

屋根工事で使用する墜落防護設備の具備条件に関する研究

日野泰道*

Requirements of Prevention Equipment against Falling from Roof

by Yasumichi HINO*

Abstract: Falling Accidents at the construction site of low rise houses have been recognized as the major cause of fatal accidents since the occupational safety and health law was instituted in 1972. There is a decreasing trend of the accidents in the last two or three years. It is thought that the reasons are due to “popular use of precedent scaffold installation method” and “decrease in the number of construction works”.

However, the number of accidents is still large. Especially, about 20 to 30 of falling accidents from roof periodically happened over the last decade and the decreasing trend of the accidents has not been observed. And in recent years, the construction work has changed from the construction of new house to extension or repair work. In some cases of extension or repair work, construction period and the budget for installation of the countermeasure against falling may not enough.

The purpose of this study is to get the fundamental data for the countermeasure against falling from roof by using many accident data. And also, the requirements of prevention equipment against falling from roof were discussed by using the obtained data.

The major findings obtained in this study can be summarized as follows:

- 1) Archetypal falling patterns of the victims on the roof surface from work position to eaves or verge are clarified by using the analytical results on the basis cause of falling and the motion. From the results, the falling patterns can be categorized into 3 types and the necessity of prevention equipment, which can prevent all these 3 types, is realized.
- 2) Falling velocity of the victim passing from the eaves to ground surface is estimated by using the data of falling point based on the many accident data. From the results, it is cleared that the maximum falling velocity is about 15km/h at the eaves, and 50km/h at the ground surface. This maximum velocity at the ground surface is very fast as it is approximately equal to the setting velocity of the automobile in the experiment for car crash safety.
- 3) Based on the estimated results of the falling velocity, the impact force of collision between the prevention equipment and the victim is discussed. From the results, it is cleared that the impact force is very large, and the victim may be injured. Especially, for the accident type of victim slides down the roof surface, the maximum impulse force is larger than the threshold value of head tolerance which was proposed by Dr. GADD. Therefore, it is necessary to apply the prevention equipment which can enlarge the collision area and can extend the collision time.

Keywords; Falling accidents, Roofing work, Falling velocity, Impulse force, Wooden structures

1. はじめに

低層住宅建設工事における墜落災害は、労働安全衛生法（以下、安衛法）が施行された昭和48年以降においても、死亡災害の発生件数が最も多い災害として認知されてきた¹⁾。しかしながらその発生件数は、ここ3～4年こそ足場先行工法^{2),3)}の普及や住宅着工戸数の減少⁴⁾などの要因により減少傾向がみられるものの、当時から約30年が経過した現在においても非常に多いと言える⁵⁾。このうち、特に屋根面からの墜落災害に注目すると、ここ10年では20～30件の死亡災害が毎年定期的に発生しており、災害の減少傾向はほとんどみられないのが現状である。また最近では新築工事に替わって増築・改修工事が増加する傾向にあるが、新築工事の場合と比較して、墜落防止対策にかかる建設費用や工期が十分でない場合があり、現場の立地条件などから現実的に実施可能な災害防止対策が確立されていない状況も考えられる。

そこで本研究では、低層住宅建設工事における屋根面からの墜落防止対策を確立するための基礎資料を得ることを目的として、当研究所で収集した屋根面からの墜落災害に関する災害調査データ（平成9年度分：計23件）を用いて当該災害の災害発生状況について検討を行った。そしてその知見に基づき、軒先に設置される墜落防護設備（手すり等）に必要なとされる条件について、ケーススタディにより検討を行った。

2. 事例データに基づく災害原因と問題点の分析

2.1 災害発生状況

Fig. 1 に墜落開始の初期原因について分類した結果を示す。墜落の瞬間が目撃された災害は半数程度であり、データとしては少ないものの、その初期原因はおおよそ、「足をすべらせたこと」、「無理な姿勢・反動」、および「足の踏みはずし」の3種類に大別することができた。このうちこの初期原因として最も災害が多いのは「足をすべらせたこと」によるもので、このうち半数以上（4件/6件）が屋根面の濡れた状態で発生していた。なお、この濡れの主な原因は雨であるが、これらは安全衛生規則（以下、安衛則）の解釈例規に記載された悪天候の条件にはあてはまらない程度の天候不順であった。このことから、少量の雨による影響も屋根面上での作業では軽視できないことが分かる。一方、このような天候であってもやはり作業は実施されることが考えられる。これは、例えば住宅の改修工事では、その現場に住む住人の生活に支障をきたさない



Fig. 1 Basis cause of falling.
墜落開始の初期原因



Fig. 2 Falling direction and falling posture.
墜落方向と墜落姿勢

ようにするため、ある段階まで作業が完了しないと作業を中止できないケースもみられるからである。このことから「足をすべらせたこと」そのものを防ぐことは現実的には難しいと考えられる。したがって、このような初期の墜落原因を災害に発展させないためには、手すりを適切に配置する等により、労働者の墜落を防止・防護することが必要である。

Fig. 2 に被災者の墜落した方向と、その墜落姿勢について分類した結果を示す。墜落方向については、被災者の墜落位置と屋根の傾斜方向の関係を調べ、「軒先方向」および「けらば方向」の2種類に分類した。その結果、「軒先方向」へ墜落する災害の方が災害発生件数として多く全体の74%を占めていた。しかしながら「けらば方向」へ墜落する災害も少なからず発生しており、こちらの方向への墜落も無視できないことが明らかになった。このことは、軒先方向のみならず、すべての方向に対する墜落防止対策が必要であることを示している。また墜落姿勢としては、目撃証言など

は安衛則第519条第1項（手すり、囲い、覆い等の設置）の不備で、約70%の災害で違反が指摘できると考えられた。これに対し、明確な法令上の違反が見受けられない現場は23件中1件であった。このことから災害発生現場では墜落防止対策があまり実施されていないことが分かる。逆に言えば、法令上の違反がなければ当該災害が発生する確率はとても低いこと、そして先に示した屋根面上での3種類の運動に対する安全性は、ある程度確保されていることが推測される。

2.3 手すり等を設置する上での問題点

手すり等を設置する設備として、一般的には足場が使用されることが多いと考えられる。これに対して現場での足場の設置状況について調査した結果がFig. 5である。なおこの分類では、局所的に足場が設置された現場や後に設置予定であった現場も「足場あり」としてカウントしている。このようになんかなり甘い評価基準で使用状況を分類したのにも拘わらず、改修工事における足場の使用状況は非常に悪いことが分かる。これは、新築工事と比較して工期や請負金額に違いがあるという問題と、現場の立地状況・使用状況から物理的に足場の設置が難しいという問題に起因すると考えられる。このことから簡易な設置設備や設置方法が必要である。

次に、墜落防止対策が取られていたものの災害に至った事例の災害発生状況について紹介する。Fig. 6にその災害事例の概念図を示す。またFig. 6に現在推進されている屋根からの墜落防止対策の例²⁾を示す。Fig. 6は、足場に設置した手すりの高さは安衛

Table. 1 Law violation at the Disaster Site. 法令違反について検討した結果

件数/総数	法令(安衛則)	法令の内容
16/23	519条第1項	囲い、手すり、覆い等の設置
6/23	519条第2項	安全帯または安全帯による危険を防止するための措置
6/23	653条第1項	物品・材料の落下の恐れ、手すり、覆い等の設置
4/23	517条の12	本邦に建築物の建築して各作業主任者の職務遂行
3/23	517条の13	本邦に建築物の建築して各作業主任者の職務遂行
1/23	526条第1項	安全に作務するための設備の設置



Fig. 5 Availability of temporarily scaffolds. 足場の設置状況

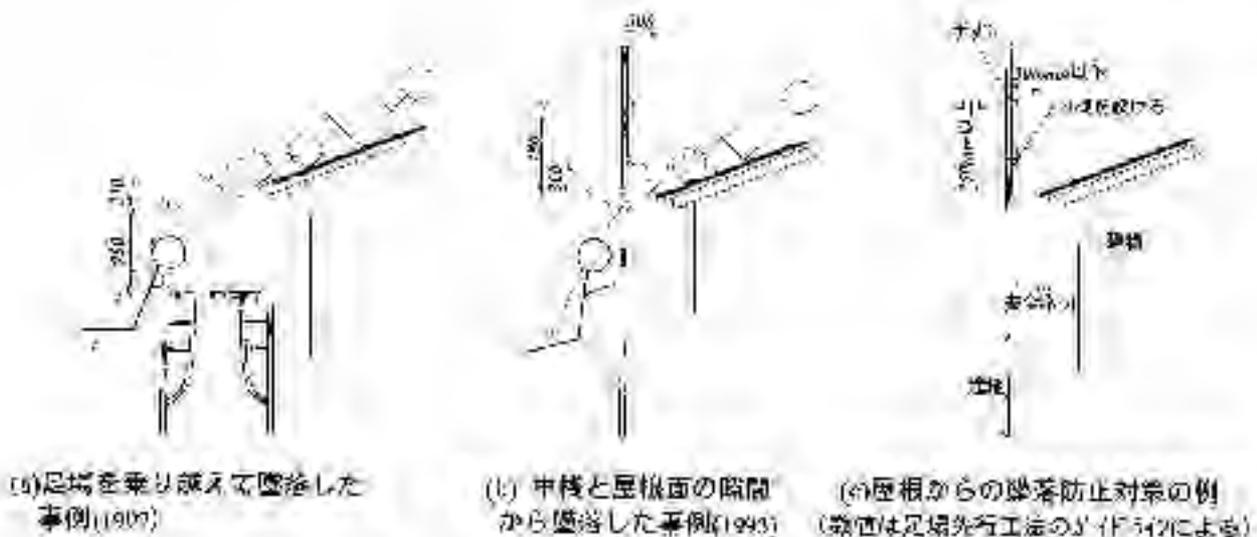


Fig. 6 Illustration of falling accidents and an example of prevention method of falling accidents. 災害事例の概念図および墜落防止対策の例

則で定める高さに対して適切であったが、結果として屋根からの墜落に対しては適切でない位置に手すりが設置されていたため墜落に至った事例である。これは、安衛則では足場からの墜落に対する手すりの設置高さは具体的な数値として記載されている(750mm以上の高さ)ものの、屋根からの墜落に対する手すりの設置方法については明確な記載がなされていないため、このような設置位置になったものと考えられる。

またFig. 6 は、Fig. 6 に示す「足場先行工法のガイドライン」で推奨する高さ到手すり・中棧が設置されていたのにも拘わらず、被災者を受け止めることなく墜落災害に至った例である。Fig. 6 からわかるように、中棧の設置位置は屋根面からの墜落を防止する上で極めて重要である。また、Fig. 5 では「軒先と足場の建地との間隔」(300mm以下)および「手すりの高さ」(750mm以上)により設置位置を定めているが、その適切な設置位置は屋根面と中棧との直線距離に依存していると推測される。さらに、ここでは具体的な事例を挙げなかったが、「けらば方向」への墜落を防止するための具体的な手すりの設置方法については、現在のところ全く明らかにされていないのが現状である。これらのことから、すべての方向に対する適切な手すりの設置方法を明らかにする必要がある。

2.4 災害発生状況から判断される設備の具備条件

前節までの検討結果より、屋根面からの墜落災害は大きく分けて3種類の運動形態の型があり、頭部損傷がその主な原因であること、そして墜落を防止する設備として、手すりおよび中棧の適切な設置位置を明らかにする必要性が明らかとなった。一方、墜落災害を死亡災害へ発展させないためには、被災者が地面へ接触する前に、その墜落運動を何らかの設備(手すりや

安全ネット⁶⁾等)で受け止め、かつその接触の際に発生する衝撃荷重に対して安全であることが必要となる。つまり、その設備に必要な条件として以下の3点が考えられる。

- 1) 被災者の墜落する隙間がないこと。
- 2) 被災者と設備の接触により発生する衝撃荷重により、設備が破壊しないこと。
- 3) 被災者と設備の接触により発生する衝撃荷重により、被災者に重大な損傷を及ぼさないこと。

そこで次章では、軒先に墜落防護設備を設置した場合を想定し、被災者がその設備と接触した際に発生する衝撃荷重の大きさについて、災害事例データを基に分析を行った。

3. 墜落防護設備に作用する衝撃荷重の検討

3.1 接触により発生する衝撃荷重の基本式

Fig. 7 に示すように、被災者が図中のA点で設備と接触した状態を考えると、その際に発生する衝撃荷重Fは、図に示す通り静的荷重F_Sと動的荷重F_Dの和として表現できる。すなわち、

$$F = F_s + F_D \tag{1}$$

ここで、F: 衝撃荷重

F_S: 静的荷重

F_D: 微小時間内の運動量の変化に基づく荷重

なお静的荷重F_SはFig. 7 に示す力の釣り合いから、動的荷重F_DはFig. 7 に示すように、体の各部位(各質点)での微小時間内における運動量の変化から下式のように表せる。

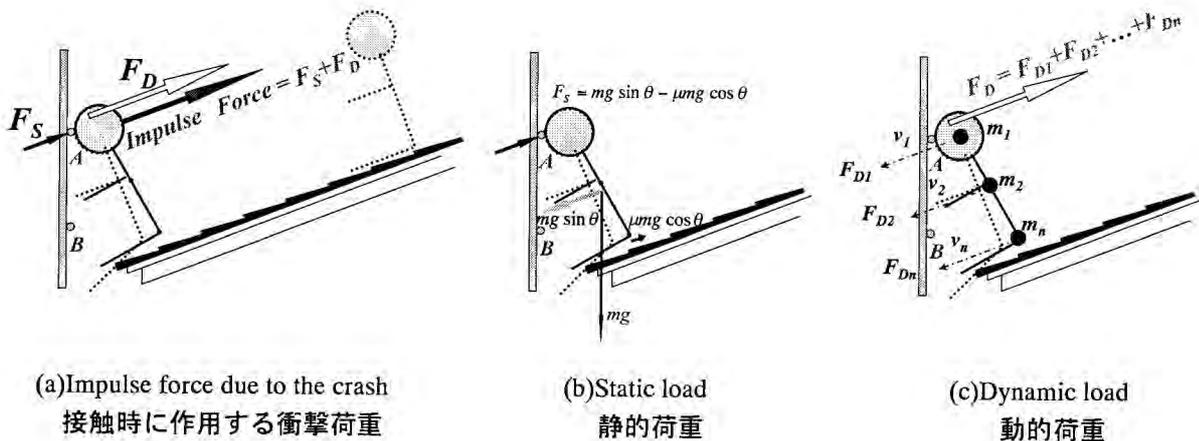


Fig. 7 Illustration of impulse force due to the crash. 被災者の設備が接触した際に発生する力

$$F_s = mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta \quad (2)$$

$$= mg (\sin \theta - \mu \cos \theta)$$

$$F_D = F_{D1} + F_{D2} + F_{D3} + \dots + F_{Dn}$$

$$= \frac{m_1 v_1 - m_1 v_{01}}{\Delta t} + \dots + \frac{m_n v_n - m_n v_{0n}}{\Delta t}$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i - m_i v_{0i}}{\Delta t} \quad (3)$$

ここで、 F_{Dn} : 衝突時間内において被災者の各部位で発生する動的荷重

v_i : Δt 秒後の各質点での速度

v_{0i} : 衝突する瞬間の各質点での速度

Δt : 衝突時間

μ : 屋根面の動摩擦係数

m : 被災者の質量

m_i : 被災者の各部位の質量

g : 重力加速度

θ : 屋根勾配

n : 質点の数

上式より、被災者と設備の接触により発生する衝撃荷重の大きさは、接触する瞬間の速度、衝突時間 Δt 、 Δt 秒後の速度、屋根角度、被災者の質量 m_i 、屋根面の動摩擦係数、の6つのパラメータにより決まることが分かる。なお、後の検討で明らかになることであるが、衝撃荷重の大きさは動的荷重が支配的となり、静的荷重の大きさはほとんど問題とならないため、以下では動的荷重に関する3つのパラメータ（衝突する瞬間の速度、衝突時間、衝突後の速度）について検討を進めることとした。

3.2 被災者の墜落速度の推定

本節では、災害事例データを用いて軒先位置および地面（墜落位置）の速度について推定を行った。

まず、その墜落速度の推定にあたり、被災者の運動形態を単純化するため、その墜落方向は災害発生件数の多い軒先方向のみを考えた。また被災者は、その重心位置に質量を集中させた1質点モデルに置換できるものと仮定した。そして被災者は軒先位置で屋根面と平行な速度を重心位置で有し、かつ軒先位置を原点として斜方投射の放物運動をするものと仮定した。（Fig. 8 参照）。なお軒先位置における被災者の重心高さは、調査結果からデータが得られないため屋根面（すなわちぜ口）として扱った。ちなみに軒先位置における被災者の実際の重心高さは、寝転んだ状態での

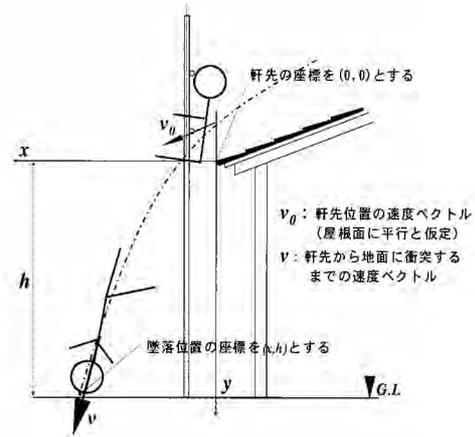


Fig. 8 Falling velocity estimation.
墜落速度の推定方法

重心位置（人の幅の半分:約120mm）から直立した状態での重心位置（足から臍までの距離:約1000mm）程度までの範囲内にあると考えられるが、このばらつきにより発生する誤差の大きさは、検討した範囲では最大約2割程度であり、この仮定が以下で示す推定結果に対して本質的な違いを生じさせないことを予め確認している。以下に、具体的な被災者の速度の推定方法を示す。

まず、水平方向の速度、変位はそれぞれ、

$$v_x = v_0 \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$$x = v_0 \cdot \cos \theta \cdot t \quad (5)$$

である。一方鉛直方向には下向きの一一定の加速度（重力加速度）が作用し等加速度直線運動をするので、

$$v_y = v_0 \cdot \sin \theta + g \cdot t \quad (6)$$

$$y = v_0 \cdot \sin \theta \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (7)$$

ここで、 (x, y) : 墜落位置（軒先を原点とする）

v_0 : 軒先位置における被災者の重心位置の速度

v_x, v_y : 被災者の速度成分

v : 被災者の重心位置の速度

t : 軒先から地面に衝突するまでの時間

となる。従って軒先位置における被災者の速度は、

$$v_0 = \sqrt{\frac{g \cdot x^2}{2 \cdot \cos^2 \theta \cdot (y - \tan \theta \cdot x)}} \quad (8)$$

となる。一方、地面に衝突するまでの速度は、各方向の速度成分の和として下式により得られる。

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (9)$$

3.3 墜落速度の推定結果

実際の災害における墜落位置 (x, h) および屋根角度のデータを代入して(8)式または(9)式から得られた速度(軒先位置および地面に衝突する瞬間の被災者の速度)と屋根角度の関係をFig. 9に示す。なおこの結果は、その入力データが明確で、かつ墜落時に足場等への接触がない災害(計10件)を対象としている。

まず軒先位置での被災者の速度(図中の白抜き: 印)について見てみると、墜落速度は3 km/h ~ 15km/hの範囲にあることが分かる。なお、屋根角度が20°以下の災害では墜落速度と屋根角度との間に関連性が見られず、いずれも人の歩行速度程度⁹⁾となっている。これは、屋根面上に働く摩擦抵抗力が、ある屋根角度を境にして滑落を生じさせる力より大きくなるため、屋根角度が小さいと「屋根面上を滑落するタイプ」の災害は発生せず、「倒れ込むタイプ」の災害のみが発生するためだと推測される。逆に屋根角度20°以上の災害では、その墜落速度にばらつきがみられるが、これは前章でも説明した被災者の運動形態の違いに起因して生じたものと推測される。次に地面に衝突した瞬間の被災者の速度(図中の白抜き: 印)について見てみると、屋根角度の違いによる影響は全く見られない。これは、墜落するまでの時間が長いため、初速度((4)式の右辺+(6)式の右辺第1項)の値ではなく、重力加速度の項((6)式の右辺第2項)の値が支配的となったためである。ちなみにその墜落速度は全ての災害で20km/hを越え、最大で約50km/hに達していることが分かる。この速度は自動車の衝突安全性を検討する実験⁹⁾において、自動車に設定する速度とほぼ等しく、極めて大きな速度であると言える。

3.4 推定結果に基づく衝撃荷重の検討

3つのパラメータ(衝突時間、衝突する瞬間の速度、および Δt 秒後の速度)を変動因子として、衝撃荷重の大きさについてケーススタディを行った。Table. 2にケーススタディで用いた4種類のCaseの諸元を示す。すべてのCaseで共通することは、設備と頭部が接触すること、すべての部位(頭部、胸部等)における衝突する瞬間の速度は等しいこと、 Δt 秒後には頭部の速度がゼロになることである。これに対し各Caseの相対的な違いは、衝突する瞬間の速度と、頭部以外の部位における Δt 秒後の速度である。(Fig. 10参照)なおCase 1(およびCase 3)は、 Δt 秒後も頭部以外の部

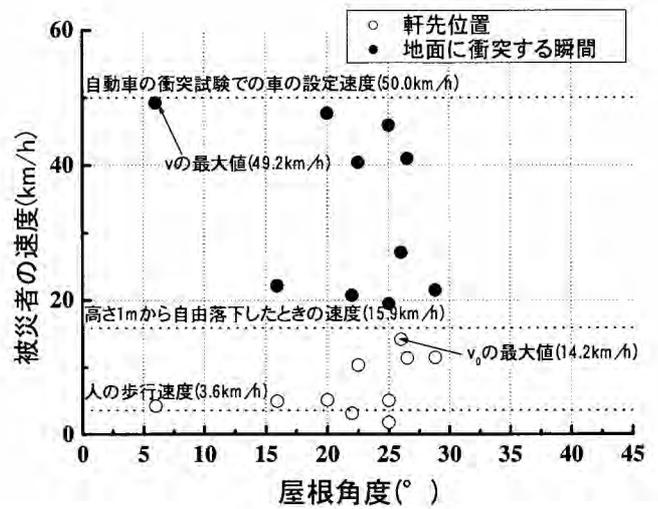


Fig. 9 Falling velocity of the worker. 被災者の墜落速度の推定結果

Table. 2 Parameters used in simulation. 解析諸元

	衝突する瞬間の速度	Δt 秒後の速度	
	すべての部位(質点)	頭部	他の部位
Case1	15.0 km/h	0.0 km/h	15.0 km/h
Case2	15.0 km/h	0.0 km/h	0.0 km/h
Case3	3.6 km/h	0.0 km/h	3.6 km/h
Case4	3.6 km/h	0.0 km/h	0.0 km/h

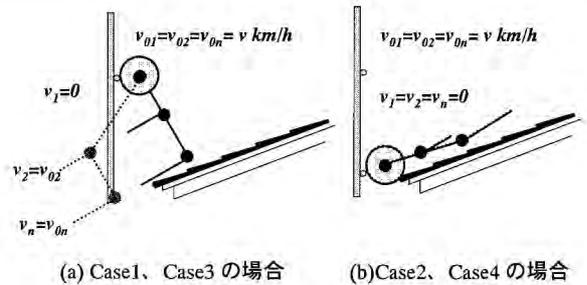


Fig. 10 Velocity of each mass. (Δt 秒後における各部位(質点)の速度

位で速度が変化しない状態、すなわち頭部と他の部位(質点)とが力学的にまったくつながっていない状態を想定しており、発生する衝撃荷重の下限值を与えるもの、Case 2(およびCase 4)は、 Δt 秒後にすべての部位で速度がゼロとなる場合、すなわちCase 1とは逆にその上限値を与えるものを想定している。

Fig. 11に、各Caseの衝撃荷重と衝突時間の関係を示す。図を見て分かるように衝撃荷重の大きさは、いずれのCaseにおいても静的荷重のみを考えた場合とは比べものにならない程大きいこと、そしてその大きさは

衝突時間の違いにより、極めて敏感に変化することが分かる。なお図中には、参考のため文献10でGADD氏が提案する頭部衝突に対する限界加速度((10)式参照)に、頭部質量として5kgを仮定して(11)式で求めた衝撃荷重の限界曲線を併せて示した。

$$A = 15.85 \cdot T^{-0.4} \quad (10)$$

$$F = GADD = m_{head} \cdot A \\ = 79.25 \cdot T^{-0.4} \quad (11)$$

ここで、 A ：頭部限界加速度 (G)

T ：衝突時間 (sec)

m_{head} ：頭部質量 (5kgを仮定した)

この式は、Wayne State大学を中心として1960年代に欧米で行われた屍体を用いた頭部の強度に関する実験データ(衝撃加速度)を用いて、頭蓋骨骨折の有無を分ける境界線を求めた研究成果であり、頭部耐性を検討する上で現在一般的に用いられているHIC値⁹⁾の基となった式である。((10)式を展開・移行すると、この式はHIC=1000という値になる。)ちなみに図中には、文献11に記載された実験値(加速度データ)を、頭部質量として同様に5kgを仮定して求めた衝撃荷重の値(図中の印および印)を併せて示しているが、式はその限界値の境界をおおよそ表しているようである。そこで、この式と各Caseとの関係について検討を行う。まず衝突する瞬間の速度が3.6km/hの場合、すなわち「倒れ込むタイプ」では衝撃荷重の上限値としてCase4の値を考慮すれば、安全性が確保できると考えられる。そこでCase4と(11)式の交点を求めたところ、衝突時間は約27msecでそのときの衝撃荷重の大きさは約340kgfであることが分かった。したがって「倒れ込むタイプ」に対しては、350kgf以上の強度を有し、かつ衝突時間が30msec以上となる設備を配置すれば、安全性が確保できると考えられる。一方、その速度が15km/hの場合、すなわち「屋根面を滑落するタイプ」について見てみると、上限値(Case2)は式と比較して極めて大きいことがわかる。ちなみに、Case2と(11)式との交点を求めたところ解がないことがわかった。このことから、この種の災害に対しては、もはや接触点が頭部1点のみでは衝撃荷重を限界荷重以下に抑えることは不可能であり、安全を確保するためには、その接触点数(または接触面積)を多くして、荷重を分散する工夫が必要である。なお、実際の衝撃荷重の大きさは、Case1とCase2で推定される結果の間の値になるが、具体的な衝撃荷重の大きさは、主に設置する各種設備の剛性に依存すると考えられるため、個々の設備の安全性を調査するためには、実験等による更なる検討が必要である。いずれにしても、現状における情報のみでこの種の災害に対する安

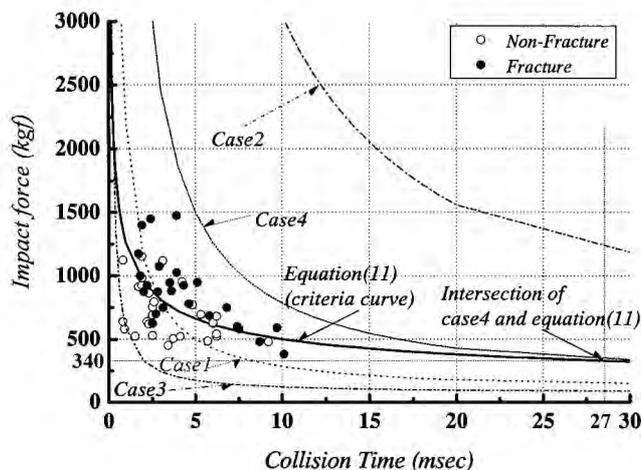


Fig. 11 Impact force due to crash.
接触により発生する衝撃荷重

全対策を考えるならば、設備としてネット等を配置することにより衝突時間を長くすること、そして接触点数(接触面積)を多くする工夫が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた成果をまとめると、以下のように要約できる。

- 1) 墜落の初期原因や、屋根面上での墜落過程を通じて、屋根からの墜落災害における典型的な運動パターンを抽出した。
- 2) 災害事例における被災者の墜落位置などの情報を基に、墜落時における被災者の速度の推定を行った。その結果、最大値は地面に衝突する瞬間で50km/h、軒先位置でも15km/hに達していることが分かった。
- 3) 墜落速度の推定結果に基づき、設備等に衝突した際に発生する衝撃荷重の大きさについて検討を行った。その結果、軒先位置における設備との衝突により被災者は大きな損傷を受ける可能性があることが分かった。そのため、墜落防護設備に衝突した時の衝撃を小さくするための工夫が必要であることが分かった。

参考文献

- 1) 産業安全技術総覧編集委員会「産業安全技術総覧」, 1999.12.
- 2) 労働調査会「平成12年度版 安衛法便覧」, 2000.5.
- 3) 建設業労働災害防止協会「足場先行工法に関するガイドラインの解説」, 1996.11.
- 4) 建設物価調査会「平成13年度版 建設統計年報」,

- 2001.9.
- 5) 日野泰道他「屋根作業における墜落災害の分析」, 第31回安全工学シンポジウム, 2002.7.
- 6) 産業安全研究所技術指針「安全ネット指針」, 1971.
- 7) 人間生活工学研究センター「日本人の人体計測データ」, 1997.10.
- 8) 原幸介「安全面から見た転倒特性の基礎的解析」, 平成12年度東京電気大学修士論文, 2000.
- 9) 交文社「新型自動車審査関係基準集」, 1998.3.
- 10) Charles W. Gadd, "Use of Weighted-Impulse Criterion for Estimating Injury Hazard", 10th Car Crash Conference, 1966, pp.164-174.
- 11) Priya Prasad and Harold J. Mertz, "The Position of the United States Delegation to the ISO Working Group 6 on the Use of HIC in the Automotive Environment", SAE Technical Paper Series, 1985.
- (平成14年12月27日受理)