究の目的は、天井落下被害の本質は重力であること、そしてその安全性評価は落下する天井材と人体とによって決まることを大

(a) Ceiling collapse caused by the Kobe earthquake in 1995

(a) Non-seismic collapse of ceiling in a swimming pool in 2005

Photo1 Example of ceiling collapse

¹⁾ 東京大学生産技術研究所 教授・工博

²⁾ 東京大学生産技術研究所 特任講師・博士(工学)

Prof., Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

Project Lect., Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

前提とし、傷害バイオメカニクスの分野で発展してきた人体耐性に関する知見を活かし、天井材の安全性を定量的に評価する手法を提案することである。以下ではまず天井落下時に問題となる頭部傷害の耐性指標に関して既往の研究を概説し、続いて筆者らが行った実験について詳述する。さらにこれらの結果に基づいて既往の頭部の耐性指標と比較することで天井の安全性を評価する手法について述べる。

なお、本報告の基本的な発想と流れは、筆者が主査を務め執筆した日本建築学会発行の指針⁶⁾の2章において既に出版されているが、本報告では、人体耐性の調査に新たな内容を加え、実験手法を詳述し、さらに軽量天井材の実験成果と落下速度に関する考察を加えている。また、装置の振動性状の影響についても言及している。

2. 人体耐性指標

人体耐性に関する研究は、事故数が圧倒的に多く保険制度等の観

点から詳細な評価を必要とする交通事故、特に自動車事故の分野を対象として研究が進められてきた。これらの知見は傷害バイオメカニクスとしてまとめられてきている⁹⁾。傷害耐性の評価法の提案においては、人体各部位の傷害メカニズムに対応し、重症度と関連のある加速度、速度、衝撃荷重といった物理量が傷害を与える値として用いられている。傷害の種類と重症度は傷害スケールによって数値的に表現されており、中でも簡易傷害スケール（Abbreviated Injury Scale: AIS）⁷⁾（Table1）が米国等を中心に広く用いられている。人体の部位の中でも頭部については、しばしば中枢神経が回復不能な損傷を受けるため、衝突状況下の傷害で最も重要な部位と考えられている。また、天井材は基本的に利用者の頭上に設置されていることから頭部への衝突頻度が圧倒的に高い。そのため、本稿では天井材の安全性を評価する上で頭部傷害に着目する。以下、頭部傷害の評価に関する既往の研究について述べる。

2.1 頭部応答加速度による評価

頭部の耐性に関する研究は、19 世紀中頃には既に軍の研究としてドイツで行われ始めており⁸⁾、その後交通事故の増加と保険制度と共に米国を中心に発展してきた。傷害値として並進加速度に着目した初期の研究には次のようなものがある。1958 年頃から Wayne State 大学で実施された研究⁹⁾では、防腐処理された 64~76 歳の白人男性 4 体の屍体頭部を鉄板に落下させ、頭部並進加速度と骨折の有無を調査し人間の頭蓋骨線状骨折（脳震盪の発生と強い相関がある）を示す曲線が提案された（Fig.1）。頭部有効加速度の継続時間依存関数が定められており、これより小さければ線状骨折や脳震盪は発生しないとされている。これは後に Wayne State Tolerance Curve：WSTC として頭部傷害耐性の基準として参照されるようになっていた。日本の保護帽（ヘルメット）の規格（労働省告示第 66 号）¹⁰⁾もこれを力積に置きなおした形で利用している（後出）。しかし、その後実験結果のプロットの一部分に誤りが見つかるなど、WSTC は後年の研究による見直しもなされている。

頭蓋骨の線状骨折は AIS2：中傷等にあたり（Table1）、傷害が速やかに回復する軽傷で済むか否かの一つの基準を与えている。WSTC を両対数でプロットし、直線近似すると、

2.5 log $\bar{a}$ + log Δt = 3 (1)

となり次式のように書き換えることができる。ここで、 $\bar{a}$ ：平均加速度 [G]、 Δt ：衝撃持続時間 [s]である。

$\bar{a}^{2.5} \Delta t = 1000$ (2)

Gadd は(2)式を積分することで衝撃持続時間中の加速度の変化を考慮した Severity Index：SI を提案している¹¹⁾。

$SI = \int_0^T a(t)^{2.5} dt$ (3)

ここに、 $a(t)$ ：三軸合成加速度 [G]、 T ：衝撃持続時間 [s]、 t ：時間 [s]である。(3)式により計算された値に対して、前面衝突時では 1000、接触を伴わない場合は 1500 を閾値としている。米国運輸省道路交通安全局（National Highway Traffic Safety Administration：NHTSA）は、衝撃持続時間の長さを考慮した Head Injury Criterion：HIC を提案した¹²⁾。

$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}_{max}$ (4)

t_1, t_2 ($t_1 < t_2$) は HIC が最大を取る値であり、従来 $t_2 - t_1$ の最大

Fig.1 Wayne State Tolerance Curve: WSTC⁹⁾. WSTC defines a threshold for linear fracture of skull. Any point above the curve denotes life-threatening.

値としては便宜上 36 ms が用いられてきたが、近年では頭蓋骨骨折との相関が高い 15 ms が用いられることが多い。閾値は、一般に 1000 が用いられる。平均加速度と作用時間に着目した評価法は他にもいくつか提案されているが、HIC は頭部傷害基準として最も広く一般的に利用されているものである。また、欧州経済委員会による基準 94 項 (Economic Commission for Europe : ECE Regulation 94)「前面衝突時における乗員の保護」¹³⁾においては「衝突時の頭部の加速度が 80G 以下 (持続時間 3 ms 以上)」が規定されている。

2.2 衝撃荷重による評価

傷害値として衝撃荷重に着目した研究は 20 世紀中頃から Hodgson, Swearingen, Gurdjian らにより行われており^{14)~23)}, Nahum らによって 1968 年に傷害耐性が提案された²⁴⁾。Nahum らは 55~81 歳の男性 4 名と女性 6 名の屍体の頭蓋骨に潰れやすいニッケルでコーティングされた円柱型のインパクト (円形部面積 6.45cm²) (Photo2(a)) を落下させてインパクト先端に取り付くロードセルで衝撃荷重を計測し、その上で骨折の発生状況を精査した。パラメータは、死亡時の年齢、病歴、性別、防腐処理の有無、軟組織の影響、骨格の特徴、衝撃時間履歴 (衝撃継続時間、载荷速度、最大荷重、減衰) であり、打撃箇所は前頭骨 (Frontal bone)、側頭頭頂骨 (Temporoparietal bone)、頬骨 (Zygoma)、下顎 (Mandible) である (Photo2 (b))。頭部は首との境で切り離されており、気泡入りの柔らかいゴム材により支持した。また、Nahum らは、1975 年にも上顎 (Maxilla) を打撃箇所に加えた同様の実験を行っている²⁵⁾。上述した実験を基に Nahum らは臨床的に重要な骨折荷重の閾値として Table2 の傷害耐性を示した。臨床的に重要な骨折とは、微細なものではなく、目に見えて明らかな線状骨折のことを指す。これは、AIS2 (中傷等 : 1 時間未満の意識喪失、線状骨折) に当たり、前述した通り可逆的な傷害 (後遺症なく速やかに元へ戻る) を許容する傷害レベルの境界を示している。一般的に耐性値は個人差が大きく、定量的な評価には大きな幅を伴う。また、同じ衝撃荷重でもインパクトの衝突時の接触面積によって頭部に発生する応力は変わるため応力で評価すべきとの見方もあるが、Nahum らの提案した閾値は、Fig.2 に示すように長方形板や円形板と異なる形状のインパクトを用いた Allsop ら²⁶⁾や頭頂 (Vertex) 等に動的、準静的と载荷速度を変えて载荷した Narayan ら²⁷⁾といった他の頭蓋骨衝撃実験で得られた骨折荷重の中でも下限値を示しており、現状では閾値として適当な値であると考えられている²⁸⁾。また、Nahum らによると頭蓋骨骨折の傷害値としては、衝撃の作用時間や载荷速度は重要でなく最大衝撃荷重に依存することが示されている²⁴⁾。

日本の保護帽の規格 (労働省告示第 66 号: 昭和 50 年)¹⁰⁾でも衝撃荷重に着目した傷害耐性の閾値が決められており、保護帽を装着した人頭模型に質量 5 kg、半径 48 mm の半球形ストライカを 1 m の高さから落下させ、その際に人頭模型下に設置したロードセルで計測した荷重が 4.9 kN 以下であることを要求している。

自動車事故等では一般に慣性傷害が重要視される場合が多いが、天井材の衝突により発生する接触傷害を直接表す物理量は衝撃荷重であるため、以下では、Nahum 等の行った衝撃荷重による人体耐性の評価に着目し、筆者等が行ってきた実験結果と考察について述べる。

3. 天井材落下実験

3.1 実験概要

前述のように、天井落下時の衝撃荷重は主に天井材の材質と落下高さを与え、天井材の落下の角度を仮定すれば、ほぼ再現性をもって一意に観測することができる。このことから、人頭模型 (ダミーヘッド) に天井材を落下させ、その衝撃荷重等を計測する実験を実施した。主パラメータは

1. 天井材の材質
2. 落下高さ

である。人頭模型は、前出の保護帽の規定¹⁰⁾では木製が指定されているが、本実験では直接接触の際の変形の蓄積の影響を極力抑える

(a) Impactor with dilator tube at lower end

(b) Impact points of skull

Photo2 Impact test conducted by Nahum et al. using skulls of human cadavers²⁴⁾

Table2 Threshold of clinically significant fractures, readily detectable fractures, for skulls of both sexes

	Nahum A M, Gatts J D, 1968	Nahum A M, 1975
Frontal bone	Male: 4900 N, Female: 4000 N	3550 - 7150 N
Temporoparietal bone	Male: 2450 N, Female: 2000 N	-
Zygoma	Body	900 - 2900 N
	Arch	900 - 1800 N
Mandible	AP	2450 - 4000 N
	Lateral	1350 - 3350 N
Maxilla	-	650 - 1350 N

Fig.2 Fracture data of skull summarized from impact tests conducted by different researchers using human cadavers²⁸⁾. The Red and blue lines indicate a threshold for linear fracture of skull of elderly women and men, respectively.

ため JIS で規格化されているマグネシウム合金製の衝撃吸収性試験用人頭模型（大型）²⁹⁾を採用し、天井材の落下距離と衝撃荷重の時刻歴を計測した。人頭模型の質量は 5.4 kg と実際の人頭質量に近い。天井材は市販の大きさのものをを用いており、水平を保ったまま人頭模型に衝突するよう落下させている。これは、実際の天井材落下事故のビデオ映像の観察から、天井材はある程度連結された状態で水平を保って落ちてくる傾向が示されているためである。大規模施設における天井は特殊な場合を除いて多くの場合 20 m 以下に設置されている³⁰⁾。また、天井材の最大衝撃荷重は、ある程度設置高さが高くなると落下速度と共に収束する傾向にあるため（後述）、以下に示す一連の実験において落下最大高さは 20 m としている。ここでの落下距離とは、人頭模型の頭頂から天井材の下面までの距離を指す。つまり屋内においては利用者の頭頂から天井までの距離に相当し、天井高より利用者の頭頂高さを引いたものである。

3.2 実験方法及び計測システム

一連の実験は実験を行った時期により大きく 4 つのシリーズ (Table3) に分けられる^{31), 32)}。シリーズ 3³³⁾を代表例に実験装置の

設置方法 (Fig.3) を概説する。実験は屋内（倉庫）で行い、倉庫の棟梁（高さ約 19 m）の 3 か所にアイボルトを設置し、中央のアイボルトには遠隔操作型天井材保持解放装置を繋げた昇降式ホイストを設置し、その両脇に天井材を定位置に落下させるためのガイドワイヤーの上端を接続した。両ガイドワイヤーの下端にはワイヤー長さを調整できるフック付き金物が接続されており、シャックルを介してこれを磁力式鉄板保持器に接続し適切な張力を導入する。地面には厚さ 20 mm の鉄板を敷き、その上に人頭模型を設置した。試験体（天井材）は、ホイストから吊られた遠隔操作型天井材保持解放装置に紐を用いて吊るす。ガイドワイヤーに予め通しておいた天井材水平保持用の部材（パイプ(ステンレス, ϕ 5 mm, 長さ 50 mm), コの字チャンネル(アルミ, 1 x 7 x 10 mm, 長さ 300 mm), アングル(アルミ, 1.5 x 30 x 30 mm 長さ 90 mm)による構成)のアンクル部分に天井材を樹脂製結束バンドで固定 (Fig.4) し、ホイストにより天井材保持解放装置を昇降させることで、所定の高さからの落下実験を行う。ケイカル板等異方性のある天井材はワイヤー同士を結ぶ線と天井材の繊維方向が一致するよう設置した。

Table3 Experiment overview of ceiling drop tests using various materials

	Abbreviation	Material	Size (mm)	Weight (kgf)	Number of tests	
Series 1	AS	Aluminum Spandrel	132×1000×1.0	0.5	2~20 m, every 2 m, three times each	Totally 30 panels
	CS	Calcium Silicate Board	910×910×8.0	5.5	2~20 m, every 2 m, three times each	Totally 30 panels
	CS+RW	Calcium Silicate Board	910×910×8.0	9.5	2~20 m, every 2 m, three times each	Totally 30 panels
		Rock Wool Board	300×600×12.0			
	CS+RW+F(4)	Calcium Silicate Board	910×910×8.0	10.5	2~20 m, every 2 m, three times each	Totally 30 panels
		Rock Wool Board	300×600×12.0			
		Single Furring	17×25×0.8			
		Double Furring	17×50×0.8			
Series 2	MM①	Membrane(PVC coated PET textile)	910×910×0.6	0.2	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
	MM②	Membrane(PTFE coated glass fiber textile)	910×910×1.0	0.7	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
	MM③	Membrane(PTFE coated glass fiber textile)	910×910×0.6	0.4	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
	MM④	Membrane(PTFE coated glass fiber textile)	910×910×0.8	0.5	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
	MM⑤	Membrane(PTFE coated glass fiber textile)	910×910×0.4	0.4	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
	MM⑥	Membrane(PTFE coated glass fiber textile)	910×910×0.8	1.2	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
	MM⑦	Membrane(PVC coated glass fiber textile)	910×910×0.5	0.7	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
	MM⑧	Membrane(PVC coated glass fiber textile)	910×910×0.4	0.5	2, 10 m, three times each	Totally 6 panels
Series 3	RW	Rock Wool Board	300×600×12.0	0.7	2~20 m, every 2 m, 3 times each	Totally 30 panels
	CS	Calcium Silicate Board	910×910×8.0	5.5	4, 10, 16 m, one time each	Totally 3 panels
	GB(D)	Gypsum Board - Decorated	910×910×9.5	6.1	2~16 m, every 2 m, four times each (6, 10 m, 5 times each)	Totally 34 panels
	GB(R)	Gypsum Board	910×910×9.5	6.5	10 m, 3 times each	Totally 3 panels
	GB(R)	Gypsum Board	910×910×12.5	8.1	1 m, 2~16 m, every 2 m, 3 times each	Totally 27 panels
	GB(R)+RW	Gypsum Board	910×910×9.5	8.6	2~16 m, every 2 m, 3 times each (2, 4 m, 4 times each)	Totally 26 panels
		Rock Wool Board	300×600×12.0			
	GB(R)+RW	Gypsum Board	910×910×12.5	10.0	2~16 m, every 2 m, 3 times each (12 m, 4 times each)	Totally 25 panels
		Rock Wool Board	300×600×12.0			
	GB(P)	Gypsum Board - Porous	910×910×9.5 (Hole diameter: 6 mm, pitch: 22 mm, number of holes: 40×40)	6.1	2~16 m, every 2 m, 3 times each (8, 12 m, 4 times each)	Totally 26 panels
	GB(R)+GB(D)	Gypsum Board	910×910×12.5	12.8	2~16 m, every 2 m, 3 times each (8, 12, 16 m, 4 times each)	Totally 27 panels
		Gypsum Board - Decorated	910×910×9.5			
	GB(D)+F(4)	Gypsum Board - Decorated	910×910×9.5	7.1	2~16 m, every 2 m, 3 times each (12, 14, 16 m, 4 times each)	Totally 27 panels
		Single Furring	19×25×0.5			
		Double Furring	19×50×0.5			
	GB(R)+RW+F(4)	Gypsum Board	910×910×9.5	9.6	1 m, 2~16 m, every 2 m, 3 times each	Totally 27 panels
		Rock Wool Board	300×600×12.0			
		Single Furring	19×25×0.5			
		Double Furring	19×50×0.5			
	GB(D)+F(3)	Decorated Gypsum Board	910×910×9.5	6.9	1, 2, 4, 10, 16 m, 2 times each	Totally 10 panels
		Single Furring	19×25×0.5			
		Double Furring	19×50×0.5			
Series 4	LCS	Calcium Silicate Board	910×910×6.0	4.8	1~6, 8, 10 m, 3 times each (5 m, 5 times each)	Totally 26 panels
	ACM	Aluminum Composite Material	910×910×20.0	0.9	2~10 m, every 2 m, 3 times each	Totally 15 panels
	ACM+RW	Aluminum Composite Material	910×910×20.0	4.8	10 m, 3 times each	Totally 3 panels
		Ribbed Rock Wool Board	300×600×15.0			

※The number in parentheses after F indicates the number of furrings, and it is described as F (3) for three furrings and F (4) for four furrings.

In F (3), the furring is placed in the center of the ceiling material so that it is directly above the human head model at the time of collision.

Fig.3 Test apparatus of ceiling drop test on series 3

Fig.4 Connection detail of the guide wire and a ceiling board to keep ceiling boards horizontal

Fig.5 Installation of measuring instruments for recording impact velocity and load history during impact

Fig.6 Vibration mode of whole dummy head system identified by impact tests using an impact hammer

遠隔操作で天井材を解放し自然落下させ、人頭模型に衝突させる。その際、天井材の落下速度及び人頭模型に入力される衝撃荷重を計測する。計測器の設置状況を Fig.5 に示す。計測システムはロードセル（共和電業社製 LU-2TE）、スピードガン（JENOPTIK 社製レーザー距離計・スピードセンサー LDM301.100）、データロガー（キーエンス社製 NR-600）、ノート PC から成る。スピードガン及びロードセルのサンプリングレートはそれぞれ 100 Hz と 10 kHz である。10 kHz でサンプリングを行うと衝撃荷重が最大となる一波目の山のピーク付近で 3 点程度計測でき、最大衝撃荷重を捉えられていることを確認した。また、実験ではノイズを除去するため、ピークが大きく歪まないことを確認しながらカットオフ周波数 5 kHz のアナログローパスフィルタ（5 次バッセルフィルタ）をかけている。スピードガンのデータについては、5 点（50 ms 間）のデータを使って移動平均を行い、平滑化処理を行っている。

3.3 人頭模型の動特性

Nahum らの提案する最大衝撃荷重は、人頭を打撃した際にインパクト先端で計測された値であるのに対し、本天井材落下実験では天井材が脆性的な破壊を示すことから衝突面ではなく人頭模型を介してロードセルで衝撃荷重を計測している点で異なる。そこで人頭模型（ここでは、人頭模型、ロードセル、H 形鋼によって構成された系を表す）の振動特性が衝撃荷重測定に与える影響を知るために固有振動数を調査した。人頭模型下に設置したひずみゲージ式ロードセルは容量 20 kN（一般天井材用）と 0.5 kN（膜材料用）の 2 種類であり、インパクトハンマ（PCB Piezotronics 社製 model 086C03）を用いた打撃試験により行った。ここでは測定値に影響が出る可能性のある容量 20kN の場合の結果について報告する。人頭模型、ロードセル、H 形鋼の組み合わせ 6 パターンに対する試験とフーリエスペクトルによる解析の結果、3 つの卓越振動数とそれに対応する振動モード（Fig.6）を特定した。本実験が衝撃測定に与える影響については詳細な検討が可能でありそれに関しては次報に報告する。サンプリングレートを 10 kHz とすることで最大衝撃荷重を捉えることはできているため、この点の検討は次報に回し、以下では、本報告の論旨である安全性評価法について関連する流れに沿って述べる。

3.4 実験結果と考察

3.4.1 落下速度と理論値

得られた時刻歴落下速度を理論値と共に Fig.7 に示す。ここでは代表例として、シリーズ 3 のケイ酸カルシウム板 t8.0+ロックウール吸音板 t12.0 を 20 m から落下させた実験結果を示す。衝突速度

は、時刻歴速度の中で最大の値とする。比較のため理論値も表示する。空气中で自由落下する試験体の運動方程式より

$$ma = mg - \frac{1}{2}C_d\rho v^2 S \quad (5)$$

ここで、 m は試験体質量 [kg]、 a は加速度 [m/s²]、 g は重力加速度 [m/s²]、 S は代表面積（試験体見付け面積）[m²]を表す。空気密度 ρ は 1177 [g/m³]（温度 25 [°C]、湿度 50 [%]、大気圧 101.325 [kpa]）とし、抗力係数 C_d は 1.17（平板）とする。時刻 t における初期位置、初期速度を $x(0) = 0$ 、 $v(0) = 0$ とし、(5)式から落下距離 $x(t)$ 、落下速度 $v(t)$ を求めると次の 2 式が得られる。

Fig.7 Time course of velocity during impact (CS-t8.0+RW-t12.0, drop height 20 m)

Fig.8 Relation between impact velocity and drop height of typical ceiling materials in all test series.

Fig.9 Time course of impact load of CS-t8.0+RW-t12.0 measured at the bottom of the dummy head during impact

$$x(t) = \frac{v_t}{\lambda} \ln(\cosh \lambda t) \quad (6)$$

$$v(t) = v_t \tanh \lambda t \quad (7)$$

ここで、 $v_t = \sqrt{mg/k}$ 、 $\lambda = g/v_t = \sqrt{gk/m}$ 、 $k = 1/2C_d\rho S$ である。

Fig.8 に落下高さと人頭模型への衝突速度の関係を示す。衝突速度は同一条件で行った複数回（概ね 3 回）の試験の平均を示している。いずれの材料も落下高さの上昇と共に衝突速度は上がり、ある高さに達すると収束することがわかる。理論値は速度の上がり方も衝突速度も概ね実験を模擬できているが、理論値に比べ実験値の方がやや低い傾向にある。この原因としてはガイドワイヤーの摩擦の影響が考えられる。

3.4.2 衝撃荷重

Fig.9 にロードセルで記録した衝撃荷重の時刻歴の例を示す。以降では、衝撃荷重は時刻歴記録の中で最大の値とする。衝撃荷重の時刻歴は、約 1.5 ms（650 Hz）の周期で振動しており、これは、H 形鋼を含む人頭模型系の固有周期であると考えられる。衝撃の作用時間は、概ね 10 ms、長くても 40ms である。

代表例としてシリーズ 3 の石膏ボード t12.5 の衝撃荷重、衝突速度と落下高さの関係を Fig.10 に、各材料の落下高さとダミーヘッド下に設置したロードセルにより測定された衝撃荷重との関係を Fig.11 に示す。衝撃荷重も衝突速度と同様に同一条件で行った複数回（概ね 3 回）の試験の平均を示しており、Fig10 では標準偏差をエラーバーにて併せて示している。全体的な傾向は落下高さと衝突速度の関係に近く、軽量なものほど早く一定値に収束する傾向がある。一方、衝突速度に比べ、衝撃荷重はばらつきが大きい。衝突速度と衝撃荷重とは傾向がよく一致しており、衝突速度は前節で述べたように簡単な計算から求めることが可能である。従って、各天井材について衝突速度と衝撃荷重との簡易な換算式が導出できれば、必ずしも全ての落下高さにおける実験を行う必要はなくなるものと期待される。

3.4.3 破壊モード

破壊モードに関する考察を行う。アルミスパンドレルと膜材は割れることなく変形する。ケイ酸カルシウム板や石膏ボード等の天井材は脆性的に破壊する。落下高さが 2 m 付近で低い場合には天井板は 2 つに割れ破壊モードは天井幅全体にわたる曲げ破壊となる。

Fig.10 Relation between impact velocity, impact velocity and drop height with indication of standard deviation (GB-t12.5)

(a) Series 1 and 2

(b) Series 3(1)

(c) Series 3(2)

(d) Series 4

Fig.11 Relation between maximum impact load and drop height.
The red line indicates the threshold for linear fracture of temporoparietal bone of elderly women proposed by Nahum²⁴⁾.

(a) 2m (b) 6m (c) 20m

Photo3 Fracture modes observed by difference in drop height. (a) Bending mode. (b) Mixture of bending and punching mode. (c) punching mode.

落下高さが 6m 付近を超え高い場合には破壊モードは局所的なパンチング破壊となり 2 つに割れると同時に中央には人頭模型が突き抜けた跡が観察され、衝撃の作用時間は比較的短くなる傾向にあることがわかる (Photo3)。パンチング破壊は局所的な破壊であるため、その衝撃荷重に天井材全体の面積は大きく影響しないものと考えられる。但し、破壊モードの変化は衝撃荷重に大きな影響を与えてはいない。

4. 天井材の安全性評価法

4.1 評価法の概要

天井落下時の危険性は落下した天井材が人体に与える物理量とそれを受ける人体側の耐性値によって決まる。2 節の調査から、その安全性の目安として、天井材の衝突時衝撃力と Nahum らの提案する頭蓋骨の線状骨折の閾値 (AIS2 相当) を用いることで評価することができると考えられる。これは日本の保護帽の安全の考え方ともある程度共通するものである。落下した際の衝撃力が 2000 N を下回れば頭痛またはめまい程度で済むが、2000 N を超えると線状骨折や脳震盪が発生し、場合によっては人命に危害を及ぼしたりする危険性がある。本評価手法を用いることで天井の設置高さに合った適切な天井材を選定することが可能となる。

4.2 本評価法の利用上の注意事項

天井材の安全性評価法を実際に利用するに当たり、次の点に注意する必要がある。

- (1) 人頭模型の質量は 5.4kg であり、実際の人間 (成人) の頭部の重さや形を模擬している。但し、頭蓋骨の硬さや皮膚等の質までは模擬できていない。人頭模型は金属でできているため頭蓋骨に比べて接触時間が短く、計測される最大衝撃荷重は大きめに出る傾向にあると考えられる。この点においては、安全側の評価を与えている。
- (2) 天井材は水平を保ったまま天井材のほぼ真ん中が人頭模型に当たるよう調整されている。これは天井材が斜めになって衝突した際より大きめの荷重となることが考えられ、ここでも安全側の評価を与えている。但し、鋭利な角や鋼製の下地等が直接当たった場合には、人体へ与える傷害の状況も大きく変化することが予想される。個々の人体への接触様態を網羅的に評価することは非常に難しいため、天井材を安全に利用するために鋭利な下地材等を用いないようにすることが重要となる。
- (3) 在来工法の天井では天井材は野縁等の連結により市販の大きさより大きな面積で落下する被害も見受けられるが、衝撃荷重は比較的局所的な破壊で決まることが実験時の観察から予想されるため、実験では市販の大きさのものを用いている。但し、局所的な破壊は衝突速度が高い場合に多く観察されており、衝突速

度の低い領域においては、天井面積の増加に伴い衝撃荷重も増加する危険性があると考えられる。

- (4) 在来工法の天井では、野縁と天井板が一体となって落下する場合がある。野縁が天井板に取り付くことによって天井材の面外の曲げ剛性が増大され衝撃荷重は高まる傾向にある。また、衝突箇所の直上に野縁が配されていた場合にはその傾向はさらに顕著に表れる。天井材が落下に至る損傷の弱点を予め知り、重たい下地材とともに落下することのない設計とすることが重要である。

天井材の安全性の評価を行う上では、こうした実験と実被害の違いをしっかりと認識する必要がある。その他にも、一般に天井材として用いられる材料の特性（重量や硬さ等）は製造や管理の段階である程度のばらつきが生じるため、同じ規格の天井材で実験を行っても最大衝撃荷重には幅が生じることに注意する必要がある。ばらつきの範囲を考慮したうえで十分な材料を選ぶことが大切である。

5. 結論

本報告では、

1. 天井材の安全性を評価するため、人体耐性指標の既往の研究調査を行い、落下した天井材が頭部へ与える影響の評価方法について考察した。その結果、既往の研究成果の中から Nahum 等の提案する最大衝撃荷重の閾値が有用であるという検討過程を示した。
2. また、一般的に多く用いられている代表的な天井材を用いた人頭模型への落下実験を行い、異なる落下高さにおける最大衝撃荷重を計測し、落下高さとの関係をグラフ化した。その結果、衝撃荷重は落下高さが高くなれば衝突速度と共に増加すること、衝撃荷重は材料によって大きく異なり軽量な材料ほど早く一定値に収束すること、脆性的な材料は徐々にパンチング的な破壊モードに移行すること等が分かった。
3. その上で、天井材落下実験により測定した最大衝撃荷重と Nahum らが示した頭部の線状骨折 (AIS2 相当) の閾値を比較する天井材の安全性評価法を提案した。また本評価法を利用する上での注意点を示した。

一方、落下実験における衝撃荷重の評価において、落下高さや衝撃荷重の関係にばらつきがあるものが見られること、時刻歴データの波形は実験セットアップの固有周期に依存して一定の周期で振動しており、実験セットアップの振動の影響が混入している可能性があること等が示された。落下高さや衝撃荷重の傾向は、衝突速度との傾向とよく合っており、本報告の流れに大きな影響を与えるものではないが、同時に実験結果のより詳細な検討を行う必要性を示唆しており、これに関しては次報で報告する。また、衝突速度は簡単な計算式から予測できるため、各材料に対して衝突速度と衝撃荷重の換算式を用意することが可能と考えられるが、その換算には各材料に対応した適切かつ確実な評価の考え方が必要となる。それに関しては今後の研究課題としたい。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、東京大学生産技術研究所の大矢俊治技術専門員、荻芳郎特任講師（当時）、東京大学大学院生（当時）の

大塚彩、片山慎一郎、内田拓見各氏の協力を得ている。また本研究は、セコム科学技術振興財団研究助成「真に安全安心な公共空間のための天井工法と天井の安全性評価法の開発」及び JSPS 科研費 JP15H06142, JP20K14866 の助成を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Kawaguchi, K., A Report on Large Roof Structures Damaged by the Great Hanshin-Awaji Earthquake: International Journal of Space Structures, Vol. 12, Nos. 3&4, pp. 134-147, 1997. 12
- 2) Architectural Institute of Japan et al.: Report on the Hanshin-Awaji Earthquake Disaster, Building Series Volume 3, Structural Damage to Shell and Spatial Structures, Maruzen, 440pp., 1997. 10 (in Japanese)
日本建築学会他: 阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3 シェル・空間構造, 丸善, 440pp., 1997. 10
- 3) Ishikawa, K., Kawaguchi, K., Tagawa, K. and Sakai, T.: Report on Gymnasium and Spatial Structures Damaged by Hyogoken-Nanbu Earthquake, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 3, No. 5, pp. 96-101, 1997. 12 (in Japanese)
石川 浩一郎, 川口 健一, 田川 健吾, 酒井 達矢: 兵庫県南部地震による学校体育館及び公共スポーツホール等の被害調査報告, 日本建築学会 技術報告集, Vol. 3, No. 5, pp. 96-101, 1997. 12
- 4) Kawaguchi, K., Suzuki, Y., Oya, S. and Hattori, M.: Safety of Interior Spaces of Large Enclosures based on the Damage Investigation of Niigata-Chuetsu and Fukuoka-Seiho-oki Earthquakes, Seisan Kenkyu, Vol. 57, No. 6, pp. 39-41, 2005. 11 (in Japanese)
川口 健一, 鈴木 悠介, 大矢 俊治, 服部 真子: 新潟中越地震と福岡西方沖地震の被災調査にみる大規模集客施設の内部空間の安全性, 生産研究, Vol. 57 No. 6, pp. 39-41, 2005. 11
- 5) Architectural Institute of Japan: Guidelines for safety measures against accidental fall of ceilings and other non-structural components, Architectural Institute of Japan, 192pp., 2015. 1 (in Japanese)
日本建築学会 非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会: 天井等の非構造材の落下に対する安全対策指針・同解説, 日本建築学会, 192pp., 2015. 1
- 6) Mizuno, K.: Crash Safety of Passenger Vehicles, The University of Nagoya Press, 309pp., 2012. 2 (in Japanese)
水野幸治: 自動車の衝突安全, 名古屋大学出版会, 309pp., 2012. 2
- 7) Association for the Advancement of Automotive Medicine: The abbreviated injury scale. (1990 rev. ver.), Translation supervised by The Japanese Association for The Surgery of Trauma and Japan Automobile Research Institute, Translated by The Japanese Association for the Surgery of Trauma (Trauma Registry Committee), Herusu Shuppan, 83pp., 2003. 10 (in Japanese)
Association for the Advancement of Automotive Medicine: AIS90 Update 98 日本語対訳版 日本外傷学会, 日本自動車研究所 監訳, 日本外傷学会 trauma registry 検討委員会 訳, へるす出版, 83pp., 2003. 10
- 8) Messerer, O.: About Elasticity and Strength of Human Bones, J. G. Cotta's Bookstore, 103pp., 1880
Messerer, O.: Über Elasticität und Festigkeit der menschlichen Knochen, J. G. Cotta'sche Buchhandlung, 103pp., 1880
- 9) Lissner, H. R., Lebow, M. and Evans, F. G.: Experimental studies on the relation between acceleration and intracranial pressure in man, Surgery, Gynecology and Obstetrics 111, pp. 329-338, 1960. 9
- 10) Ministry of Labour: provision of a safety helmet, Ministry of Labour Notification No. 66, 1975. 9 (in Japanese)
労働省: 保護帽の規定, 労働省告示第六十六号, 1975. 9
- 11) Gadd, C. W.: Use of a weighted-impulse criterion for estimating injury hazard, SAE Technical Paper 660793, pp. 95-100, 1966. 2
- 12) Kleinberger, M., Sun, E., Eppinger, R., Kuppa, S. and Saul, R.: Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems, NHTSA, 120pp., 1998. 9

- 13) United Nations Economic Commission for Europe: ECE (Economic Commission for Europe) Regulation No.94, p.10, 1958 agreement (Rev.1/Add.93)
- 14) Gurdjian, E. S. and Lissner, H. R.: Deformation of the skull in head injury studied by stresscoat technique, Surg. Gyn. Obst. 83, pp. 219-233, 1946. 8
- 15) Gurdjian, E. S., Lissner, H. R. and Webster, J. E.: The mechanism of production of liner skull fractures; further studies on deformation of the skull by the stresscoat technique, Surg. Gyn. Obst., Vol. 85 No. 2, pp. 195-210, 1947. 8
- 16) Gurdjian, E. S., Webster, J. E. and Lissner, H. R.: Studies on skull fracture with particular reference to engineering factors, Am. J. Surg., Vol. 78 No. 5, pp. 736-742, 1949. 11
- 17) Gurdjian, E. S., Webster, J. E. and Lissner, H. R.: Observations on prediction of fracture site in head injury, Radiology, Vol. 60 No. 2, pp. 226-235, 1953. 2
- 18) Hodgson, V. R.: Tolerance of the facial bones to impact, Am. J. Anat., 120, pp. 113-122, 1967. 1
- 19) Hodgson, V. R. and Thomas, L. M.: Breaking strength of human skull fracture with particular reference to engineering factors, US Department of Transportation, HS-800-583, Springfield, 189pp., 1972. 6
- 20) Hodgson, V. R. and Thomas, L. M.: Effect of long-duration impact on head, The 16th Stapp Car Crash Conference, pp. 292-295, 1972. 2
- 21) Hodgson, V. R. and Thomas, L. M.: Breaking strength of the human skull vs impact surface curvature, DOT-HS-801-002, 194pp., 1973. 6
- 22) Hodgson, V. R., Thomas, L. M. and Brinn, J.: Concussion levels determined by HPR windshield impacts, The 17th Stapp Car Crash Conference, 20pp., 1973. 2
- 23) Swearingen, J. J.: Tolerance of the human face to crash impact, Office of aviation medicine, FAA, Civil aeromedical research institute, Oklahoma City, 24pp., 1965. 7
- 24) Nahum, A., Gatts, J., Gadd, C., Danforth, J.: Impact tolerance of the skull and face, SAE Technical Paper 680785, 15pp., 1968. 2
- 25) Nahum, A.: The biomechanics of facial bone fracture, The Layngoscope, Vol. 85, Issue 1, pp. 140-156, 1975. 1
- 26) Allsop, D., Perl, T., Warner, C.: Force/deflection and fracture characteristics of the temporo-parietal region of the human head, SAE Technical Paper 912907, pp. 2009-2018, 1991. 10
- 27) Narayan, Y., Frank, A. P., Anthony, S. J., Patrick, R. W., Channing, L. E., Daniel, J. T., Richard, G. S.: Biomechanics of skull fracture, Journal of Neurotrauma, Vol. 12 No. 4, pp. 659-668, 1995. 5
- 28) Hosomi, R., Kawaguchi, K., Nakaso, Y. and Mori, H.: Fundamental research on the safety criteria of nonstructural components in large enclosures using human tolerance index: Part5: Experimental Results for Parietal Bones, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure I, pp. 1005-1006, 2013. 7 (in Japanese)
- 細見 亮太, 川口 健一, 中楚 洋介, 森 大: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する研究 その 5 既往の人頭崩壊荷重実験の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp. 1005-1006, 2013. 7
- 29) Japanese Standards Association and Japan Safety Appliances Association: JIS T 8133 Protective helmets for motor vehicle users, Japanese Standards Association, 36pp., 2007. 3 (in Japanese)
- 日本規格協会, 日本保安用品協会: JIS T 8133 乗車用ヘルメット, 日本規格協会, 36pp., 2007. 3
- 30) Uchida, T., Kawaguchi, K., Yoshinaka, S., Otsuka, A. and Katayama, S.: Preliminary study of safety of non-structural components in wide roof buildings: Part 1: Floor area and suspended height of ceiling, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-1, pp. 209-210, 2008. 7 (in Japanese)
- 内田 拓見, 川口 健一, 吉中 進, 大塚 彩, 片山 慎一郎: 大規模集客施設内部の非構造材に関する基礎的調査研究: その 1: フロア面積と天井設置高さに関するアンケート調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 209-210, 2008. 7
- 31) Katayama, S., Kawaguchi, K., Uchida, T., Ogi, Y. and Ohya, S.: Fundamental research on the safety criteria of non-structural components in large enclosures using human tolerance index: Part 2: Results of the experiments, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-1, pp. 1083-1084, 2009. 7 (in Japanese)
- 片山 慎一郎, 川口 健一, 内田 拓見, 荻 芳郎: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その 2 天井材落下実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1083-1084, 2009. 7
- 32) Uchida, T., Kawaguchi, K., Ogi, Y. and Ohya, S.: Fundamental research on the safety criteria of nonstructural components in large enclosures using human tolerance index: Part 3: Results of the experiments 2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, pp. 881-882, 2010. 7 (in Japanese)
- 内田 拓見, 川口 健一, 荻 芳郎, 大矢 俊治: 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その 3 天井材落下実験 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 881-882, 2010. 7
- 33) Nakaso, Y., Kawaguchi, K., Oya, S., Ogi, Y., Ozawa, Y., Hosomi, R., Masuda, Y. and Mori, H.: Fundamental Research on the Safety Criteria of Nonstructural Components in Large Enclosures: Drop Tests Using Plaster Boards, Seisan Kenkyu, Vol.64 No.6, pp. 95-100, 2012. 11 (in Japanese)
- 中楚 洋介, 川口 健一, 大矢 俊治, 荻 芳郎, 小澤 雄樹, 細見 亮太, 益田 悠司, 森 大: 天井材の安全性評価に関する基礎的研究: 石膏ボード落下実験, 生産研究, Vol. 64 No. 6, pp. 95-100, 2012. 11

A RESEARCH ON THE SAFETY CRITERION OF CEILINGS
USING HUMAN TOLERANCE INDEX (PART 1):
A PROPOSAL OF THE SAFETY CRITERION OF CEILING BOARDS SET AT A HEIGHT

Ken'ichi KAWAGUCHI^{*1} and *Yosuke NAKASO*^{*2}

^{*1} Prof., Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

^{*2} Project Lect., Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.

One of the most important and fundamental function of every building is to be a “shelter” for people inside, protecting them from various external disturbances. However once accidental fall of architectural finish suspended at a height, such as ceiling boards, happens, the building cannot keep people in the room safe anymore and the function of a “shelter” will be completely spoiled.

There are various causes of the failure of ceilings, such as dew condensation, water leak, earthquakes, wind, various vibration, rusting, deterioration, thermal deformation, and invasion of living things into ceiling space. Earthquake is just one of them. It is obvious that the main force that drags down non-structural components is the gravity and the acceleration of the gravity is almost unique everywhere on the earth. Since the phenomena is reproducible, it is possible to define the safety of each ceiling board according to its material and suspended height.

In this paper, the authors propose the quantitative evaluation procedure of the safety of ceiling boards, studying the knowledge of the human tolerance developed in the field of injury biomechanics.

In the first and second part, the authors show their review of studies about human tolerance index with special attention to how to assess the damage to a head under the impact load and explain applicability of the threshold proposed by Nahum et al. to the ceiling problem.

In the third part, they report the set-up and results of experiments in which they dropped many typical ceiling boards to a dummy head and recorded impact load to draw a diagram of the relationships between the maximum impact load and drop-height. The results show that the higher the drop-height is, the higher the impact speed and load become; the impact load varies very much according to the material, the lighter the material is, the faster it converges; and for brittle material, failure mode gradually becomes punching type as the drop-height goes up.

Providing these results, in the fourth part, the authors propose a new criterion to assess the safety of ceiling boards, by comparing the impact load of the board with the threshold of linear fracture of a skull (equivalent to Abbreviated Injury Scale (AIS) 2) proposed by Nahum et al. They also give some cautions for the application of the criterion. Moreover, they point out the possible influence of the natural frequency of the set up system to the results of experiments. This may not affect the general stream of the study and detailed investigation and discussion will be given in the following paper, part 2.

2021 年 2 月 10 日原稿受理, 2021 年 4 月 26 日採用決定)