

令和 5 年 5 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14866

研究課題名（和文）天井等落下物に対する人頭有限要素モデルを用いた危険度評価手法の確立

研究課題名（英文）Development of the Criterion of Falling Objects such as Ceilings Using Human Head FE Model

研究代表者

中楚 洋介（Nakaso, Yosuke）

東京大学・生産技術研究所・特任講師

研究者番号：70756361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：世界各国で地震のみならず結露や雨漏り等の要因で日常的に発生している天井落下被害に対し、衝突時に発生する衝撃荷重と適切な人体耐性指標を比較することで危険度の定量的な評価手法を開発した。衝撃荷重は、マグネシウム合金製の人頭模型に天井材を衝突させ人頭模型直下のロードセルにより計測している。本研究では、様々な落下状況下における衝撃荷重や頭部に生じる応力等を人頭有限要素モデルを用いた数値解析により求め、より現実の被害に即した危険度評価手法の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界各国で地震のみならず結露や雨漏り等の要因で日常的に発生している天井落下被害に対し、衝突時に発生する衝撃荷重と適切な人体耐性指標を比較することで危険度の定量的な評価手法を開発した。衝撃荷重は、マグネシウム合金製の人頭模型に天井材を衝突させ人頭模型直下のロードセルにより計測している。本研究では、様々な落下状況下における衝撃荷重や頭部に生じる応力等を人頭有限要素モデルを用いた数値解析により求め、より現実の被害に即した危険度評価手法の検討を行った。

研究成果の概要（英文）：We proposed the quantitatively evaluation method by comparing the impact load generated during collision with the appropriate human tolerance for ceiling collapse, which occurs on a daily basis not only due to earthquakes but also due to dew condensation and rain leaks around the world. The impact load was measured using a strain gauge load cell installed under a dummy head. In this study, the impact load and the stress generated in a head under various fall conditions were obtained by numerical analysis using a human head finite element model, and a risk assessment method that was more in line with actual damage was examined.

研究分野：生命基盤構造工学

キーワード：天井 非構造材 安全性評価 人頭模型 衝撃 人体有限要素モデル

1. 研究開始当初の背景

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。2011年の東日本大震災でも天井落下被害が2000を超える夥しい数の施設で起こり、少なくとも死者5名を含む77名の死傷者が発生した。これを契機に産学官が安全対策に尽力しているが、依然として2週に一度の頻度で被害が報道されている。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危険度の評価は対策を講じる上でも最優先事項である。

著者らは、天井落下時に発生する衝撃荷重と適切な人体耐性を比較することで危険度を定量的に評価する手法を提案している。これまで、市販の大きさ(910mm角)の各種天井材をガイドワイヤーにより水平を保ったまま1~20mの高さから人頭模型に落下させ、人頭模型直下に設置したロードセルで荷重を計測しており、合計約800枚分のデータを蓄積してきた。

しかし、実験では実現象を完全に模擬することは困難なため単純化している。より現実の被害に即した危険度評価を行うため、実際の頭部と人頭模型の違いが与える影響、頭部に発生する応力、衝突時の天井板の角度や大きさについて数値解析によりパラメトリックに検討を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、人頭有限要素モデルを用いて天井材の衝突角度や大きさを変化させたパラメトリック解析により天井材の頭部への衝突を模擬し、実験では計測困難なひずみや応力分布まで詳細に調べることで、より現実の被害に即した天井材の危険度評価法を確立することを目的としている。天井材の危険度評価手法を確立することで、定量的な危険度の予測が可能となり、建築構造を専門としていない建物管理者や意匠設計者でも材料や設置高さの選択、補強や落下対策の必要性を自身で判断できるようになる。

3. 研究の方法

(1) 天井材の物性値の取得及び構成式の提案

天井材の衝撃解析を行うには、天井材の物性値の取得が必要となる。しかし、強度や剛性等の基本的な物性値ですらあまり公表されていない。また、多くの材料は、衝撃時のようにひずみ速度(材料の変形速度)が大きい場合には材料自体の強度が増加する傾向にあるが、天井材のひずみ速度効果については報告例がない。そこで、幅広い速度での載荷を行うため、万能試験機による静的・準静的載荷試験、落錘式の動的試験、スプリット・ホプキンソン棒法による衝撃試験を行い、広ひずみ速度域での天井材の物性値を取得する。さらに、試験結果に基づき天井材の構成式を提案する。

(2) 天井材落下実験の模擬解析

マグネシウム合金製の人頭模型を有限要素モデルに置き換え、天井材落下実験を模擬した時刻歴応答解析を行う。本解析では、通常時刻歴応答解析で良く求める変形モードや固有振動数ではなく衝撃荷重の最大値のみ算出することを目的としているため、人頭模型及び天井材は対称性を利用した1/4モデルとし、計算コストの削減を図る。人頭模型の底面は固定とし、他の部分は鉛直方向のみ動きを許容している。天井材は、落下開始位置は人頭模型から上空1mmとして所定の高さから天井材を落下させた場合における衝突直前速度を理論式によって算出し、速度荷重として天井材に与える。このときの衝撃荷重は、人頭模型底面に発生する反力を4倍(フルモデルへの換算)したものと算出する。ここでは、要素消去等により天井材の破壊まで考慮した解析を行う。

(3) 人頭及び人体有限要素モデルを用いた検討

天井材落下実験では、マグネシウム合金製の人頭模型を用いていたが、これは実際の人頭とは大きく異なる。そこで、図5に示すボクセル法による人頭有限要素モデルを用いた衝撃解析により実際の人頭を想定したシミュレーションを行い、最大荷重だけでなく頭部の応答加速度や頭蓋骨に発生する応力等についても考察を行う。

4. 研究成果

(1) 天井材の物性値の取得及び構成式の提案

万能試験機による準静的載荷試験、落錘式の動的試験、スプリット・ホプキンソン棒法による衝撃試験を行いデータの蓄積を行った。広ひずみ速度域での天井材等仕上げ材の圧縮特性を解明した。天井等仕上げ材の代表である、石膏ボード、ケイ酸カルシウム板、ロックウール吸音板は全て圧縮強度のひずみ速度依存性がひずみ速度 $10^{-5} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ の範囲で確認された。また、ひずみ速度 10^2 s^{-1} 付近で急激に強度が上がるのがわかった。但し、ひずみ速度依存性が材料自体によるものか、オープンセル構造という材料の構造によるものかは明らかではない。さらに、試

験結果に基づき Cowper-Symonds 構成式の定数を同定し、天井材の構成式を提案した。その他にも、それら仕上げ材の X 線 CT 撮像を行い、圧縮特性や強度のばらつき等に影響を与える材料の均質性や空隙率の調査を行った。さらに、天井材の安全性評価指標を提案し、その内容を日本建築学会構造系論文集に投稿した。

(2) 天井材落下実験の模擬解析

天井材落下実験の模擬解析を行った。駅等で良く利用される延性材料であるアルミ合金のスパンドレルを対象とし、まずは、弾塑性域における単純一軸引張試験を行い、材料データを取得した。マグネシウム合金製の人頭模型を有限要素モデルに置き換え、天井材落下実験を模擬した衝撃解析を行った。本解析では、通常の時刻歴応答解析で良く求める変形モードや固有振動数ではなく衝撃荷重の最大値のみ算出することを目的としているため、人頭模型及び天井材は対称性を利用した 1/4 モデルとし、計算コストの削減を図っている。人頭模型の底面は固定とし、他の部分は鉛直方向のみ動きを許容している。天井材は、落下開始位置は人頭模型から上空 1mm として所定の高さから天井材を落下させた場合における衝突直前速度を理論式によって算出し、速度荷重として天井材に与えた。このときの衝撃荷重は、人頭模型底面に発生する反力を 4 倍（フルモデルへの換算）したもとして算出する。本解析により、実験で見られた塑性化している範囲や変形形状、最大衝撃荷重を解析的に模擬することができた。

(3) 人頭及び人体有限要素モデルを用いた検討

ボクセル法による人頭有限要素モデル 100 万要素を超える精密な頭部有限要素モデルに加えて、トヨタ自動車株式会社と豊田中央研究所が共同で開発し、2021 年 1 月より無償で公開しているバーチャル人体モデル THUMS（サムス：Total Human Model for Safety）を用いて、頭部への天井材の衝突を模擬した解析を行い、応力状態やひずみ、圧力分布の比較を行った（図 1）。頭部だけでなく人体全体をモデル化した THUMS を用いることで、天井材衝突後の人体全体の挙動を追うことができ、また、頭部の次に深刻な怪我が発生しやすい頸部にかかる力なども推測することができた。さらに、既往の人体実験と比較を行うことで、傷害クライテリアの見直しも行った。一方で、有限要素法等による天井の衝撃解析は、複合材料の解析や破断解析等、非常に難易度が高く汎用的ではないため、より簡易的に最大衝撃荷重を推定する手法の提案も課題として明らかとなった。

(4) 福島県沖の地震により発生した天井落下被害の実地調査

当初計画の上記(1)～(3)に加え、2021 年 2 月 13 日の福島県沖の地震により発生した天井落下被害の実地調査を行った。実地調査では、仙台市内に位置する公共ホール、公共体育館、福島市内に位置する公共体育館の計 3 ヶ所の大規模集客施設を調査し、落下原因等を考察した。

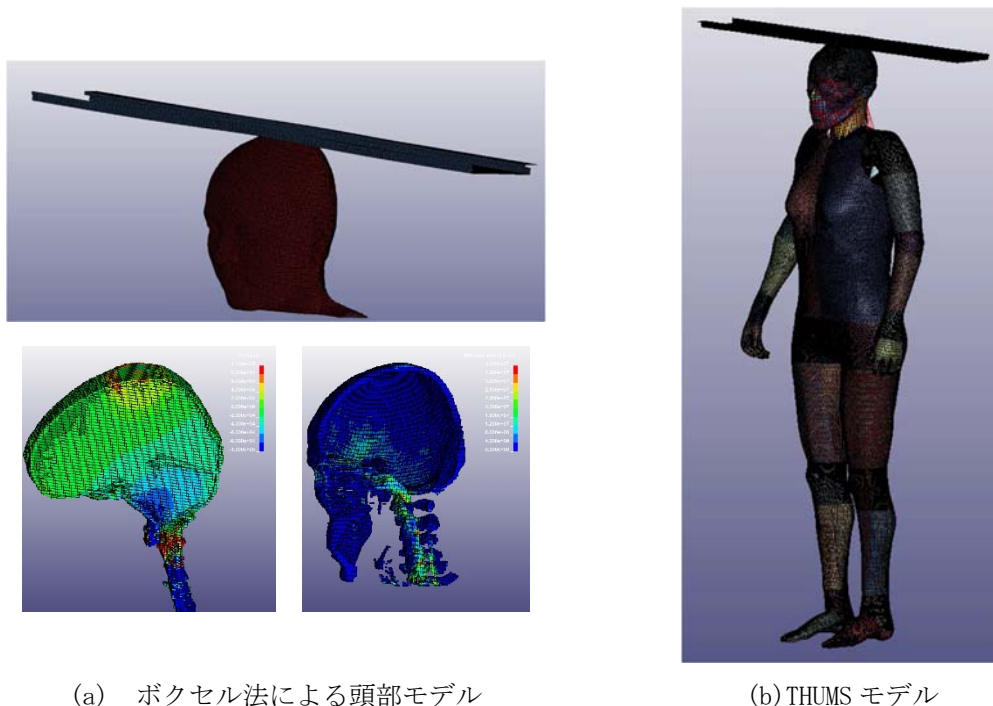


図 1 人体モデルを用いた天井材の衝撃解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中楚 洋介, 川口健一	4. 巻 87
2. 論文標題 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2）：逆解析による頭部衝撃荷重の同定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 274 ~ 284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.87.274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 川口健一, 中楚 洋介	4. 巻 86
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1281 ~ 1290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.86.1281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------