

高所からの落下物に対する安全性検討のための衝突実験

Collision Test for the Safety against Falling Object from Height

小林 俊夫*, 河西 良幸**, 大野友則***

Toshio KOBAYASHI, Yoshiyuki KASAI and Tomonori OHNO

*工博 鹿島技術研究所 上席研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

**工博 前橋工科大学教授 建築学科 (〒371-0816 前橋市上鳥佐町460-1)

***工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

キーワード: リニューアル工事, 安全対策, 衝撃実験, 鋼製品, タイル床, 反発係数, 回帰関数, 限界運動量
(renewal construction, safety system, collision test, steel material, tiled floor, collision coefficient, regression function, limit of momentum)

1. はじめに

日本初の本格的超高層ビルである霞ヶ関ビルが1968年に竣工してから35年が経過し, 超高層ビルにも内外装や設備に対するリニューアル工事が実施されるようになってきた。超高層ビルのリニューアル工事は数階分順送りに施工し, その間も他の階は使用に供せられている。外装工事に際しては当該部分の建物外周に高所足場を設置して施工をするが, その際落下物に対する安全対策として作業員の安全教育の徹底といったソフト面から始まり, 落下防止壁やネットを設置する等ハード面に至るまで落下物防止には万全を期している。

一方, 茨城県東海村のJCOで発生した臨界事故(1999年9月30日)とその後の対応は, 施設の設計上はその発生の可能性は無いと考えられている事象でも, その発生が周辺に重大な影響を与える場合にはその事象の発生に対する対策を立てておくことの重要性を教訓として残した。このような安全設計の重要性を考慮して, 供用中の某超高層ビルの高所外周工事に際し, 上部施工部の落下防護施設のみならず, 地上部にも落下物に対する安全施設を設置することとした。安全施設としては

- 1) 高層部周辺地上部に立ち入り禁止区域を設定する
- 2) 高層部周辺地上部に水平に安全ネットを設置する
- 3) アプローチ通路に防護シェルターを設置する
- 4) 跳ね返りに対する下部外壁保護用防護壁を設置する等が考えられるが, これらを設計するための基礎研究の一環として落下物の落下衝突後の挙動を把握するため, 超高層部周辺地上部床と同一の模型タイル床面へ

の鋼製品の落下実験を実施した。

衝突現象に関しては, 筆者らは文献^{1)~5)}で, 約8000個の六角柱黒鉛ブロックが隙間をもって3次元的に配列されている高温ガス炉(HTGR)炉心の地震時の応答特性を明らかにするために, 実物黒鉛ブロック(六角形の対辺長さ約36cm, 長さ約80cm)に関する一連の実験・解析的研究を実施している。

文献¹⁾では, 肉眼では一度に見える衝突でも実際には複数回の衝突が短時間に行われることが観測されこれに基づく解析的検討から, 複数回の衝突には幾つかの異なるパターンがあること, この衝突パターンの相違により各衝突での真の反発係数を0.75と一定値に仮定しても見かけの反発係数は計測結果から得られたように0.60~0.70にばらつくこと等を明らかにしている。

文献^{2)~4)}ではHTGR炉心から, 中央部分の水平1列, 垂直断面, 水平断面を各々取り出した1/5縮尺模型の振動台実験と解析を示している。

文献⁵⁾では実物の炉心について解析によって耐震性の評価を試みた結果を示している。これらの実験・解析から, 衝突する物体の反発係数を求めることができれば, 衝突を伴う現象を解析によって評価しうることを示している。

前記の実験・解析研究の経験からは, 落下物に対する安全施設の設置を検討するためには, 落下物と床面の反発係数を求めることが最も重要であると考えられる。そのためには対象となる特殊形状の物体が実際の床面に様々な衝突パターンで衝突した際の速度に依存する反発係数を求める必要があるので,

実験パラメータとして落下物の形状（特殊形状、基本の球形）、衝突姿勢（垂直、水平）、質量（4kgまでの3種類）、衝突速度（23m/sまでの4種類）の4つのパラメータに着目して衝突実験を行うこととした。さらにそれらの実験データを下に、リニューアル工事の際に落下してくる特殊形状の物体がどのくらいの高さまで跳ね返る可能性があるかを解析によって評価することとした。

2. 実験概要

2.1 実験施設

実験は防衛大学校（神奈川県横須賀市）の30m落錘式衝撃実験施設⁶⁾で実施した。図1に実験施設概要をまた写真1に実験施設外観を示す。実験施設は地下ピット深さ2m、地上10階で棟屋3階を含めた地上高さ50mの塔状建物である。地下ピット部分の上部に相当する1階床は周辺に回廊を持つ吹き抜けとなっていて2階から7階までの床の中央には落下実験のための穴が空いていてガイドレールが設置されている。1階の正面には資材搬出入のための開口がある。

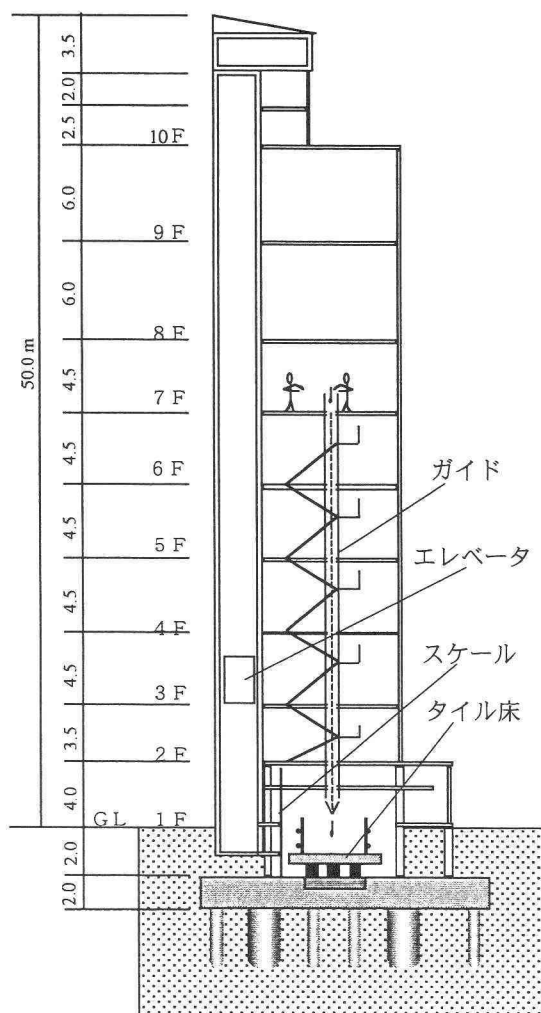


図1 実験施設概要

2.2 落下面

地下ピットに実建物の超高層部周辺の地上部床と同じ素材の模型床を設置した。模型床は平面1m角、厚さはコンクリート18cm、貼付けモルタル0.5cm、クリンカータイル1.5cmで全体厚さ20cmである。模型床の作成状況と完成状態およびピットへの設置状況を写真2、3および4に示す。

2.3 落下試験体

落下試験体としては、リニューアル工事で作業員が使用する頻度が比較的高いと考えられるシノ付き爪式両口（17-21mm）ラチェットレンチと、衝撃現象の基本的性状を把握するため、直径5cmの中鋼球および直径10cmの大鋼球の2種類の大きさの鋼球を用いた。写真5に3種類の落下試験体を示す。

後日、直径1.5cmの小鋼球を用い、実建物のタイル床において同様の落下・跳ね返り実験を実施した。

上記4種類の落下試験体概要として、試験体名称、質量およびサイズを表1に比較して示す。

2.4 測定方法

試験塔の4種類の異なる高さから、落下試験体を手

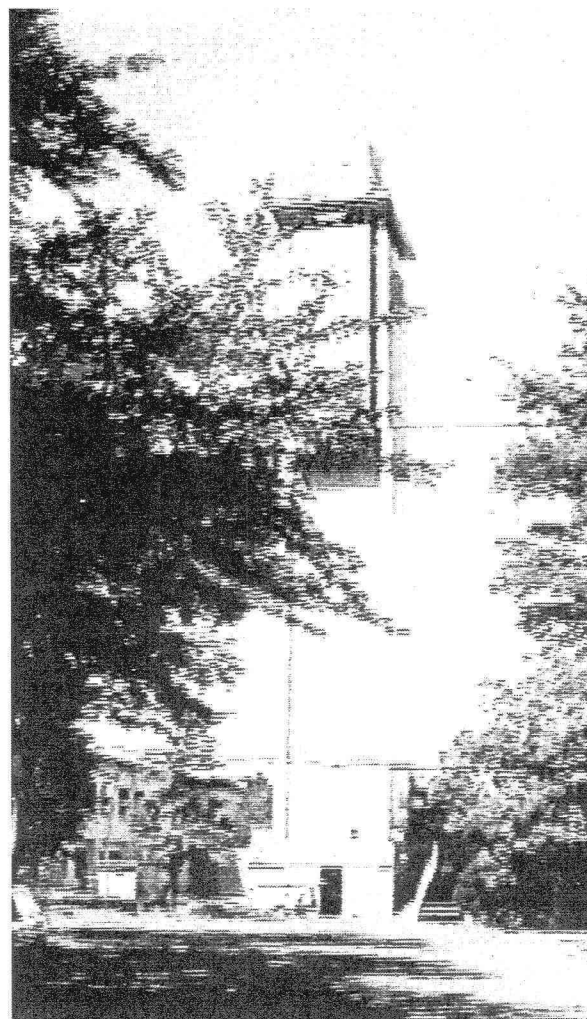


写真1 実験施設外観

で保持した静止状態から自由落下させ、跳ね返り高さを計測した。計測方法としてはピットの側に立ったスケールを用いて、1階回廊部および東側開口外部に配置した5人の目視により跳ね返り高さを計測し、その平均値を跳ね返り高さとして採用した。

衝突面である模型床は一体しか製作しなかったの
で、各回の落下毎に、その前までの落下で破損した部分
を避けてなるべく健全な部分に衝突するように配慮
した。

3. 実験結果

実験結果一覧を、別途実施した小鋼球の結果も含めて表2に示す。ラチェットレンチはラチェット側を下にした垂直姿勢と水平姿勢での落下を実施したが、水平姿勢の場合は一度の落下に複数回の衝突が観察された。落下高さが高くなり衝突の衝撃が大きくなると、衝突面のタイルが欠けたりひびが入ったり、あるいは表面が粉状に崩れたりして破損した。しかし、タイルが下地コンクリートから剥離するといった現象や下地コンクリート自体の破損といった現象は観察されなかった。大鋼球の場合は、跳ね返り高さがほぼ0mに近く、跳ね返り高さとしての数値は計測不能であった。

4. 反発係数

4.1 反発係数の算定

表2の結果に基づき反発係数を算定した。但し、横に跳ねたり複数回衝突したようなケースは、見か

けの反発係数が真の反発係数より小さく評価されるので除外した。従って後述する跳ね返り高さの評価法によれば複数回衝突による跳ね返り高さは安全側となる。

反発係数の算定への採否の判定を表2の最右欄に記載した。

剛体の衝突理論に基づけば、衝突直前の試験体と床の速度をそれぞれ v_1, V_1 、衝突直後のそれをそれぞれ v_2, V_2 とすれば、反発係数(e)は(1)式で与えられる。

$$e = - (v_2 + V_2) / (v_1 + V_1) \quad (1)$$

衝突面の高さ座標を0とし、上向きを正とすると、高さ h_1 から自由落下してきた物体の高さ0での速度 v_1 は(2)式で与えられる。

$$v_1 = - \sqrt{2gh_1} \quad (2)$$

一方、衝突面から v_2 の速度で跳ね返った物体の、跳ね返り高さ h_2 と v_2 の関係は(3)式で与えられる。

$$v_2 = \sqrt{2gh_2} \quad (3)$$

ここで、剛体の衝突理論によれば、衝突直後の変位は衝突直前と変わらず速度のみ変化するので、タイル床模型がピット床に支持されている効果は衝突の直前と直後では変化しない。従って、タイル床模型の質量M(約480kg)と落下試験体質量m(表1)に対し

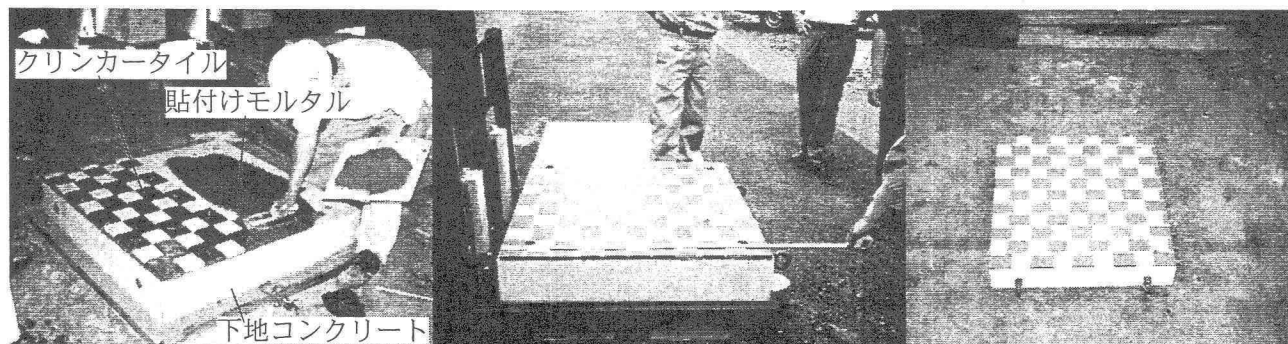


写真2 模型床の作成状況

写真3 模型床の完成状態

写真4 模型床のピットへの設置状況

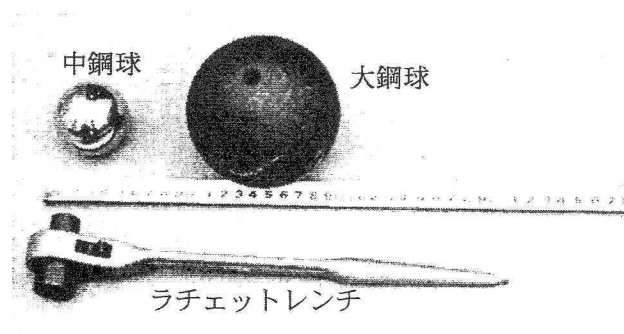


写真5 3種類の落下試験体

表1 落下試験体概要

落下試験体名称	質量	サイズ
ラチェットレンチ	482 g	長さ 30 cm
小鋼球	14.0 g	直径 1.5 cm
中鋼球	530 g	直径 5.0 cm
大鋼球	4000 g	直径 10 cm

衝突前後の運動量保存則より(4)式が成り立つ。

$$MV_1 + mv_1 = - (MV_2 + mv_2) \quad (4)$$

衝突前のタイル床模型が静止している条件 ($V_1 = 0$) と、タイル床模型の質量Mと落下試験体質量mの比 $\alpha = m/M (= 1.0 \times 10^{-3} \sim 8.3 \times 10^{-3})$ を用いると、(4)式から(5)式が得られる。

$$V_2 = -\alpha (v_1 + v_2) \quad (5)$$

これを(1)式に代入すれば反発係数(e)は(6)式で与えられる。

$$e = - (v_2 - \alpha (v_1 + v_2)) / v_1 = \alpha (1 + v_2/v_1) - v_2/v_1 \quad (6)$$

ここで、右辺第1項は 10^{-3} オーダーであり、工事現場のタイル床は水平方向にも下方にも連続しているのでこの項はさらに小さくなり、実用的には右辺第2項のみを考慮した(7)式で十分である。

$$e = -v_2/v_1 \quad (7)$$

(7)式に(2)、(3)式を代入すれば、反発係数(e)は(8)式で与えられる。

$$\text{反発係数}(e) = \sqrt{\text{跳ね返り高さ}h_2 / \text{落下高さ}h_1} \quad (8)$$

ここで跳ね返り高さとしては、試験体および落下姿勢別に、採用となった実験結果の平均値として求めた値を用いた。(8)式から求められた反発係数を、衝突時の運動量とともに表3に示す。これによると、衝突時の運動量が大きくなるとタイル面の破損により反発係数は減少することが分かる。

4.2 衝突時運動量と反発係数の関係

表3の結果を衝突直前の運動量の絶対値 ($p_1 = |mv_1|$) を横軸に、反発係数(e)を縦軸に片対数グラフにプロットして図2に示す。形状が単純で衝突時の挙動が明快である鋼球のデータはほぼ直線に乗り、またラチェットレンチのデータもほぼ同一直線上に乗っている。

図2から反発係数(e)の回帰式として(9)式が得られ

表2 実験結果一覧

試験体及び落下姿勢	落下高さ (m)	跳ね返り高さ (cm)					平均	備考	反発係数算定への採否
		計測者 (一印は計測不能)							
		A	B	C	D	E			
レンチ (垂直)	6.2	330	320	320	310	310	318.0	タイルのほぼ中央に落下	採用
	6.2	325	330	310	300	—	316.3	目地に落下	採用
	6.2	120	130	—	—	—	125.0	横へ跳ね返り	不採用
	6.2	—	—	—	—	—	—	目地に落下	不採用
レンチ (水平)	6.2	70	60	30	—	50	52.5	複数回衝突	不採用
	6.2	50	—	—	10	40	33.3	複数回衝突	不採用
	6.2	0	0	0	0	0	0.0	ほとんど跳ね返りなし	不採用
中鋼球	6.2	300	295	280	260	300	287.0	タイル浮き部 (同じ部分) に落下	採用
レンチ (垂直)	10.2	—	360	360	—	350	356.7	タイルのほぼ中央に落下	採用
	10.2	200	250	200	190	200	208.0	目地又は浮き部に落下	不採用
レンチ (水平)	10.2	140	—	—	140	100	126.7	複数回衝突	不採用
	10.2	140	125	120	140	130	131.0	2回目が高いバウンド	不採用
中鋼球	10.2	190	180	170	180	200	184.0	タイル浮き部 (同じ部分) に落下	採用
	10.2	350	350	350	325	340	343.0	タイル浮き部 (同じ部分) に落下	採用
	10.2	480	480	480	480	450	474.0	タイルのほぼ中央に落下	採用
	10.2	370	410	380	390	370	384.0	タイルのほぼ中央に落下	採用
中鋼球	29.0	460	460	440	480	480	464.0	タイル浮き部 (同じ部分) に落下	採用
	29.0	470	460	440	460	460	458.0	落下後にタイル浮きが生じた	採用
	29.0	460	460	460	460	460	460.0	タイルのほぼ中央に落下	採用
大鋼球	17.0	—	—	—	—	—	(ほぼ0)	タイル破損	参考
小鋼球	2.0	174	/	/	/	/	174.0	(後日別途実施、計測者一人) (いずれのケースもタイルに破損は生じなかった)	採用
	2.0	175	/	/	/	/	175.0		採用
	2.0	176	/	/	/	/	176.0		採用
	2.0	176	/	/	/	/	176.0		採用
	2.0	174	/	/	/	/	174.0		採用

表3 反発係数の算定

試験体	質量 (kg)	落下高さ (m)	衝突直前運動量 (kg m/sec)	跳ね返り高さ 平均値(m)	反発係数 (e)
小鋼球	0.014	2.0	0.0877	1.75	0.94
レンチ	0.482	6.2	5.31	3.17	0.72
中鋼球	0.530	6.2	5.84	2.87	0.68
レンチ	0.482	10.2	6.82	3.57	0.59
中鋼球	0.530	10.2	7.49	3.46	0.58
中鋼球	0.530	29.0	12.64	4.61	0.40
大鋼球	4.000	17.0	73.02	(ほぼ0)	(ほぼ0)

た。これを同図に並記する。

$$e = 1.304 - 0.821 \log_{10} |mv_1| \quad (9)$$

但し衝突時運動量が小さい場合は衝突面に破損が生じないので反発係数は小鋼球で得られた値の一定値(0.94)で頭打ちとし、また最小値は実現象の可能性から0とした。大鋼球を17 mから落下させたケースは反発係数が0の領域に含まれる。

4.3 限界跳ね返り高さ

レンチを例として(9)式に基づき各種の落下高さや跳ね返り高さの関係を求め図3に示した。これによると跳ね返り高さが最高となるのは約45 mから落下した場合で6 m弱となっている。

(9)式で表される衝突面の破損を考慮した反発係数の回帰式に基づき衝突直後の運動量の絶対値 ($p_2 = |mv_2|$) を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} p_2 &= |mv_2| \\ &= |mv_1 e| \\ &= p_1 (1.304 - 0.821 \log_{10} p_1) \end{aligned} \quad (10)$$

p_2 の最大値を求めるために p_1 で微分してその零点を求める。

$$\begin{aligned} dp_2/dp_1 &= 1.304 - 0.821 \log_{10} p_1 - 0.821 / \ln 10 \\ &= 0.947 - 0.821 \log_{10} p_1 \end{aligned} \quad (11)$$

これが $dp_2/dp_1 = 0$ の限界値 (左添字Cを付す) となるのは

$$p_1 = 14.26 \text{ kg m/sec} \quad (12)$$

の時であり、その時の反発係数は(9)式より

$$e = 0.357 \quad (13)$$

となる。

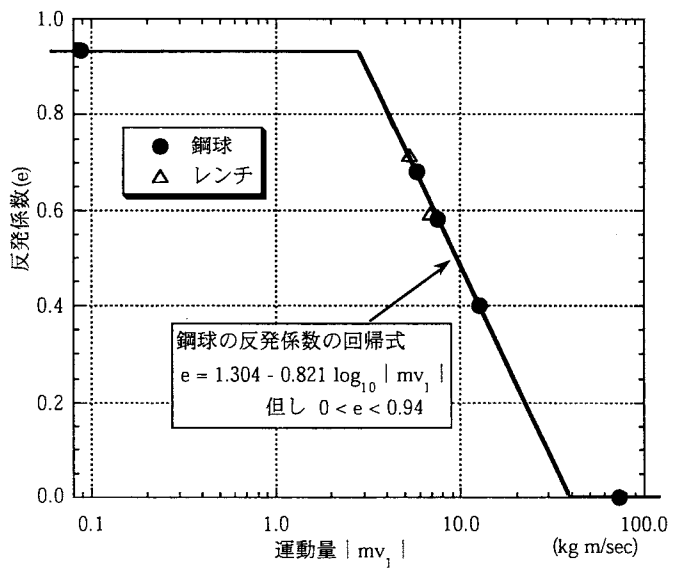


図2 衝突時運動量と反発係数の関係

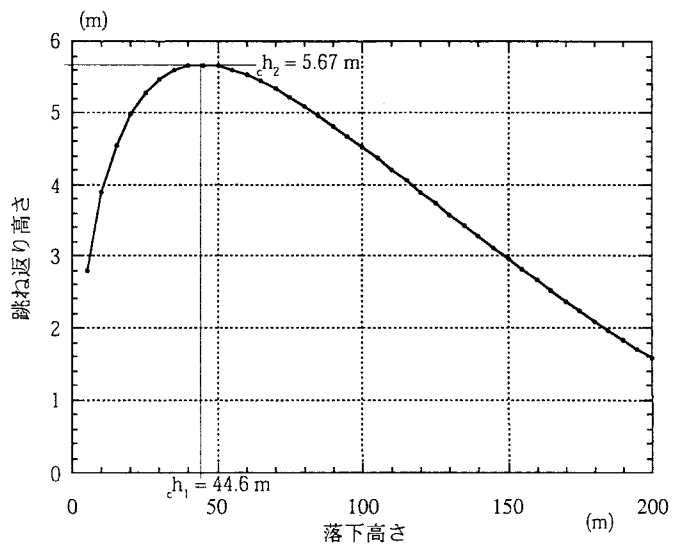


図3 レンチの落下高さや跳ね返り高さの関係

例えばレンチ ($m = 0.482 \text{ kg}$) に対する場合、衝突前の限界状況としては $c_p = |m_c v_1| = 14.26 \text{ kg m/sec}$ より $|c_v| = 29.6 \text{ m/sec}$ となる。従って(2)式より $c_{h_1} = 44.6 \text{ m}$ が得られる。

一方衝突後の限界状況としては $|c_v| = |c_v|_e = 10.55 \text{ m/sec}$ となる。従って(3)式より $c_{h_2} = 5.67 \text{ m}$ が得られる。これら c_{h_1}, c_{h_2} の値は図3の曲線の最大値の点に対応している。

図4に上記レンチの場合と同様にして求めた各種質量の落下物に対する限界跳ね返り高さとならざる落下高さの関係を示した。これによると例えば質量 1 kg の落下物の限界跳ね返り高さは、高さ約 10 m から落下した場合で約 1.3 m となる。

5. まとめ

供用中の超高層ビルの外装に対するリニューアル工事に際し、安全施設の設計の基礎資料を得るために模型タイル床に対する鋼製品の落下衝突実験を実施した。その結果を考察し、タイル面の破損現象まで含めた反発係数の回帰式を衝突時運動量の関数として求めた。その結果、跳ね返り時の運動量には限界値があることが認められ、各種質量の落下物に対する限界跳ね返り高さの関係を求めた。これに基づき、ラチェットレンチを例として跳ね返りの限界高さを求め、 6 m 弱という値が得られた。

各種重量毎に跳ね返り高さに限界が存在することの実証に関しては、反発係数の回帰式の適用範囲の確認とともに今後の課題とする。

本研究で得られた各種のパラメータは衝突面や落下物の材質に依存するものと考えられるので、床面や落下物の材質が異なる場合には本法と同様な検討が必要である。又本研究では空気抵抗の影響を考慮していないので、軽量落下物や高速状態等空気抵抗の影響が顕著な場合はこれを考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 武藤清, 黒田孝, 小林俊夫「HTGR(高温ガス炉)炉心の耐震性に関するR&D-(その3)六角グラファイトの衝突実験の解析-」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2104, pp.545-546, 昭和50年10月
- 2) 武藤清, 河西良幸, 内田一義, 堀越清視, 黒田孝, 村上元「高温ガス炉炉心の一次元振動実験とシ

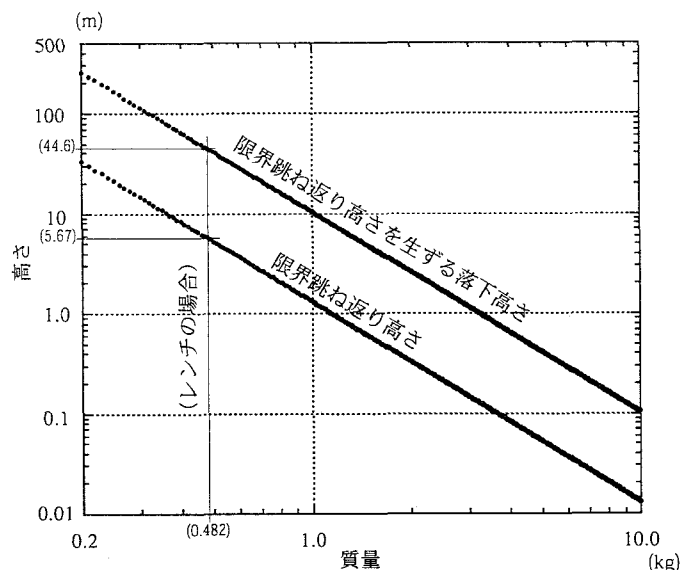


図4 落下物質量と限界跳ね返り高さの関係

- ミュレーション解析」, 第4回日本地震工学シンポジウム, pp.759-766, 昭和50年11月
- 3) 武藤清, 黒田孝, 村上元, 内田一義, 高瀬啓元, 河西良幸「HTGR(高温ガス炉)炉心垂直断面モデル衝突実験とそのシミュレーション解析」, 日本原子力学会誌, Vol.19, No.12, pp61-69, 昭和52年12月
 - 4) K.Muto, K.Uchida, H.Takase, Y.Kasai, T.Kuroda, H.Murakami, -Two-dimensional Vibration Test and its Simulation Analysis for a Horizontal Slice Model of HTGR Core-, The Japan-U.S. Seminar on HTGR Safety Technology, Brookhaven National Laboratory, pp.15-27, 昭和52年9月
 - 5) 武藤清, 黒田孝, 村上元, 河西良幸「コンピュータコードCOLLANによる実物HTGR炉心の動力学特性-(その1) COLLAN 1による基本的動力学特性の解明-」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2185, pp.879-880, 昭和53年9月
 - 6) 大野友則, 基本構造物に関する対衝撃実験(装置と方法) -衝撃的地震動に対する構造物の破壊シミュレーションのために-, 都市安全のための構造物破壊現象に関するワークショップ, 京都大学防災研究所研究集会(10K-10), pp.15-1~15-9, 1998年5月