

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 7 月 31 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510212

研究課題名(和文) 墜落・転倒により人体頭頸部に生ずる衝撃荷重とその保護策に関する研究

研究課題名(英文) Study on Impact loads acting on human head and neck due to fall and the protection methods

研究代表者

日野 泰道 (HINO, YASUMICHI)

独立行政法人労働安全衛生総合研究所・建設安全研究グループ・主任研究員

研究者番号：70358422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：一般的にあまり知られていないが、墜落・転倒により毎年7千名を超える日本人が死亡している。本研究では、墜落・転倒により人体頭頸部に生ずる衝撃荷重を実験により測定するとともに、人体衝撃耐性に関する医学的知見との比較を行った。また、墜落・転倒時の人体保護を目的とする新しい人体保護具を試作し、その保有性能について検証を行った。

研究成果の概要(英文)：It is generally unknown, but over 7,000 Japanese die from slips and falls every year. This study tried to measure impact loads acting on human head and neck due to fall. The experimental data were compared with the human impact tolerance. Also, new protection equipment against falling is developed and verified to make clear the safety performance by experiments.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：墜落 転落 転倒 保護帽 衝撃荷重 安全帯 頭部外傷 頸部外傷

1. 研究開始当初の背景

我が国は、豊かな自然に恵まれた国土を有する反面、地震や台風などの自然災害が毎年発生する地理条件にある。そのため、土木・建築構造物の耐震・耐風技術に関する多くの研究が多数の研究者によって実施されている。一方、それらの建設工事中の事故により、毎年多くの建設労働者が死傷している。その数は、死亡災害で年間約 400 件、死傷災害で年間 2 万件以上に達している。しかしながら、この種の労働災害防止のための研究は、あまり行われていない状況である。

建設業における労働災害では、特に墜落に起因する災害が最も大きな割合を占めており、その防止対策が最も重要な課題である。この点墜落・転落事故は、建設現場だけでなく、普段の生活の中でも多く発生している。一般的にはあまり知られていないが、墜落・転倒事故を直接の原因として、毎年 7 0 0 0 名を超える日本人が死亡している状況にあり、2009 年においては、交通事故に起因する死亡事故件数を上回るに至っている。高齢者が増加傾向にある日本の状況を踏まえると、墜落・転落事故に起因する死亡事故が更に増加することが懸念される。また後遺障害の発生や、同種事故を契機とする身体弱体化による様々な疾病の発生は、国家社会保障費の増大傾向に拍車をかけることも予想される。加えて若者の死亡原因は、墜落・転落事故などの“不慮の事故”が最も大きな割合を占めている。少子化時代に日本の将来を担う若者を事故で失うことは、国益を大きく損なう事といえる。以上から、墜落・転落に対する安全対策の確立は急務な課題である。

墜落・転倒事故による傷害部位としては、従来から頭部が注目されている。旧労働省の労働災害統計年報や最近の日本外傷学会の外傷データバンクの統計データにおいても、頭部が主要な外傷部位の一つであることが示されており、頭部保護は重要な課題と考えられる。一方、外傷等の“異常死”は、日本で年間約 15 万 5 千件発生しているが、このうち法医解剖によって死因を詳細に調べているのはその 1 割程度であり、残りの 9 割については、外表検索により死因が特定されている状況である。そのため、各個の死因の正確性について、法医学者ならびに日本法医学会から疑問が投げかけられている。

この点につき、興味深い報告が島根県立中央病院医学雑誌(平成 3 年 8 月号 富永らの研究)に掲載されている。ここでは病院来院時に生存していたが治療後死亡した集団と、病院来院時に既に死亡していた集団を比較した事例報告がなされており、それによると治療後死亡した集団 105 名のうち、その約半分が頭部外傷死であった。これに対し、来院時に死亡していた集団のうち、頭部外傷死と

思われていた集団 40 名を詳細に分析したところ、うち 32 名において上位頸椎脱臼が観察され、それに起因する窒息死が死因であったと結論づけている。上位頸椎付近には、横隔膜を制御する神経組織が存在するため、同組織の損傷等が窒息死に至らしめた原因と思われる。以上から、頭部打撃を経験した外傷患者の生命保護のため、頭部外傷に加えて頸部外傷に起因する窒息死の防止が、重要な課題の一つとして検討されるべきだと考えられる。救急医療技術の発達は、目覚ましいものがある。来院までに死亡する患者を減らすことが、死傷事故を低減させる上で大いに役立つと思われる。

墜落・転倒事故には、高齢者等の身体的弱者の墜落・転倒や、高所作業中の労働者の墜落・転落、若者のスポーツ活動等に起因する墜落・転倒などがある。それらの防止対策には、原状において選択肢があまりない状況にある。原状の対策としては、手すりや滑りにくい床を設置することが、その代表的な例である。しかし、このようなインフラを人間の行動範囲全域に充実させることは困難である。そのため、個人それぞれが着用することで事故防止・傷害軽減を図ることのできる対策、すなわち“保護具の充実”が現実的な対策の一つとして考えられる。この点、保護具の代表例としては、ヘルメットが挙げられる。ヘルメットは、高所作業時や自動二輪車の運転時、あるいはスポーツ活動時において利用されている。しかし、ヘルメットの着用の有無により、安全性がどの程度向上するのかについては、一般的には知られていない。また、ヘルメットの長時間着用に対して抵抗感をもつ者が少なからず存在し、不適切な使用方法や未使用により、外傷が重症化するケースも生じている。そのため、ヘルメット着用の有無による安全性の違いについて、明らかにする必要がある。この点、ヘルメットの安全性評価基準には、頭部外傷の一種である脳震盪との相関性が指摘される指標 HIC (head Injury Criation) が利用されている。しかしながら、頭部外傷メカニズムには、脳震盪の他に様々な類型が考えられる。また、頸部損傷に対する安全性についても、検討を行う必要があると考えられることから、HIC とは異なる別の評価基準を併せて導入し、安全性を評価する必要があると考える。

2. 研究の目的

本研究は、墜落・転落により頭部打撃を経験した場合、人体頭頸部にいかなる荷重効果が生ずるのかについて、実験的に明らかにする。具体的には、人体力学特性を考慮した改良型人体ダミーを開発し、それを用いて墜落・転倒時に頭頸部へ作用する荷重・加速度の大きさを測定する。この際、ヘルメット等の保護具の着用状況や着用の有無について

も実験パラメータとし、その人体保護性能について、落下高さ等の実験条件ごとに整理を行う。また既往の文献等で提案された人体衝撃耐性を整理し、それらと実験結果の関係を分析することによって、頸部保護の必要性を明確にする。これらを通じて、墜落・転倒時の人体頭頸部保護を目的とする新しい人体保護具の試作を行い、人体頭頸部保護のための必要性能を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

墜落・転倒に対する人体頭頸部保護対策を明らかにするため、人体力学特性を考慮した墜落・転落用の人体ダミーを開発する。その下準備として、人体の力学的特性に関する文献調査を実施する。また実験結果の妥当な評価方法（安全性を評価するための物差し）を明らかにするため、人体衝撃耐性に関する既往の文献等の調査も併せて実施する。そして人体の墜落・転落現象を再現するための実験装置（人体ダミー落下台等）を製作し、本研究で開発（改良）した人体ダミーを用いた墜落・転倒実験を実施する。

得られた実験結果を基に、人体頭頸部の墜落・転倒に対する安全性の評価を行う。最終的には、人体頭頸部保護を目的とした新しい保護具の試作を行い、人体頭頸部保護のための必要性能の検討を実施する。

4. 研究成果

(1) 人体力学特性を考慮した墜落・転落用の人体ダミーの開発

人体頭部および頸部の衝撃時における力学特性を考慮した新しい墜落・転落用の人体ダミーの開発を行った。写真1に開発した人体ダミー（以下、改良型人体ダミーと呼ぶ）の概要を示す。改良型人体ダミーは、頭部、頸部および胴体部の3つの部位で構成するものとした。頭部には、自動車衝突安全の分野で利用されている頭部モデル（歩行者頭部インパクト：ISO ADULT 4.5kg）を使用した。胴体部は、人体の総重量を日本人男性の平均体重に近い約65kgになるよう、頭部および頸部の重量バランスを考慮しつつ調整できるものとした。この胴体重量は、約5kgの鉄板でおおよその重量調整を行った上で、少量の金属部品（ナット類）を取り付けることにより、調整が行えるものである。頸部は、欧米を中心として過去に行われてきた人体実験に関する論文を参考にして製作を行った。具体的には、屍体頭頂部に垂直に衝撃荷重を作用させた場合の軸方向履歴特性の実験結果（欧米での研究論文）をバイリニアの履歴モデルに簡略化し、その履歴特性を有する頸部軸方向バネを頭部と胴体部間に挿入した。なお、頸部の回転バネについては、不明な点

が多く様々な状況が考えられるため、これをゼロとした場合と、想定される回転バネより相当程度大きい強固なバネの2種類を用意し、その違いの影響についても実験で調べることとした。

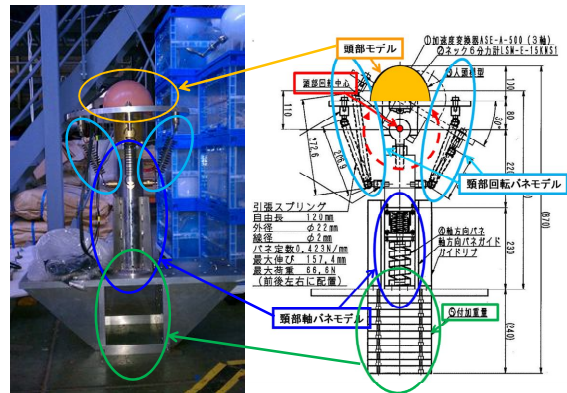


写真1. 開発した人体ダミーの概要

(2) 開発した人体ダミーによる実験結果

写真2に実験状況を示す。頭部が下側になるように吊り上げ、仮想地面から100mmの高さから改良型人体ダミーを垂直落下させた。本実験では、頸部回転バネの大きさとして2種類を設定し、垂直落下試験を実施した。その実験では、頭部重心位置に3軸頭部加速度計（共和電業社製：ASE-A-500SA5）を配置し、その測定データを(1)式に代入することで、頭部衝撃耐性指標HICの算定を併せて行った。また、仮想地面となる鉄板の下側にはロードセル（共和電業社製：LUK-A-200KNSA1）を配置し、落下時の衝撃荷重を測定した。これらの計測では、サンプリング周波数を10000Hzとし、ISO6487(2002年版)で規定する周波数のclass1000の特性を満足するようフィルタ処理を行った。

実験結果の一覧表を表1に示す。表よりロードセルにより測定される衝撃荷重は、高さ100mmというわずかな落下距離の条件において、11kNを超える大きな値が測定された。この結果は、同一条件で行った3回の落下において、ばらつきが小さいものであった。また頸部回転バネの違いによる影響についても、ほとんどない結果となった。これに対し、頭部障害指標として自動車衝突安全の分野等で幅広く利用されているHICの大きさは、いずれの実験においても50~70程度であった。HIC値は、700を超えると頭部傷害発生可能性があると考えられている。これとの比較では、本実験で得られた値は極めて小さく、傷害発生可能性は考えにくいものとなっている。一方、人体頸椎の圧縮強度は60~79歳といった高齢者では2kN、比較的若い20~39歳でも4kN位と言われている。これに対して、本実験で得られた荷重値は、それを大幅に上回る

ものであり、頭頸部傷害の発生が懸念される。以上から、墜落・転落事故に対する安全性を検討する場合は、頭部加速度の大きさ、その継続時間から算出される頭部傷害指標 HIC に加えて、当該衝撃によって頭頸部に作用する荷重についても併せて検討を行い、双方の値が許容範囲になるようにする必要が有ると考えられる。また、墜落・転落によって頭部を何等かの強固な物体へ直接打撃してしまった場合には、極めて大きな荷重が作用することになるため、現状においてはそのような状況をできる限り避けることが、頭頸部損傷を契機とした死傷・後遺障害を減少させる上で望ましいと考えられる。



写真 2 . 実験の状況

表 1 . 実験結果 (高さ 100mm)

回転 バネ	衝撃荷重 (kN)		頭部合成 加速度(G)		HIC	
有	11.5	11.6	53.9	53.1	38.6	38.0
		10.8		52.9		37.6
		12.2		55.6		40.1
無	11.8	11.4	64.0	61.0	57.3	53.3
		11.7		67.5		60.7
		12.1		63.7		57.8

HIC : Head Injury Criterion

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

(3)新しい保護具の開発

改良型人体ダミーの実験結果を受け、頭頸部に直接打撃を受けた場合の保護具を短期間に開発することは困難と考えられた。そこで墜落時のエネルギーをできる限り分散させるとともに、直接打撃による頭頸部損傷を回避し、墜落・転落時に人体の受ける致命的な傷害を防止するための保護具の開発を目指すこととした。

具体的には新しい安全帯の開発である。墜落時の課題としては、頭部のみならず頸部への過大な衝撃が作用するにもかかわらず、現状の製品では頭頸部の損傷リスクを回避するものとはなっていない可能性が考えられる。写真 3、写真 4 は、既存の安全帯を用いた落下試験の結果を示したものである。例えば「胴ベルト型安全帯」では、頭部、頸部、胴体部が大きく湾曲し、頭部傷害、脊椎損傷などの傷害が発生する可能性が懸念される他、ベルトによる身体圧迫により、内臓損傷、大動脈・大静脈損傷等の傷害発生リスクが考えられる(写真 3)。また「ハーネス型安全帯」では、同ベルト型安全帯のような身体の大きな屈曲は見られないものの、頭頸部の湾曲は少なからず観察される他、墜落による衝撃荷重の最大値が胴ベルト型安全帯よりも大きくなる傾向にある。そのため、頭部傷害や脊椎損傷の他、太い血管の集中している骨盤付近への過大な荷重が作用し傷害するリスクが考えられる(写真 4)。また、墜落阻止後においては、迅速な救助が必要とされているが、これらの安全帯では、ベルトによる局部圧迫等により結構不良が促進される可能性が懸念される。

そこで、墜落・転倒時に頭頸部に生ずる過剰な伸縮・屈曲を防ぐため、頸部側面および頭部前面に衝撃緩衝材を配置し、墜落時および墜落後(救助を待つ間)の傷害リスクを低減させるため、人体背面にハンモック状につり下げられるようなシートを配置し、これを頭部・胸部・腰部・大腿部の 4 点で全身を支持するベルトを結合した機構(新しい保護具)を開発した(図 1 参照)

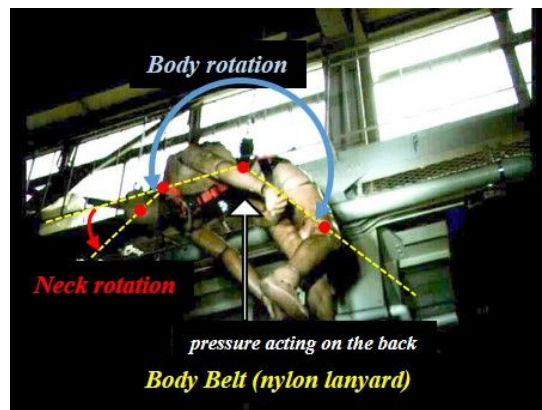


写真 3 . 胴ベルト安全帯を用いた墜落試験

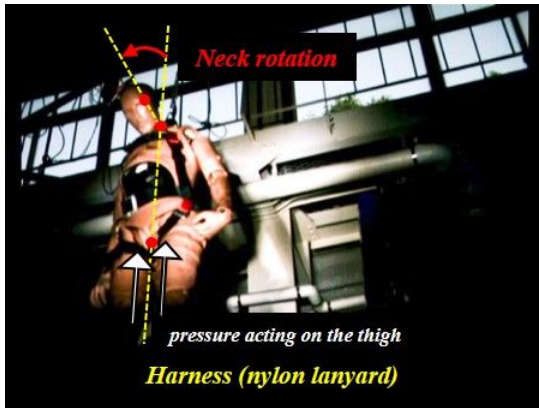


写真4 . ハーネス安全帯を用いた墜落試験

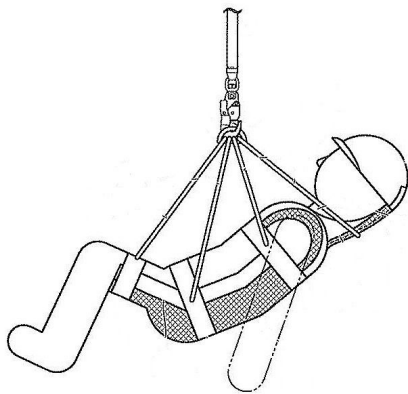


図1 . 新しく開発した安全帯のイメージ

(4)新しい保護具と既往の保護具の性能比較
 既存の安全帯との性能比較を行うため、簡単な比較試験を行った。それぞれの安全帯と長さ 1.7m のランヤードを連結し、ランヤードのフックを脚元の高さに固定し、人体ダミーを用いて落下試験を行った。その結果を表2に示す。新しく開発した安全帯は、有り合わせの材料を使用して製作したものであったが、他の既存の安全帯と比較して、衝撃荷重に対する余裕や頭部に生ずる加速度の大きさが最も優れていた。したがって、この安全帯の性能を追求していくことで、大幅な性能向上と目的達成が期待できると考える。

表2 . 安全帯の性能比較 (実験結果)

	ランヤードに作用する衝撃荷重 (kN)	頭部合成加速度 (G)
基準値 (米国基準)	胸ベルト型 : 4kN ハーネス型 : 8kN	10G 以下 (200msec)
胸ベルト型	6kN 程度	30G ~ 100G
ハーネス型	8kN ~ 10kN	30G 程度
開発品	7.5kN	25G

これは航空機乗員が座席に座った状態でのものであり、明確な基準は現段階ではない。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Yasumichi HINO, Fundamental Study on Relationship between Human Injury Probability due to Fall and the Fall Height, Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, Volume 41, 2012, pp.3339-3342

Yasumichi HINO, Hiroki TAKAHASHI, and Katsutoshi OHDO, Experimental Study on Fundamental Performance of Safety belts for Fall Prevention, Proceedings of International Conference on Fall Prevention and Protection, 2013, pp.189-194

〔学会発表〕(計2件)

日野泰道、墜落・転倒に起因する頭部衝撃力に関する基礎的研究(その1 頭部衝撃荷重と Head Injury Criterion の関係) 日本建築学会大会学術講演梗概集、2013、pp.1339-1340

日野泰道、高橋弘樹、大幢勝利、安全帯の墜落時保護性能に関する基礎的実験、日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集、CD-ROM

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 保護具

発明者: 日野泰道、大幢勝利、高橋弘樹

権利者: 労働安全衛生総合研究所

種類: 特許

番号: 特許願 2013-269938

出願年月日: 2013 年 12 月 26 日

国内外の別: 国内

6 . 研究組織

(1)研究代表者

日野 泰道 (HINO, Yasumichi)

労働安全衛生総合研究所・建設安全研究

グループ・主任研究員

研究者番号: 70358422