建設時の落下物に対する 安全離隔距離に関する研究

山田 貴久¹・福重 進也²・降駒 導爵³・鈴木 紀彦⁴

¹正会員 東京ガスエンジニアリングソリューションズ(株) (〒105-0022 東京都港区海岸1-2-3)
E-mail: t_yamada@tokyogas-es.co.jp

²非会員 (株)IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1番地)
E-mail: shinya_fukushige@ihi.co.jp

³非会員 (株)IHI (〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目1番1号 豊洲IHIビル)
E-mail: michitaka_furikoma@ihi.co.jp

⁴非会員 (株)IHI (〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目1番1号 豊洲IHIビル)
E-mail: norihiko_suzuki@ihi.co.jp

労働安全衛生規則は、物体の落下による危険防止に関する規定及び飛来防止設備を規定している。特に、建築基準法施行令第136条の5では具体的に規定している。国土交通省の建設工事公衆災害防止対策要綱土木工事編は、作業する場所からふ角75度以上の範囲は立入禁止措置等を要請している。すなわち、その範囲外が安全離隔距離と考える。しかし、この距離は国土交通省関東地方整備局企画部技術調査課に確認の結果根拠が不明であり先行研究が無いことがわかった。本稿は、建設時の実態に即した規定根拠を明確にするために実証実験を行い建設工事公衆災害防止対策要綱第101条規定の妥当性及び飛距離のメカニズムを解明することを目的とした。その結果、落下物が自由落下をする場合に足場用幅木に一度衝突し更に落下を続ける間に足場用幅木が撓み戻ろうとする力及び中棧に衝突し金属性単管の撓みにより押出そうとする力によるダブルトリガー効果が生じることで大きな水平方向速度が生じ一般的には生じないような飛距離が生じるメカニズムを解明した。

Key Words : inclination 75degree, double trigger effect, baseboard for scaffold, accelerator

1. はじめに

物体の落下による危険の防止に関して労働安全衛生規則第537条では防網設備を設け、立入区域を設定する等危険防止の措置をとることになっている。一方、物体の飛来による危険の防止に関して労働安全衛生規則第538条では「作業者が危険な場合は、飛来防止設備を設け、保護具を使用すること。」¹⁾と定められている。特に、建築物の高さが7m以上ある場合に建築物から作業区域と一般共用区域の境界までの距離が5m以内の場合は、建築基準法施行令第136条の5において落下物防止適用区域となっている。²⁾さらに、国土交通省の「建設工事公衆災害防止対策要綱土木工事編」では、第101条に落下物に対する防護規定があり、「施工者は、地上4メートル以上の場所で作業する場合において、作業する場所からふ角75度以上のところに一般の交通その他の用に供されている場所があるときは、作業する場所の周囲その他危害防止上必要な部分を仮材等をもって覆う等落下

物による危害を防止するための必要な施設を設けなければならない。

なお、地上4メートル以下の場所で作業する場合においても危害を生じるおそれがあるときは、必要な施設を設けなければならない。」³⁾とある。(下線筆者ら) 狭義的に考えれば国土交通省に関わる建設工事のみに適用されると考えられるが、広義として考えれば建設物の外面に落下防止措置が施されていない場合の安全離隔距離の指針と考えることができる。

そこで、筆者らはなぜ作業する場所からふ角75度(下線筆者ら)と規定されたのかを、国土交通省関東地方整備局企画部技術調整課技術開発係に確認したところ、「高さ4mにおいて、防護対策の境界と一般共用区域・規制区域の境界をその真下の同位置にするよりも安全側を考慮し、外側へずらした(1m程度)結果と考えられますが、時期が古く、当時の検討資料等は見つかりませんでした。もしかしたら、当時の検討委員会の中で議論して決めたものと想定されます。」との回答を得た。

さらに、本規定に関する先行研究を調査したが存在しないことが分かった。

したがって、本稿は、建設時の実態に即した場合の規定根拠を明確にするために実証実験を行い第101条規定の妥当性及び飛距離の一つのメカニズムを解明することを目的とする。

なお、本稿の落下防止措置は、単管足場パイプによる中棧、手摺及び幅木のみとする。

2. 自由落下及びその後の衝突方法の検討

落下物が離れた位置に飛来するためには、自由落下による運動エネルギーが水平方向の運動エネルギーに変換される必要がある。その変換は落下物が何らかの物体に衝突することで成されるが、落下物と非衝突物の摩擦や変形によりエネルギーが消費されるため、自由落下による運動エネルギーの一部が水平方向の運動エネルギーに変換されることになる。

本稿で考える自由落下物体は、プラント工事等で使用される鋼製吊りピースを考えた。現場工事では仮設材料として多く用いられているものである。

本稿では、平成27年度に生じた落下物による労働災害事例（地上44mの高さから7.6kgの吊りピースが落下し水平距離10m程度にいた作業員に衝突）を参考にして、実験条件（災害事例と同一の落体の質量及び寸法とし、落下高さのみ変更した。）を決めた。なお、本実験を実施するに当たり軽量物(200g)を用いて44mの高さから落下試験を実施しているが水平距離は10mには届かなかった。したがって、実機同等の飛来物を用いてその飛来・落下メカニズムを解明することは、国土交通省の「建設工事公衆災害防止対策要綱土木工事編」では、第101条の一根拠となり得ると考えた。

吊りピースの形状は、溶接で取付ける辺の反対側にシャックル等を通す穴に沿って丸く仕上げた前方後円の形をしているのが一般的である。

重量は7.6kg、長辺275mm、短辺150mm及び厚さ28mmである。（図-1参照）

図-1 吊りピース

注記

1. ピースの中心にあるマークは重心を示す。

吊りピースが落下した場合に何に衝突して水平方向エネルギーに変換されたかである。落下現場には鋼製足場板を用いた幅木があったのでこれらを与条件とする。アルミ製梯子もあったが実験の結果から本稿では省略する。

作業員が、吊りピースを持って取付位置に保持していた時に何らかの拍子に手を放したことが自明なので、どちらかの手を先に離した場合及び同時に両手を離した場合による吊りピースの傾斜角を変数とする。

3. 実験概要

(1) 実験設備

本稿で用いた実験設備は、実際に労働災害が発生した状況と同一にするために、当時の状況を再現した。ただし、高さに関しては実験設備での再現が困難なため吊りピースから地盤面までの高さを3.5mとした。（図-2参照）

吊りピースが落下する際の飛距離は、足場から飛び出す際の水平方向速度により決定される。前述の労働災害事例の場合、作業床高さ41.2m(吊りピース取付高さ44m)の足場から吊りピースが自由落下した場合に地上に衝突するまでの時間は3秒、足場桙端部から被災者までの水平距離は約9mであるため、被災者まで吊りピースが到達する場合に必要な水平方向速度は3m/sである。

吊りピース取付位置は、実際の状況を再現するために取付屋根を傾斜させ、作業床を上層階と下層階の2段階とし状況を忠実に再現した。（図-3参照）

上層階・下層階の足場に用いた幅木は、足場板（鋼製軽量長尺足場板L2000×W240×t40）を利用した。下層階の中棧は、作業床面より高さ450mmに設置した。（図-4参照）吊りピースは、落下条件を可能な限り一定とするため、任意の角度で電磁石により固定し、スイッチにより自由落下できるようにした。

（図-5参照）また、実験用足場の図面を図-6に示す。

図-2 実験用設備全景

図-3 実験用足場板詳細

図-4 足場の幅木取付状況

図-5 吊りピース取付状況

図-6 実験用足場の図面

(2) 吊りピースの落下角度と方向の定義

作業員が両手で吊りピースを抱え上げた後、どちらの手から離すかは不明である。したがって、吊りピースが自由落下するにあたっては、鉛直方向にそのまま落下する場合と、角度を持って落下する場合を想定した。検討するにあたっては、吊りピースの長軸が水平と成す角を条件として、幅木に対する衝突角度を90度、120度、60度とした。90度は両手を同時に放した場合、120度は左手を先に放した場合、60度は右手を先に離した場合に相当する。(図-7参照)以降、吊りピースが飛び出す方向を正として水平方向をX方向、鉛直方向をY方向、幅木の長軸方向をZ方向とする。(図-6、図-7参照)

図-7 吊りピースが上段幅木に当衝突する時の傾斜

(3) 計測方法

吊りピースの落下速度を計測するために高速度カメラを2台用いた。自由落下開始から上層階の幅木に衝突し下層階作業床までの記録を高速度カメラ(モノクロ) Photron SA5 1300K-M3, 1000fps, 1024x1024, 撮影時間21.94sを用いた。下層階足場以降地上に到達するまでを高速度カメラ(カラー) Photron SA5 1300K-C2, 1000fps, 1024x1024, 撮影時間10.92sを用いた。

4. 実験結果

吊りピースが足場を飛び出して地上まで落下したケースについて、実験結果の一覧を表-1に示す。

表-1 実験結果

No.	落下角度(deg)	水平方向速度		幅木衝突後の吊りピースの挙動
		上層階幅木衝突後(m/s)	足場枠から飛び出した速度(m/s)	
1	92	1.9	1.6	下層階の作業床で跳ね、中棧に接触して地上に落下*1
2	91	1.8	0.6	下層階の作業床で跳ね、中棧に接触して地上に落下
3	95	1.9	1.9	下層階の作業床で跳ね、中棧に接触して地上に落下
4	117	1.9	0.8	下層階の作業床で跳ね、中棧に接触して地上に落下*1
5	116	2.0	1.3	下層階の作業床で跳ね、中棧に接触して地上に落下
6	123	1.7	1.2	下層階の作業床で跳ね、中棧に接触して地上に落下
7	60	2.6	2.4	下層階中棧まで直接到達し、中棧に接触して地上に落下
8	59	2.7	1.9	下層階中棧まで直接到達し、中棧に接触して地上に落下
9	59	2.8	3.3	下層階中棧まで直接到達し、中棧に接触して地上に落下

注記 *1は吊りピース自由落下スタート位置が他よりも390mm低い

吊ピースが下層階の足場枠を飛び出して地上まで落下したケースでは、上層階の幅木への衝突から直接地上に落下したものは無く、吊ピースは幅木衝突後に、①下層階の作業床で跳ね、中棧に接触して地上に落下する場合、②中棧まで直接到達し、中棧に接触して地上に落下する場合があった。表-1には、上層階の幅木に衝突した後の水平方向速度と足場枠を飛び出した後の水平方向速度を示している。

実験の結果、吊ピース落下角度90度(鉛直方向落下)と120度では大きな水平方向速度とはならず①の落下パターンであったが、60度の場合には、水平方向速度が大きくなり②のパターンで落下した。最も速度が大きかった場合には上層階幅木から中棧までの落下で得た運動エネルギーが中棧への衝突でさらに水平方向速度成分に変換され、最終的な水平方向速度は3.3m/sとなった。この実験により、落下した吊ピースが、労働災害事例の被災者に直接到達し得る水平方向速度となる可能性があることが確認された。この場合、吊ピースが直接的に到達した位置及び下層階作業床までの高さからふ角を算出すると、その角度が76度となり、国土交通省の「建設工事公衆災害防止対策要綱土木工事編」第101条に記載されている作業する場所からふ角75度と近似値となる。

(下線筆者)

以下に吊ピースの落下角度を変化させた場合における吊ピースの衝突状況を示す。落下角度90度の場合、吊ピースの重心と幅木の中央位置を合わせて自由落下させると、真上に跳ね返るため水平方向速度が発生しない。そこで、吊ピースが厚さ40mmの幅木の端部に衝突するように20mm X方向側にシフトさせた位置を目標として衝突させた。その他の角度においても吊ピースのR部が最初に幅木の端に接触する位置となるようにX方向位置を調整した。

(1) 落下角度90度(鉛直方向)の場合

吊りピースが落下し、幅木に衝突すると吊りピースのR部分で滑り落ち(図-8)、下層階の作業床に落下して跳ね上がる挙動となった。幅木衝突後の速度は最大1.9m/sであった。

図-8 落下角度90度の場合

(2) 落下角度120度の場合

吊りピースが落下し、幅木に衝突すると吊りピース

の重心が幅木位置よりX方向前方にあるために、反時計回りに回転しながら下層階の作業床に落下した(図-9)。幅木衝突後の速度は最大2.0m/sであった。

図-9 落下角度120度の場合

(3) 落下角度60度の場合

吊りピースが落下し、幅木に衝突すると幅木が衝突により一度-X方向に撓む。その後、幅木が撓んだ状態から復元し、吊りピースが再衝突することで吊りピースが+X方向に叩き出されることが高速度カメラの画像より確認できた。このことにより、その他の落下角度と比較して、吊りピースが大きな水平方向速度を得た(図-10)。幅木衝突後の水平方向速度は最大2.8m/sとなり、さらに中棧衝突時に3.3m/sとなった。

a. 上層階の幅木への衝突後の吊ピースの挙動

1 回目の衝突+0.0 sec 2 回目衝突+0.028 sec

b. 衝突状況の詳細

注記 *2は上層階幅木衝突から+0.618secで下層階中棧に衝突した映像である

c. 下層階中棧衝突状況

図-10 落下角度60度の場合

次に飛来距離を示す．実験結果のうち地盤まで飛来したものを“●”で表し，各“●”を吊ピース取付高さ44mに置き換えたものを“○”で表す．また，被災者の位置を“◆”で表すと図-11の通りとなった．これらにより，飛来方向は概ね災害時の方向と正しく飛来距離も災害時よりも遠方(11.4m)に飛ぶ場合もあることがわかった．

図-11 飛来距離と飛来方向

5. 検討

実験による吊ピースの落下角度は90度、120度及び60度の3ケースであるが、落下角度の水平方向速度に対する感度を確認するため上段幅木への吊ピース衝突を対象とした解析を衝撃・構造解析ソフトウェアLS-DYNAを用いて実施した．実験時の吊ピースと幅木の位置関係を図-12に、吊ピースと幅木の材質と寸法を表-2に、解析モデルを図-13に示す．なお、幅木の中央に設置されていた梯子は省略した．幅木の端部は、カバーがあり剛性が大きいので、端部の節点を剛結し、断面形状不変とした．また、図-13左側の幅木端部は留め金との接触により動きが制限されていた位置はX方向変位を拘束した．幅木を番線で巻き付けて固定した位置は、吊ピースの衝突による変形で番線上部の拘束が緩むことが高速度カメラ画像から確認されたため、幅木下部のX方向変位の拘束でモデル化した．また、計算時間短縮のため吊ピースの自由落下の計算は省略し、衝突直前位置の吊ピースに対して、落下高さ1215mmから自由落下した場合の速度を初速度として与えた．

図-12 吊ピースと幅木の位置関係

表-2 部材寸法

	材質	寸法(mm)
吊ピース	鋼	L275 x W150 x T28mm
幅木	鋼	L2000 x W240 x T40mm

図-13 解析モデル

図-14は、落下角度と水平速度の関係について解析結果及び実験結果を比較したものである．また、幅木衝突時の水平方向速度の変化を図-15に示す．衝突前は、自由落下であるため、水平方向速度は0m/sである．図-14より、吊ピースの落下角度が大きい条件では、解析結果と実験結果の差がやや大きい、

しかし、全体的な傾向は、解析結果により捉えられた．水平方向速度が大きくなる落下角度60度付近に着目すると、吊ピースの落下角度が多少変化しても、実験と同程度の水平方向速度が吊ピースに発生すると考えられ、吊ピースが被災者位置にまで到達する可能性があることがわかる．

また、図-15により、落下角度が90度及び120度の場合には、吊ピースと幅木の衝突は1回であった．

一方、60度の場合には、実験と同様に2回にわたって吊ピースが幅木に衝突し、2回目の衝突によってより大きな水平方向速度が吊ピースに発生していることがわかる。したがって、吊ピースが1度衝突した幅木に対し、幅木が撓んだ状態から復元しようとする時に再び吊りピースに再衝突することで吊ピースに対して比較的大きな水平方向速度を与えるメカニズムがあることを解析結果からも確認できた。

図-14 解析結果と実験結果の比較

a. 落下角度90°

b. 落下角度120°

c. 落下角度60°

図-15 吊ピースと幅木の衝突による水平方向速度の変化

6. 考察

実験により、吊ピースが落下した場合に、上層階の幅木への2段階の衝突による水平方向速度の増加、下層階の中棧への衝突によるさらなる水平方向速度の増加といった複数の要因が重なることで離隔角度（ふ角75度）から求められる離隔距離とほぼ同等の距離まで落下物が到達する可能性があることがわかった。

本稿では吊ピースを対象としたが、吊ピースのように落下時に幅木を撓ませるだけの初期エネルギーを持っている物体であれば、同様のメカニズムで飛距離が大きくなることが考えられる。

このように、複数の要因が重なることで落下物の飛距離が大きくなり得る。

したがって、落下物が足場から飛び出さないようにメッシュシート又はネット等で落下防止対策及び墜落防止対策を実施することが重要であると考えられる。

7. 結論

吊りピースが、60度方向に傾斜して自由落下すると現場で多用されている鋼製足場板を用いた幅木及び番線による固定では十分にふ角75度方向に飛来する。

したがって、飛来させないためには次の方法により落下防止を考慮する必要がある。

- (1) メッシュシートにより足場全体を覆う
- (2) ネットで作業床から手摺までを覆う

なお、労働安全衛生法第563条の改正により（1）に関しては改正例として示されている⁴⁾。

メッシュシート等で周囲を覆うことができない場合は、

- (3) 落下高さ (m) $\times \tan 15^\circ$ を安全離隔距離として確保することを考慮する。

参考文献

- 1) 厚生労働省, 労働安全衛生規則
- 2) 国土交通省, 建築基準法施行令
- 3) 国土交通省, 建設工事公衆災害防止対策要綱土木工事編
- 4) 厚生労働省, 基発0331第9号参考3説明資料
http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudouki_junkyokuanzeniseibu/0000081487.pdf

(2016. 7. 8受付)

A STUDY ON THE SAFETY SEPARATION DISTANCE AGAINST FALLING OBJECTS AT THE TIME OF CONSTRUCTION

Takahisa YAMADA, Shinya FUKUSHIGE, Michitaka FURIKOMA
and Norihiko SUZUKI

Labor safety and health regulations include provisions on preventing danger due to falling objects, and prescribe equipment to prevent objects from flying in. In particular, specific regulations are set forth in Article 136, Paragraph 5 of Enforcement Orders for the Building Standards Act. The Guidelines on Measures to Prevent Public Disasters in Construction Work (Public Works Volume) of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism require measures such as prohibiting entry over a range of 75 degrees or more of elevation from the location where work is done. In other words, the area outside that range is regarded as a safe separation distance. However, this distance was checked with the Technology Investigation Section, Planning Department, Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, and, as a result, it was found that the grounds for the distance are unclear, and there is no prior research. The purposes of this paper were to carry out demonstration experiments to clarify grounds for provisions suited to the actual situation during construction, and thereby show the validity of the provisions in Article 101 of the Guidelines on Measures to Prevent Public Disasters from Construction Work, and elucidate the mechanisms of flying distance. The results clarified the following mechanism: When an object falls freely, a double-trigger effect may occur due to collision once with the scaffolding baseboard, and while it continues to fall, the force of the baseboard trying to bend back, and due to collision with the crosspiece and the force pushing out due to bending of the single pipe made of metal. In this way, a large horizontal velocity can be produced, resulting in a flying distance greater than that usually encountered.