

安全マットの緩衝性能等の実験結果について

Experiment on shock-absorbing ability of a Safety Mat.

脇	賢*
奥 原	明*
高 橋 一	久*
菊 地 定	男**

We examined next item in order to grasp fundamental characteristic of safety mat.

- 1 Relation between shock-absorbing ability and difference in materials of it.
- 2 Relation between shock-absorbing ability and difference in thickness of it.

1. はじめに

近年、都市の近代化に伴い高層建物の火災が多く消防活動も高度のものが要求されている。特に高所等の活動訓練、演習には隊員の安全管理が重要な問題であり、このため訓練用の資器材の一つとして安全マットが使われている。

また、災害現場では高所から飛び降りる人を救助するために安全マットの活用方法なども検討されている。このような状況の中で、軽便な安全マットの開発及び効果的に活用するため緩衝性能等を把握する実験を行ったのでその概要を報告する。

2. 実験項目

安全マットの基本的特性を把握するため次の項目について実験を行った。

- (1) マットの緩衝材の差異と緩衝性能の関係について
- (2) マットの厚さの差異と緩衝性能の関係について

3. 供試マット

(1) 緩衝材の異なるマット

マット内の緩衝材によって緩衝材性能がどのように変わるかを調べるため、形状、寸法がほぼ同じで、材質の組合せ等が異なる2種類のマット(試料1及び試料2)について実験した。

マット内緩衝材は表1及び図1に示すとおり、ポリエチレン及びウレタンの積層構造とし、表

皮は塩化ビニル樹脂加工帆布で覆ったものである。空気穴(縦250×横150mm)は側面に合計8カ所設けてある。

試料1のマットは、上部にポリエチレンを2枚敷いてあり、硬い感じに作られている。

試料2のマットは、上部にポリエチレンを1枚敷いてあり、軟らかい感じに作られている。

(2) 厚さの異なるマット

マットの厚さによって緩衝性能がどのように変わるかを調べるため、縦2300mm、横900mm、厚さ420mmのもの及び厚さ280mmのもの2種類(試料3及び試料4)について実験した。

なお、マット内緩衝材の材質は表1のとおり試料1と同一のものである。表皮は防水シートで覆い、空気穴(縦250×横150mm)は側面4カ所とした。

表1 供試マット形状寸法、材質等

種類	試料1	試料2	試料3	試料4
形状寸法	縦2300mm× 横1800mm× 厚さ480mm	縦2300mm× 横1800mm× 厚さ500mm	縦2300mm× 横900mm× 厚さ420mm	縦2300mm× 横900mm× 厚さ280mm
重量	約65kg		約27kg	約18kg
材質	ポリエチレン及びウレタン			
表皮	塩ビ樹脂加工防水帆布		防水シート	
製造業者	富士ゴム			

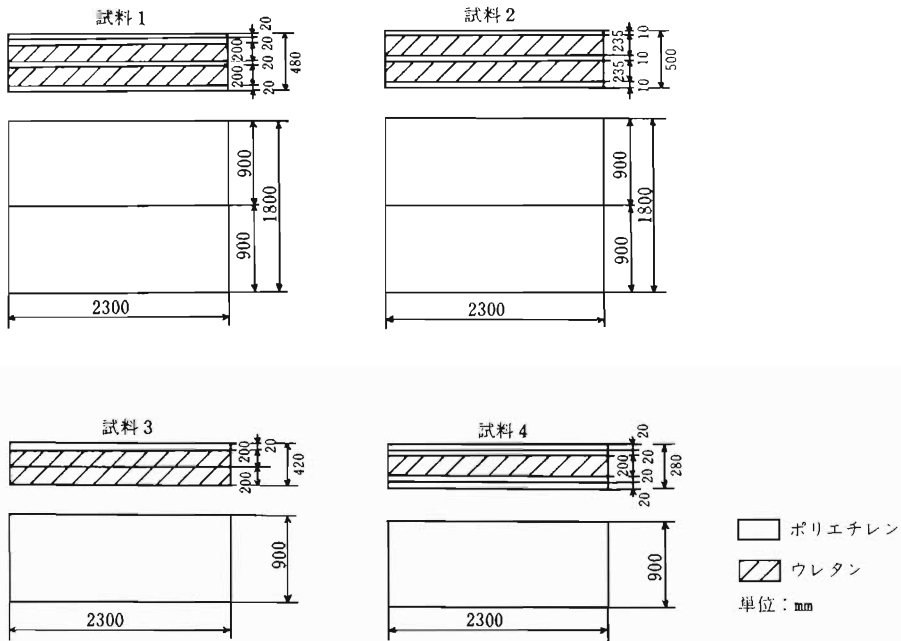


図1 供試マットの構造

4. 実験方法

落下体については、図2に示す直径40cm、高さ60cm、重量75kgの布製円柱状砂袋（以下「ダミー」という。）を使用した。ダミー内部には20G用（X軸）と50G用（Y、Z軸）の加速度計を設定した。

ダミー、マット、計測器等の設定要領は図3のとおりとし、ダミーはマット上部の任意の高さにクレーンで吊し、落下装置を操作することにより落下させた。減速度の測定、記録は加速度計に接続した動はずみ計及び電磁オシログラフで行った。

また、安全マットの沈み量の測定は光学式変位測定器で行った。

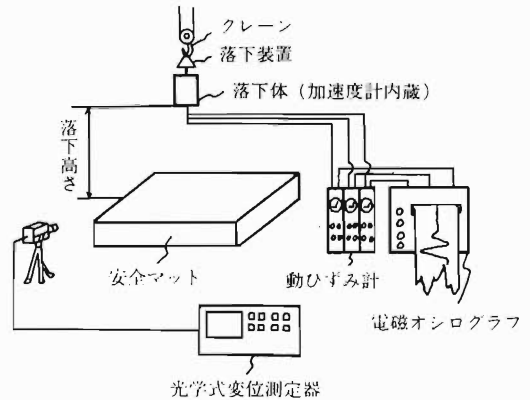


図3 実験概略図

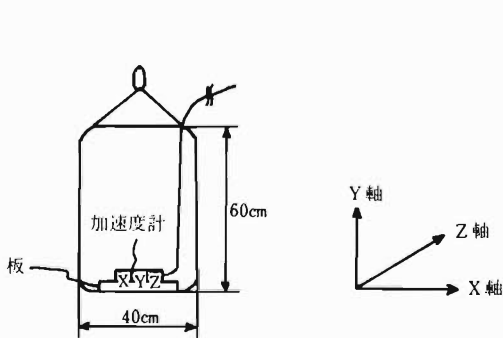


図2 落下体の構造

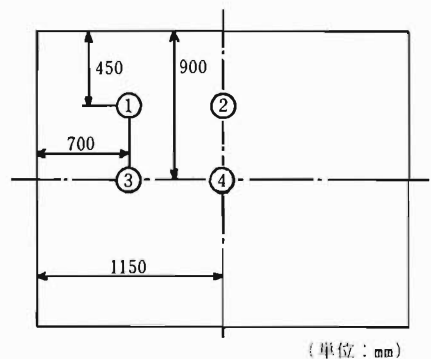


図4 ダミーの落下位置

5. 使用計測器等

- (1) 加速度計 共和電業 AS-1 20G用
AS-B 50G用
- (2) 動ひずみ計 共和電業 DDM-1M
- (3) 電磁オシログラフ 三栄工業 FR-1N
- (4) 変位測定器 YA-MAN7000

6. 実験結果及び考察

- (1) マットの緩衝材の差異と緩衝性能の関係について

試料1及び試料2についてダミー落下時の減速度の測定結果は表2、3及び図5、6に示すとおりである。

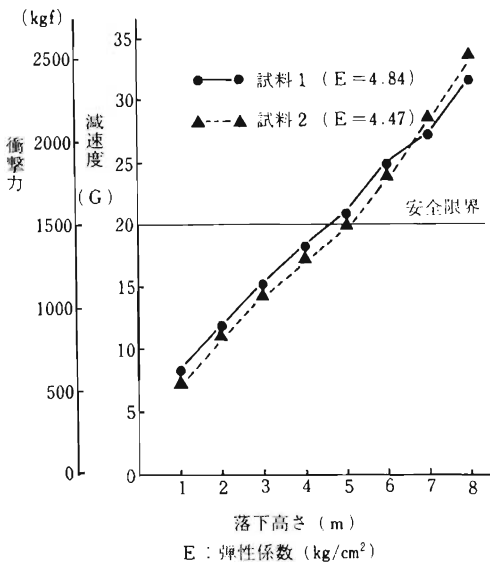


図5 マット緩衝材の差異と減速度・衝撃力

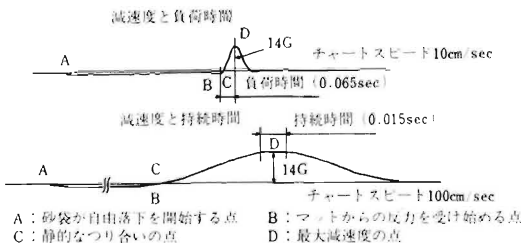


図6 ダミーをマットに落下させたときの減速度 (落下高さ3mの例)

表2 試料1の減速度・負荷時間及び衝撃力

落下高さ (m)	落下位置	平均値		
		合成減速度 (G)	負荷時間 (Sec)	衝撃力 (kgf)
1	1	8.5	0.073	638
	2	8.3	0.075	623
	3	8.4	0.073	630
	4	8.1	0.075	608
	平均値	8.3	0.074	623
2	1	11.6	0.07	870
	2	12.4	0.07	930
	3	11.2	0.07	840
	4	11.2	0.07	840
	平均値	11.6	0.07	870
3	1	15.8	0.068	1,185
	2	15.8	0.065	1,148
	3	14.3	0.068	1,073
	4	14.3	0.068	1,073
	平均値	14.9	0.067	1,118
4	1	18.8	0.063	1,410
	2	18.2	0.065	1,365
	3	17.7	0.065	1,328
	4	17.7	0.068	1,328
	平均値	18.1	0.065	1,385
5	1	21.6	0.063	1,620
	2	21.6	0.06	1,620
	3	20.1	0.063	1,508
	4	20.1	0.065	1,508
	平均値	20.8	0.063	1,560
6	1	—	—	—
	2	—	—	—
	3	—	—	—
	4	24.8	0.06	1,860
	平均値	—	—	—
7	1	—	—	—
	2	—	—	—
	3	—	—	—
	4	27.7	0.063	2,078
	平均値	—	—	—
8	1	—	—	—
	2	—	—	—
	3	—	—	—
	4	31.6	0.07	2,370
	平均値	—	—	—

合成減速度：X, Y, Z軸方向の減速度のベクトル和
衝撃力：合成減速度×ダミー重量 (75kg)

試料2の減速度は、落下高さ1～6mにおいて試料1に比べて0.3～0.9G小さく、7～8mにおいて1～2.1G逆に大きくなっている。

したがって、衝撃力も試料2は落下高さ1～6mにおいて試料1に比べて小さいが、7～8mにおいて逆に大きな力を受けている。

各高さから落下したダミーがマットに接触した瞬間から最大に沈むまでの負荷時間については、試料2は試料1に比べて落下高さ1mで

表3 試料2の減速度・負荷時間及び衝撃力

落下高さ (m)	落下位置	平均値		
		合成減速度 (G)	負荷時間 (Sec)	衝撃力 (kgf)
1	1	7.9	0.08	593
	2	7.2	0.09	540
	3	7.3	0.08	548
	4	7.1	0.088	533
	平均値	7.4	0.084	555
2	1	11.5	0.08	863
	2	11.4	0.075	855
	3	10.9	0.078	818
	4	11.4	0.083	855
	平均値	11.3	0.079	848
3	1	14.4	0.075	1,080
	2	14.3	0.075	1,073
	3	14.2	0.073	1,065
	4	14.1	0.073	1,058
	平均値	14.3	0.074	1,073
4	1	18.4	0.07	1,380
	2	17.5	0.075	1,313
	3	17.6	0.07	1,320
	4	17.3	0.075	1,298
	平均値	17.7	0.073	1,328
5	1	20.6	0.068	1,545
	2	20.6	0.07	1,545
	3	20.2	0.068	1,515
	4	20.6	0.073	1,545
	平均値	20.5	0.069	1,538
6	1	—	—	—
	2	—	—	—
	3	—	—	—
	4	24.1	0.068	1,808
	平均値	—	—	—
7	1	—	—	—
	2	—	—	—
	3	—	—	—
	4	28.7	0.068	2,153
	平均値	—	—	—
8	1	—	—	—
	2	—	—	—
	3	—	—	—
	4	33.7	0.068	2,528
	平均値	—	—	—

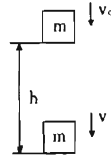
合成減速度：X、Y、Z軸方向の減速度のベクトル和
 衝撃力：合成減速度×ダミー重量（75kg）

0.011秒、2 mで0.012秒、3～5 mで0.006秒多く作用している。また、7 m以上では逆の関係がみられ、8 mでは負荷時間が0.02秒少なく作用しており、衝撃力も大きくなることがわかった。

結局、試料2は、ダミーの落下高さが7 m以下の場合に有利であり、試料1は7 m以上の場合に有利な特性をもっていることがわかった。

(2) 緩衝性能の理論解析

マットの緩衝特性を数値で表すために、マットを弾性体とみなして弾性係数Eを求めてみる。



一般に質量mの物体が高さhより落下したとき次式が成立する。

$$v = v_0 + gt \dots (1)$$

$$h = v_0 t + \frac{1}{2} gt^2 \dots (2)$$

ここで、 $v_0 = 0$ では

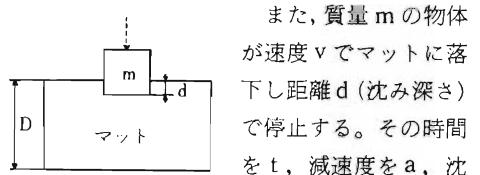
$$v = \sqrt{2gh} \dots (1')$$

v_0 ：初速度

g ：重力加速度（ $\approx 9.8 \text{ m/sec}^2$ ）

v ：距離h落下したときの速度

t ：距離h落下するときに要する時間



また、質量mの物体が速度vでマットに落下し距離d（沈み深さ）で停止する。その時間をt、減速度をa、沈み深さdにおけるダミーの速度をv'とすると、

$$v' = v - at \dots (3)$$

$$d = vt - \frac{1}{2} at^2 \dots (4)$$

が成立する。

ここで、安全マットを弾性体とみなすとフックの法則が成立する。

$$\sigma = E \cdot \epsilon \dots (5)$$

σ ：安全マット内に生ずる応力 (kg/cm²)

ϵ ：ひずみ(マットの厚さD、沈み量d)

$$\epsilon = d/D$$

E：弾性係数 (kg/cm²)

単位面積当りの弾性体に蓄えられるエネルギーは、一般に $\frac{1}{2} \sigma d$ である。

したがって、緩衝面積Aに蓄えられるエネルギーは、

$$\frac{1}{2} \sigma d A \dots (6)$$

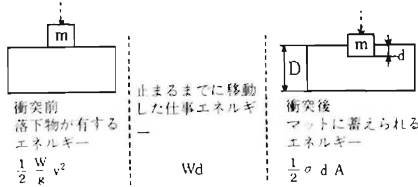
ここで、A：ダミーがマットに接触した面積
 また、速度v (m/sec)で落下する落下物の有する運動エネルギーは、

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 \dots (7)$$

W：ダミーの重量 m：ダミーの質量

重量Wのダミーが、距離D (m)移動したときのエネルギーは、Wd(kg・m)である。

これらを考慮し、ダミーがマットに衝突してから止まるまでの現象を衝突前、衝突後に分けると、



以上のことから、ダミーがマットに衝突前に有する運動エネルギーと衝突して止まるまでに行った仕事エネルギーは全てマットに吸収されたものとする、エネルギー保存の法則により、

$$\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 + Wd = \frac{1}{2} \sigma d A \dots\dots\dots(8)$$

が成立する。

ここで、マットの弾性係数(マットの特性値)を求めるため式(8)を書き換えると

$$\frac{1}{2} \sigma d A = \frac{1}{2} E \epsilon d A = \frac{1}{2} E \frac{d}{D} d A$$

式(8)は、

$$\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 + Wd = \frac{1}{2} E \frac{d^2}{D} A \dots\dots\dots(9)$$

となり、弾性係数Eは、

$$E = \frac{WD}{gA} \left(\frac{v^2}{d^2} + \frac{2g}{d} \right) \dots\dots\dots(10)$$

で表される。

式(10)にW=75kg, A=0.2^2×π≒0.1257m^2(ダミーの底面積), D=0.5m, g=9.8m/sec^2及び速度vの実測値を代入して弾性係数Eを求めた結果は表4, 5に示すとおりである。

弾性係数Eは、落下高さにより値が異なっているため平均値を求めて比較すると試料1は4.84kg/cm^2, 試料2は4.47kg/cm^2であり、試料2の方が小さい。

(3) マット面のダミー落下位置と緩衝性能の関係について

図4に示すとおりマット面のダミー落下位置を変えて実験した結果、試料1, 試料2ともに減速度は落下位置①より②の方が、また、落下

位置③より④の方が小さい。つまり減速度はマット周辺部付近より中心部付近の方が5~10%小さく、衝撃力も小さい。

表4 試料1の弾性係数

落下高さ H (m)	減速度 a (G)	速度 v (m/sec)	時間 t (sec)	変位量 d (沈み量) (m)	弾性係数 E (kg/cm^2)
1	8.3	4.427	0.0544	0.12	4.59
2	11.6	6.261	0.0551	0.17	4.35
3	14.9	7.668	0.0525	0.20	4.70
4	18.1	8.854	0.0499	0.22	5.14
5	20.8	9.899	0.0486	0.24	5.40
平均値					4.84

表5 試料2の弾性係数

落下高さ H (m)	減速度 a (G)	速度 v (m/sec)	時間 t (sec)	変位量 d (沈み量) (m)	弾性係数 E (kg/cm^2)
1	7.4	4.427	0.0610	0.13	3.70
2	11.3	6.261	0.0565	0.17	4.14
3	14.3	7.668	0.0547	0.20	4.34
4	17.7	8.854	0.0510	0.22	4.92
5	20.5	9.899	0.0493	0.24	5.25
平均値					4.47

したがって、訓練等で安全マットを使用し高所作業をする場合には、作業位置を考慮し、安全マットの中心部で受けるように設定する必要がある。

(4) マットの変位量について

ダミー落下時のマット変位量の測定は試料2について、光学式変位測定器を用いて行った。測定結果は表6に示すとおりである。ここで変位量dを理論的に算出すると次のとおりである。式(9)を変形すると、

$$d^2 - \frac{2DW}{EA}d - \frac{DW}{gEA}v^2 = 0 \dots\dots\dots(11)$$

となり、

$$d = \frac{\frac{2DW}{EA} \pm \sqrt{\left(\frac{2DW}{EA}\right)^2 + \frac{4DWv^2}{gEA}}}{2} \dots\dots\dots(12)$$

が得られる。

ここで式(12)に安全マットの厚さD=0.5m,

落下高さ 1 m のときの速度 $v = 4.427\text{m/sec}$ 、
 $E = 4.47\text{kg/cm}^2$ 、 g 、 W 及び A の各値を代入すると、

$d = 0.12\text{m}$ となる。

同様にして、落下高さを変え、変位量 d を求めると表 6 に示すように実測値とはほぼ一致した値を示している。

表 6 試料 2 の変位量

マット厚さ D (m)	落下高さ H (m)	変位量 d (理論値) (m)	変位量 d (実測値) (m)
0.5	1	0.12	0.14
	2	0.17	0.17
	3	0.20	0.20
	4	0.23	0.22
	5	0.26	0.25

(5) 減速度が人体に及ぼす影響と安全マットの使用限界について

加速度あるいは減速度が人体に及ぼす影響についての文献資料によると、航空機乗務員が非常脱出する場合、図 7 のとおり加速度の上限を 20G にとって設計している。

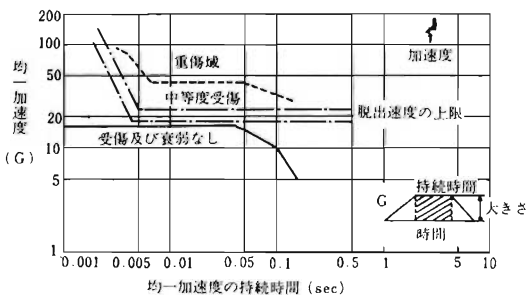


図 7 加速度が人体に及ぼす影響

また、減速度の持続時間によっても減速度が人体に及ぼす安全な領域は異なり、持続時間が 0.04 秒以下のとき、減速度は、18G 以下が安全な領域とされている。

今回行ったマットの実験では減速度の持続時間は表 7 に示すとおり、落下高さによっても若干異なるが、約 0.01~0.02 秒である。

したがって、試料 1、試料 2 ともに人体に安

全な減速度 20G 以下で使用するには 5 m を超えない範囲で使用する必要がある。

しかし、通常、足から降下する着地姿勢では人体の受ける減速度はダミーによる実験値より小さい値であるから作業高さ等の上限を本実験の結果に基づいて決めることはむずかしい。

表 7 マットの実験における減速度の持続時間

落下高さ (m)	実験 1		実験 2	
	減速度 (G) (Y 軸)	持続時間 (秒)	減速度 (G) (Y 軸)	持続時間 (秒)
1	8	0.02	8	0.02
2	11	0.018	11	0.02
3	14	0.015	15	0.017
4	18	0.01	18	0.01
5	21	0.01	20	0.01

(6) マットの厚さの差異と緩衝性能の関係について

厚さの異なる試料 3 及び試料 4 について実験を行った結果は表 8、表 9 及び図 8 に示すとおりである。

試料 3 は落下高さ 4 m で減速度は 19.3G で 20G 以内であるのに対し、試料 4 は落下高さ 3 m で減速度が 21.3G で 20G を越えることがわかった。

表 8 試料 3 の減速度・荷荷時間及び衝撃力

落下高さ (m)	平均値		
	合成減速度 (G)	荷荷時間 (sec)	衝撃力 (kgf)
1	7.7	0.073	578
2	12.3	0.068	923
3	16.2	0.068	1,215
4	19.3	0.068	1,448
5	23.8	0.065	1,785

合成減速度：X、Y、Z 軸方向の減速度のベクトル和
 衝撃力：合成減速度×ダミー重量 (75kg)

表 9 試料 4 の減速度・荷荷時間及び衝撃力

落下高さ (m)	平均値		
	合成減速度 (G)	荷荷時間 (sec)	衝撃力 (kgf)
1	10.3	0.063	773
2	16.3	0.058	1,223
3	21.3	0.055	1,598
4	27.3	0.05	2,048

合成減速度：X、Y、Z 軸方向の減速度のベクトル和
 衝撃力：合成減速度×ダミー重量 (75kg)

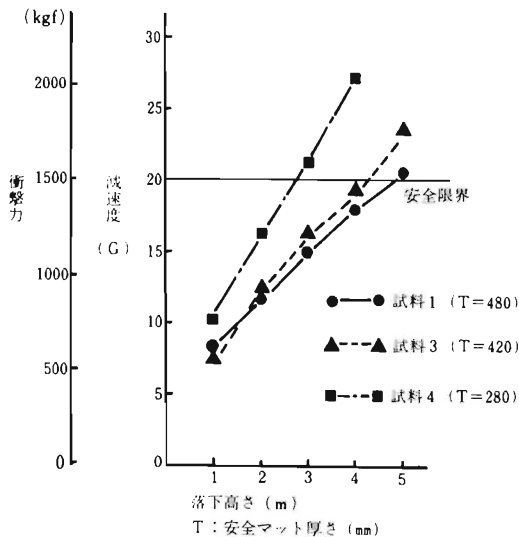


図8 厚さの異なるマットの減速度・衝撃力

マットの厚さと減速度 a の関係を理論計算によって求めると次のとおりである。

[弾性係数=4.47kg/cm²、落下高さ 3 m の例]

次式(3)に $v' = 0$ 、 $v = 7.668\text{m/sec}$ を代入すると、

$$v' = v - at \dots\dots\dots(3)$$

$$0 = 7.668 - at \dots\dots\dots(3')$$

∴ $t = 7.668/a$ となる。

v 及び t の値を次式(4)に代入すると、

$$d = vt - \frac{1}{2} at^2 \dots\dots\dots(4)$$

$$d = \frac{7.668^2}{a} - \frac{1}{2} \frac{7.668^2}{a}$$

上式に変位量 $d = 0.20\text{m}$ を代入すると、厚さ $D = 0.5\text{m}$ のマットでは、

減速度 a は、

$$a = 142.30\text{m/sec}^2$$

$$\therefore a = 142.30/9.8 \approx 14.52\text{G}$$

となり、表 3 に示す実測値とはほぼ一致する。

同様に各厚さのマットについて変位量及び減速度を計算した結果は表10に示すとおりである。

三連はしごの先端付近 8 m から落下した場合、減速度を 20G 以下にするには、安全マットの厚さをどの程度厚くする必要があるか理論的に導き出すため、W、A、g の各値、表 4、表 5 の弾性係数 E、式(1)から求めた変位量 d 及び式(1')から求めた速度 ($v = 12.522\text{m/sec}$) を式

(10)に代入し、安全マットの厚さ D を求めると、試料 1 の材質にあつては約 770mm、試料 2 の材質にあつては約 710mm の厚さが必要である。

表10 各厚さのマットの変位・減速度の理論値

弾性係数 E = 4.84kg/cm ²				弾性係数 E = 4.47kg/cm ²			
マット厚さ D (m)	落下高さ H (m)	変位量 d (m)	減速度 a (G)	マット厚さ D (m)	落下高さ H (m)	変位量 d (m)	減速度 a (G)
0.5	1	0.1178	8.53	0.5	1	0.1222	8.18
	2	0.1631	12.26		2	0.1700	11.76
	3	0.1984	15.12		3	0.2066	14.52
	4	0.2281	17.53		4	0.2375	16.84
	5	0.2543	19.66		5	0.2648	18.88
	6	0.2779	21.59		6	0.2894	20.73
0.4	1	0.1043	9.59	0.4	1	0.1087	9.20
	2	0.1453	13.76		2	0.1514	13.21
	3	0.1768	16.97		3	0.1842	16.29
	4	0.2034	19.66		4	0.2118	18.88
	5	0.2268	22.04		5	0.2362	21.27
0.3	1	0.0897	11.15	0.3	1	0.0935	10.69
	2	0.1253	15.96		2	0.1305	15.33
	3	0.1526	19.66		3	0.1589	18.88
	4	0.1756	22.78		4	0.1828	21.88
	5	0.1956	25.52		5	0.2039	24.52
0.2	1	0.0727	13.75	0.2	1	0.0757	13.21
	2	0.1017	19.67		2	0.1059	18.89
	3	0.1240	24.19		3	0.1291	23.24
	4	0.1428	28.01		4	0.1481	27.01
	5	0.1593	31.38		5	0.1659	30.14

7. ま と め

(1) マットの緩衝材の差異と緩衝性能について

同じ厚さのマットについて比較すると、軟らかいマットは落下高さが低い条件では緩衝性能が良く衝撃力を吸収するが、ある高さ以上になると衝撃力を吸収できなくなり、いわゆるダミーの底づきに近い現象が表われ減速度、衝撃力が大きくなる。

したがって、ある程度の硬さも必要となる。

また、着地時に足の捻挫を防止するためにはマットは適当な硬さが必要であるといわれている。

(2) マットの厚さと緩衝性能について

供試マットの材質の場合、マットの厚さに対し、減速度が安全な領域 (20G 以下) となる落下高さは次のとおりである。

厚さ 500mm のとき 落下高さ 約 5 m 以下

厚さ 420mm のとき 落下高さ 約 4 m 以下

厚さ 280mm のとき 落下高さ 約 3 m 以下

(3) マット設定上の注意

落下位置がマット中心に近いほど衝撃力が小さく、周辺部では5～10%増加する。

したがって、可能な限り中心部を使用することが望ましい。

(4) 減速度の人体に対する安全限界について

減速度の安全な領域については、航空医学に関する実験結果等を根拠とし、減速度20Gを安全限界の目安とした。

しかし、人体が受ける衝撃は減速度の最大値のほか、負荷時間、減速度の方向、体の部位などによって影響が異なり、特に落下姿勢により軽減できるので、ある程度事故を想定した訓練等も必要である。

(5) 今後の課題

軽便な緩衝性能の良い安全マットを開発するためには、今後、各種の素材について特性を把握する実験等を行い、資料を蓄積していくことが必要である。

8. 参考文献

- (1) 航空医学実験隊 万木良平
エアーマットによる落下衝撃防護装置の研究
(医学報告15(4):219-228.1975)
- (2) 人間-環境系編集委員会
人間-環境系 上巻 人間機能ハンドブック
- (3) 消防科学研究所報 第12号 昭和50年
- (4) 消防科学研究所報 第13号 昭和51年