

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1 人体耐性指標

正会員 内田拓見*
同 川口 健一**
同 片山 慎一郎*

非構造材 大規模集客施設 人体耐性指標
天井 吊り天井 地震

1. 序

近年、大規模集客施設における高所設置の非構造材落下事故が多く報告されている。地震にのみならず平常時に突然天井が落下する事故例も多い。これらは結露等による天井材の劣化などが原因と考えられている。

このような事故は今後も各地で起こる可能性が高く、非構造材が直下の室内利用者に対して及ぼす危険性について正しく把握する必要がある。

本研究は、設置高さや材質による天井材落下時の人体への危険度を評価する手法を開発することを目的とするものである。評価手法としては、自動車衝突時の安全性評価の分野等で用いられている人体耐性指標の数種類に着目し、天井材の人頭模型への落下実験によって得られる衝撃力をこれらを用いて評価することで、これらが天井材の危険性評価手法として妥当な指標となりうるかどうかを検討する。

2. 人体耐性指標の解説

2.1 はじめに

本研究では、実験で得られた衝撃荷重を幾つかの人体耐性指標を用いて評価する。既往の指標を以下概説する。

2.2. 衝撃荷重を用いた評価

2.2.1 Nahumの実験による崩壊衝撃荷重

Nahum(1968)は55歳から81歳の人間の頭蓋骨10個を用いて実験を行った。6個は男性のものであり、4個は女性のものであった。

前頭骨と頭頂骨に関して、1 inch²のインパクトを用いたDrop Towerによる衝撃実験を行い、致命的な頭蓋骨骨折を起こすための衝撃荷重を提案している。その値を表1に示す。

表1 頭蓋骨の崩壊衝撃荷重 (Nahum)

名称	前頭骨	頭頂骨	頬骨
崩壊荷重(kN)	4900	2450	1225

男女合わせた全ての実験結果の中で、前頭骨の崩壊衝撃荷重は最小値806 lbs 最大値1990 lbs、頭頂骨は最小値551 lbs 最大値1334 lbs、頬骨は最小値334 lbs 最大値633 lbsであった。しかし、実際は頭皮等の軟組織の影響が存在すると考えられ、上記の値にも多少の違いが出ると予想される。

2.2.2 労働安全衛生法規格検定による保護帽性能試験

保護帽の性能保証の為に重さ5キログラムの半球形ストライカを1メートルの高さから保護帽の頂部に自由落

下させるという実験が義務付けられている。

この時、人頭模型にかかる衝撃荷重が4.90kN(500kgw)以下であることが基準として要求されている。

2.3. 衝撃加速度を用いた評価

2.3.1 ECE、FMVSSによる規定

ECE 94(Economic Commission for Europe) 欧州経済委員会による基準94項「前面衝突時における乗員の保護」、FMVSS 208(Federal Motor Vehicle Standards) 米国連邦自動車安全基準208項「衝突時の乗員保護」において、

「衝突時の頭部の加速度が80g以下(3ms)」という事が定義されている。

2.4 衝撃加速度の時間積分を用いた評価

2.4.1 Wayne State Tolerance Curve

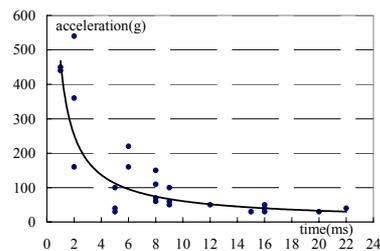


図1 Wayne State Tolerance Curve

頭部衝撃の危険性を定量化しようと試みた最初の試みの内の一つに1960年のWayne State Tolerance Curve(WSTC)がある。図1にそのグラフを示す。これは横軸に衝撃の作用時間、縦軸に加速度レベルをとった対数グラフに6つの点がプロットされたものであった。平均加速度と衝撃作用時間で定義される点が、WSTC曲線より下ならば、せいぜい脳震盪程度であり永久的な後遺症はない。一方、WSTC曲線より上ならば生命の危険があるというものであった。

2.4.2 GADD SEVERITY INDEX(GSI)

WSTCにはデータ数の不足、作用時間が1ms~6msまでしか対応していない事等、様々な難点があった。そこで、1966年にC.W.GADDは動物や死体の衝撃実験のデータ、人間のボランティアによるそり試験のデータなどを追加し、WSTCの改良版としてGADD SEVERITY INDEXを発表した。

GSIは以下の式によって算出される。

$$G.S.I. = \int_0^T a^n dt \quad (1)$$

a: 頭部加速度の反応関数(単位は重力加速度G)

n : 重み付け因子。通常 2.5
 τ : 衝撃作用時間
 t : 時間の積分パラメータ

頭部傷害の閾値は、WSTC 曲線との比較より 1000 が提案された。しかし、近年、ボランティアによるデータによって 1500~12000 くらいが、適切であるとされている。

2.4.3 HEAD INJURY CRITERION(HIC)
 1971 年に Versace は WSTC と GSI を分析研究し、その結果として新しい指標 Head Injury Criterion(HIC)を提案した。その後 HIC は NHTSA によって修正され、1972 年に定義された。HIC は現在、自動車のダミー実験で頭部障害の可能性を評価するために用いられている。WSTC では、正面軸方向の加速度が用いられていたが、HIC では合力の併進加速度を用いている。

HIC は以下の式によって算出される。

$$HIC = \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} a dt}{t_2 - t_1} \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (2)$$

a : 頭部の重心の加速度 (単位は重力加速度 G)
 t_1 : パルスの任意の時刻
 t_2 : t_1 を決めた時、HIC を最大にする時刻

積分時間 に関しては、初期の段階では 36ms が提案されていた。この時の閾値は 1000 であり、HIC が 1000 以上であると脳震盪の危険性があるという様に定義されていた。しかし、近年 HIC の使用を強い接触衝撃に限定するため積分時間を 15ms 以下、閾値を 700 に減らす事が提案されている。

2.5. 脳の相対変位を用いた評価

2.5.1 VIENNNA INSTITUTE INDEX(JIT)

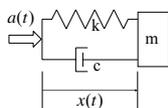


図 2 1 自由度振動モデル(JIT)

VIENNNA INSTITUTE INDEX は A.Slattleschek(1968)によって提案されたものであり、図 2 のような 1 自由度の振動モデルに基づいている。バネの変位 x は頭蓋骨に対する脳の相対変位とされた。WSTC との比較から最大耐性変位 $x_{101} = 0.092\text{inch}$ が算出された。衝撃を評価するため、加速度に対応する x_{\max} の大きさがこのモデルより求められ、耐えられる最大の値 $x_{101} = 0.092\text{inch}$ と比較される。耐性指標 J は以下のように定義される。

$$J = \frac{x_{\max}}{x_{101}} \quad (3)$$

x_{\max} : 与えられた加速度によって生じる最大の x
 x_{101} : WSTC より求められた最大変位。0.092inch

Slattenscheck によると、 $J < 1$ ならば、せいぜい永久的な後遺症のない脳震盪で、 $J > 1$ なら生命の危機があるという。

2.5.2 EFFECTIVE DISPLACEMENT INDEX(EDI)

Effective displacement index は J.Brinn によって提案され、

Vienna Institute model 減衰と角振動数を変化させたものである。特に 3~5msec の短いパルス波に対応することに重みが置かれている。

2.5.3 REVISED BRAIN MODEL(RBM)

Revised brain model は W.R.S.Fan によって提案されたものであり、Vienna Institute model を修正したものである。JTI のように、RBM も一自由度の質量とバネとダッシュポットの脳のモデルである。

2.6 頭蓋骨の平均ひずみを用いた評価

2.6.1 MEAN STRAIN CRITERION(MSC)

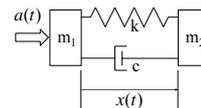


図 3 1 自由度振動モデル(MSC)

Mean Strain Criterion(MSC)は頭蓋骨の平均ひずみによって障害を評価する指標である。この指標は図 3 のような 1 自由度振動系モデルに基づいている。

Slanaker と McElhaney によって猿の頭蓋骨と脳に関する動的特性が広範囲の周波数について決定され、これらの結果により二つの質量体、バネ、ダッシュポットからなる頭部のモデル化が行われた。このモデルの動的特性の数値解析は実験値と整合性がとれていた。霊長類での実験結果が人間の死体での実験により拡張され、平均ひずみの耐性値 0.006in./in.が提案された。また、任意の方向への実験から平均ひずみの耐性値は方向に関わらず一定である事がわかってきた。また、アカゲザルに様々な方向から衝撃を与え、同量のひずみを生じる加速度を求めた結果、加速度の耐性値は前方で 1800G、側方で 1500G、後方で 1000G、鉛直方向で 980G であった。よって加速度への耐性は方向により変化すると考えられる。

3.まとめ

本報では既往の人体耐性指標を概説した。その 2 ではこれらを用いて天井材落下実験から得られた衝撃荷重を評価し、材質、高さによる危険性の変化を考察する。

謝辞

本研究は国土交通省平成 20 年度建設技術研究開発助成研究「大規模集客施設内部の非構造材の落下安全性評価法の開発」の助成を受けている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Japan Automobile research Institute, inc(JARI),Handbook of Human Tolerance, 1976
- [2] Brian G. McHenry, Head Injury Criterion and the ATB, 2004,
- [3] (社)自動車技術会 安全部会歩行者保護分科会.交通外傷バイオメカニクス
- [4]山崎工業株式会社ホームページ

*東京大学大学院

**東京大学生産技術研究所 教授・工博

*Graduate Student, University of Tokyo

** Professor, IIS, University of Tokyo, Dr.Eng.