

# 論文の内容の要旨

論文題目 天井落下時に発生する頭部衝撃荷重の  
逆問題解析による同定に関する研究

氏名 中 楚 洋 介

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。我が国においては1923年の関東大震災の頃から被害報告がなされてきた。地震時には広範囲に渡り同時多発的に被害が発生するため、天井の耐震化ばかりに意識が向いてしまう。留意すべき点は、地震のないときでも天井落下被害は日常的に発生している、という点である。その原因には、風、交通振動、結露、雨漏り、錆、経年劣化、温度変形等が挙げられ、水泳場や温浴施設、駅といった施設での被害が代表的である。2011年3月に発生した東日本大震災では、天井落下被害は少なくとも2000施設に及び、多くの死傷者が発生した。東日本大震災を契機に天井落下被害に対する関心は急速に高まり、産学官がこぞって安全対策に尽力している。安全対策を行うに当たり、第一に行わなければならないのが危険度評価である。既存の天井やこれから設計する天井が落下した場合に、人命に危害を及ぼすか否かという天井の危険度を評価することは非常に重要であり、最優先事項である。危険と評価された天井は迅速に天井材の軽量柔軟化、落下防止ネットの設置、撤去等を行い、人命保護を確保しなければならない。

天井落下時の危険度は、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。危険度を評価する上では、非可逆的な傷害を受けやすい頭部を対象とする。頭部傷害は接触傷害と慣性傷害に分けられるが、天井落下事故で発生する傷害

は接触傷害であるため、その傷害の発生要因として重要視される物理量は衝撃荷重である。

人体側の耐性値には、女性の頭蓋骨の中でも弱いとされる側頭頭頂骨の線状骨折を引き起こす荷重の閾値として1968年にNahumらにより示された2000 Nを採用している。これは、米国で用いられている「人命に対する危険度」の尺度であるAbbreviated Injury Scale : AISにおいて、AIS2（中傷等：1時間未満の意識喪失，線状骨折）に当たり，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。しかし，人体実験は倫理的な問題もあり，応力レベルでの提案は数値解析上でしか行われていない。Nahumらの提案した閾値は，他の研究者が異なるサイズのインパクトを用いて行った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る。また，Nahumらによると耐性に対して衝撃の作用時間や載荷速度は重要な要因でなく最大衝撃荷重に依存することが示されている。

天井が落下した際に発生する衝撃荷重は主として天井材の設置高さや材質に依存する。著者らは，天井材落下実験を行い各種天井材の落下衝撃荷重を計測してきた。天井材落下実験では，JISで規格化されたマグネシウム合金製の衝撃吸収性試験用人頭模型に市販の大きさの各種天井材を様々な高さから水平を保持したまま落下させている。人頭模型は，地面に敷かれた鉄板上のH形鋼を土台として設置されており，人頭模型とH形鋼の間に設置したひずみゲージ式ロードセルで時刻歴荷重を計測している。

以上のように，天井材落下実験で得た最大衝撃荷重と頭蓋骨骨折の閾値を比較することで天井の危険度を定量的に評価することができる。但し，天井材落下実験はあくまで実被害を模擬して行ったものであり，その違いには十分注意した上で評価を行う必要がある。

上記の危険度評価手法において重要な課題として挙げられるのが，天井材の衝撃荷重の同定である。Nahumらはインパクト先端に取り付くロードセルで計測した荷重を基に閾値を

提案している。一方で、天井材落下実験では、天井材は一般的に衝突時に脆性的な破壊を示す場合が多いため、衝撃面での荷重を計測することは困難であるという理由から人頭模型下に設置したロードセルで荷重を計測している。そのため、衝撃面で発生する荷重と人頭模型を伝わってロードセルで計測される荷重には何らかの差異が生じていると考えられる。本研究では逆問題解析手法を適用することで、天井材落下実験において人頭模型下のロードセルで記録した荷重から衝撃面での荷重を次のように同定する。人頭模型に作用する衝撃力を入力、ロードセルの記録を出力とする線形の系を仮定すると、入力と出力はインパルス応答関数を用いて畳み込み積分により関係付けられる。入出力を同時に計測できるインパクトハンマを用いた打撃試験を行い、インパルス応答関数を予め求めておくことで、天井材落下実験で計測した出力から逆畳み込みにより入力である衝撃力を求める。

本研究の目的は、次の4点である。

1. 既往の天井材落下実験で不十分であった石膏ボードの衝撃荷重等のデータを蓄積する。
2. インパクトハンマを用いた打撃試験により推定した人頭模型の伝達関数を評価する。
3. 圧電型のパッドセンサにより衝撃面直下の荷重を計測した天井材落下実験を通して、得られた衝撃荷重と逆解析の推定結果を比較することで逆解析の妥当性を検証する。
4. 既往の天井材落下実験のデータを利用することで、逆解析により各種天井材が様々な高さから人頭模型に落下した際に衝撃面で発生する荷重を同定する。

本論文は、以下の7章から成る。

第1章では、本論文の目的、研究の背景及び本論文の構成について述べ、本論文の概略を説明している。

第2章では、天井材落下実験の結果を纏めている。石膏ボードは不燃材で安価という利点から天井材として世に広く普及しているが、既往の天井材落下実験では十分なデータを得ることができていなかった。そのため、石膏ボード落下実験を新たに行い、その結果を既往の実験結果に加えて纏めている。

第 3 章では、逆問題解析の理論について紹介している。天井材落下実験において、人頭模型下で計測した荷重は衝撃面からロードセルに伝わるまでに土台である H 形鋼を含めた人頭模型の系の振動特性や人頭模型自体の影響を受けて増減している。そこで、ロードセルの記録から衝撃面で発生する衝撃力を逆問題解析により推定する。逆問題解析とは、応答や結果から入力を推定する逆問題の扱いを指し、既に様々な物体の衝突における衝撃力の同定にも応用されている解析手法である。

第 4 章では、衝撃の加わる人頭模型頂部から人頭模型下に設置したロードセルまでの伝達関数を同定している。逆問題解析は、次の 2 段階で行う。1. 物体に作用する衝撃力（入力）と応答（出力）を同時に計測し、これらの測定データをフーリエ変換して系の伝達関数を同定する（較正実験）。2. 出力の記録のフーリエ変換を伝達関数で除し、フーリエ逆変換して入力を算出する。本研究では、較正実験としてインパクトハンマによる打撃試験を行い、伝達関数を同定した。

第 5 章では、頭頂部から 3 cm 下の水平面で切った分離型人頭模型に 1 mm 厚の圧電型パッドセンサを挿入し、新たに天井材落下実験を行うことで天井材衝撃面付近の荷重を計測した。実験を行うに当たり、新たに製作した分離型人頭模型とパッドセンサの性能の検証及びパッドセンサで計測した荷重が衝撃面での荷重とほぼ同等とみなせるかの確認を打撃試験により行った。天井材落下実験において、パッドセンサの計測値と逆問題解析による推定衝撃荷重を比較することで逆問題解析の妥当性を示している。

第 6 章では、過去に行った天井材落下実験の結果を利用し、逆問題解析により各種天井材の衝撃面での荷重を同定している。

第 7 章では、本論文を通して得た結論を述べている。

付録には、軽量新素材天井材の衝撃力の同定結果を載せている。また、著者がサブテーマとして研究していた放物線状ケーブルを用いた吊り天井の地震時挙動の制御法についても併せて載せている。