

## 床陶磁器質タイル張り仕上げの衝撃破壊性状

熊谷 敏男  
(技術研究所)丸 一 俊 雄  
(技術研究所)

## § 1. はじめに

最近の陶磁器質タイルの需要動向によると、内装タイルおよび外装タイルへの利用に比べて床面への利用が増加してきている<sup>1)</sup>。このような傾向の中で、数年前より化粧性、感触性に優れたデザインタイルと呼ばれる床用陶器質タイルが輸入されてきている。これに伴い同種の国産品の陶器質タイルも製造され、市場に出回ってきている。また、タイル原材料の高騰、省資源問題などからタイルの製造に当たって厚みを薄くする傾向も出てきている。これらの傾向は、床に張られたタイルが衝撃などによって割れやすくなる傾向に働いており、何らかの形でこの問題を解決しておく必要性が生じてきている。

一般に、床仕上げに要求される性能として次のようなものが考えられる<sup>2)</sup>。

- ・力学的性質（耐衝撃性、耐摩耗性、耐擦傷性など）
- ・物理的性質（耐薬品性、耐候性、寸法安定性、耐水性、耐火性など）
- ・感覚的性質（歩行感、清潔感、視覚感など）
- ・その他（施工性、メンテナンス性、コストなど）

床仕上げの検討を行なう場合には、これらの要因について総合的に検討する必要があるが、耐久性の観点から陶磁器質タイル張り床に要求される性質として重要なものは、耐摩耗性と耐衝撃性であると考えられる。

耐摩耗性に関しては、既に種々の研究<sup>3)</sup>がなされている。人間の通行および各種摩耗試験機による耐摩耗性の

タイルの種類	減少厚さ (mm)	減少重量 (g)	減少体積 (cm <sup>3</sup> )
陶 器 質	0.805	4.30	2.247
炆 器 質	0.069	0.53	0.230
磁 器 質	0.062	0.35	0.148

(注) 試験機：テーパー式摩耗試験機  
試験条計：摩耗輪 H-18、摩耗回転数 (rpm)  
1,000、摩耗輪に加える荷重 500 g

表一 1 タイルの材質による摩耗量の比較

比較検討結果では、磁器質や炆器質タイルは御影石やテラゾーブロック並みの耐摩耗性を示している。しかし、陶器質タイルの摩耗量は、表一 1 に示すように磁器質および炆器質タイルのその 10 倍以上になっているので、通行量の多い床面への利用には適さないと考えられる。

陶磁器質タイルや他の仕上材料の耐衝撃性の検討は、仕上材料自体について、その支持条件を砂下地支持、2 辺もしくは 4 辺固定支持などに可変して行なわれているが、下地コンクリートや下地骨組などに張付けられたものについての検討は、ほとんど行なわれていない。

床張りされたタイルの実態調査結果を示すと表一 2 のとおりである。陶器質タイルは数年前より床面に用いられてきているが、それらは主として屋内の高級な床仕上げが要求される箇所に採用されている。G 地下鉄通路のように通行量の多い箇所で、かつクリンカー張り工法で張られたケースでは、写真一 1 に示すような割れおよび摩耗による故障が生じている。これに対して通行量の少ない箇所に施工されたケースでは、故障の発生は少ないといえる。

一方、磁器質および炆器質タイルは、従来から多くの床面に使用されてきている。K 郵便局や H 銀行の例のように、荷物の搬入や車の乗入れの行なわれている箇所では割れの発生が多く問題となっているが、その他の箇所では故障の発生はほとんどないといえる。このように実態調査の結果では、タイル張りの床仕上げの衝撃による割れ故障が幾つか確認されている。

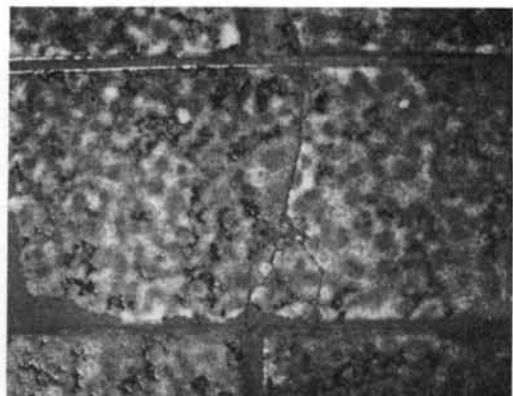
実用的には張付けられた状態での耐衝撃性の評価が重要であり、前に記したような仕上材料自体の耐衝撃性の評価も、実際の衝撃破壊性状との関連で試験方法を定める必要がある。タイル張り床の場合は、構成材料であるタイルおよび張付けモルタルの物性値などから耐衝撃性の評価ができれば、設計および施工指針を確立する上でその有用性は大きいといえる。

本報告は、床陶磁器質タイル張り仕上げの衝撃破壊性状を、落球式衝撃試験で検討したものである。

建 物 名	使用場所	タイルの種類	張 付 工 法	割れなどの故障の状態
G地下鉄通路	B 1 階, 地下鉄通路	陶器質 200×200mm 205×100	クリンカー張り り工法	・タイルの割れ率: 22.3% (太い割れ: 張付モルタルの割れと一致) (細かい割れ: ほぼ全面にわたって発生) ・衝撃による割れ: 0.2~0.3% ・通行量が多く, 軸葉が摩耗 ・きじが出ているものもあり
T会館	8階ロビー	陶器質 200×200	圧着張り工法	・一部, タイル端部の割れあり
S百貨店	1階便所	陶器質 200×200	圧着張り工法	・割れなし
D店舗	1階店舗	陶器質 200×200	不明	・割れなし
M百貨店	1階喫茶室	陶器質 200×200	不明	・割れなし
I駅ビル	2階レストラン	陶器質 200×200	圧着張り工法	・割れなし
T学園都市	公園通路	炻器質 108×227	クリンカー張り り工法	・衝撃による割れおよび下地の亀裂にそった割れあり
K郵便局	1階外構	磁器質 150×150 炻器質 30×180	クリンカー張り り工法	・貨物車両乗入れ部の衝撃による割れが多い
Aオフィスビル	1階ビロティ および外構	磁器質 93×93	不明	・割れなし
Nオフィスビル	1階外構	磁器質 100×200	不明	・割れなし
T交通会館	1階ビロティ	磁器質 60×110	不明	・割れなし
W大学	1階通路	磁器質 93×93	不明	・衝撃による割れおよびコーナーの割れあり
H銀行	1階車寄せ	磁器質 93×93	圧着張り工法	・衝撃による割れあり

(注) 調査期間: 昭年50年~58年

表一 2 床張りされた陶磁器質タイルの故障実態



写真一 1 クリンカー張り工法で張られた陶器質タイルの衝撃破壊の例

## § 2. タイル張り床の衝撃破壊性状の考え方

衝撃破壊性状は、図-1に示すようにタイル張り床面に鋼球をある高さ  $h_1$  より落下させた場合、鋼球のはね返り高さ  $h_1'$  は鋼球が同一のものであれば、タイルや張付けモルタルの性状およびその破壊の程度によって決まってくる。鋼球の落下高さ  $h_1$  を大きくしてゆくにつれてタイルの破壊が進み、 $h_1$  に対応するはね返り高さ  $h_1'$  の比率は小さくなってゆく。

衝撃速度  $v_1$  とはね返り速度  $v_1'$  についても同じことがいえ、 $v_1$  に対する  $v_1'$  の比率は小さくなってゆく。 $v_1$  に対する  $v_1'$  の比は、はね返り係数  $e$  として(1)式のように表わせる。

$$-e = \frac{v_1'}{v_1} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $v_1 = \sqrt{2gh_1}$ 、 $v_1' = \sqrt{2gh_1'}$ 、 $h_1' = \frac{1}{2}gt_1'^2$

(ただし、 $g$ : 重力の加速度、 $t_1'$ : 第1回のはね返り

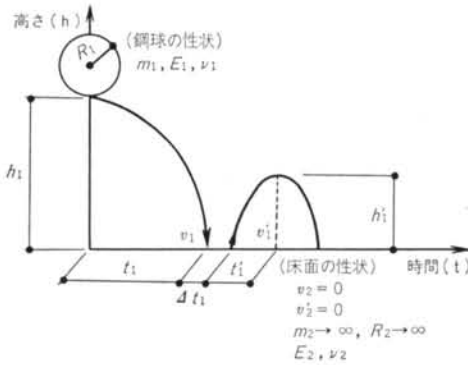


図-1 床面への鋼球の衝突

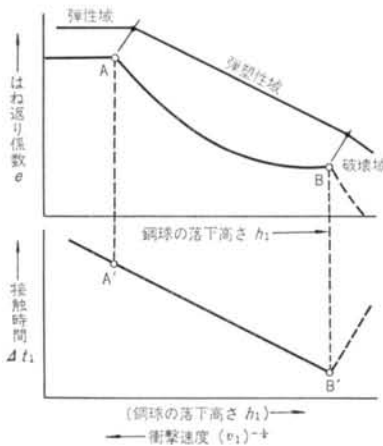


図-2 タイルの破壊過程におけるはね返り係数  $e$  と接触時間  $\Delta t_1$  の関係

滞空時間の  $1/2$ ) であるので、式(1)に代入すると式(2)が得られる。

$$-e = t_1' \sqrt{\frac{g}{2h_1}} \quad \dots\dots(2)$$

したがって、鋼球の落下高さ  $h_1$  およびはね返り滞空時間  $2t_1'$  を計測し、はね返り係数  $e$  の変化を捉えてゆけばタイルの破壊過程を把握することができる。

鋼球の落下高さ  $h_1$  を可変させて行なった場合はね返り係数  $e$  の減衰性状には、図-2に示すような弾性域、弾塑性域および破壊域の3つの過程が認められる<sup>4)</sup>。

第1過程の弾性域は、鋼球の落下高さ  $h_1$  を増しても、はね返り係数が一定値を保つ過程である<sup>4)</sup>。第2過程の弾塑性域は、タイルに塑性変形(凹み)とその周りの割れが進行する過程である。第3過程の破壊域は、タイルの打抜き破壊や張付けモルタルの降伏破壊が生じる破局的な過程である。これらの3つの破壊過程の間には、変曲点AおよびBが存在する。

第2過程において、鋼球の落下高さ  $h_1$  とはね返り滞空時間  $t_1'$  との間には、実験結果の図-9に示すように両対数グラフで直線関係が認められるので、実験式として式(3)が得られる<sup>5)</sup>。

$$t_1' = \alpha h_1^\beta \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $\alpha, \beta$ : 実験定数

式(3)を式(2)に代入し、はね返り係数  $e$  を落下高さ  $h_1$  の関数として表わすと式(4)が得られる。

$$-e = \alpha h_1^\beta \sqrt{\frac{g}{2h_1}} \quad \dots\dots(4)$$

式(4)は、図-3に示すように実験定数  $\beta$  の値によって  $e$  の減衰状態が大きく異なってくる。すなわち、 $\beta$  を限りなく  $1/2$  に近づけてゆくと、 $e$  は一定値の  $\alpha \sqrt{\frac{g}{2}}$  に近づき衝撃破壊が進みにくくなる。また、 $\beta$  が零に近づいてゆくほど  $e$  の減衰が速く、衝撃破壊が生じやすくなる。このように、衝撃破壊性状を支配する  $\beta$  は耐衝撃性の程度を表わす指数と考えることができる<sup>5)</sup> (以下、 $\beta$  を衝撃破壊指数と呼ぶ)。

図-2に示すはね返り係数  $e$  の変曲点AおよびBを明

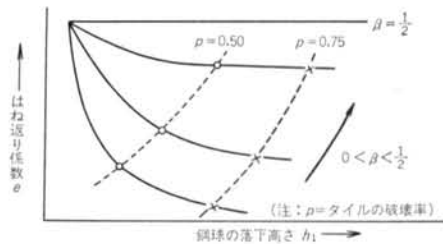


図-3 はね返り係数の減衰における  $\beta$  の効果

確に捉えることは、計測技術上非常に難しい。変曲点Bについては接触時間  $\Delta t_1$  の変曲点 B' とはね返り係数  $e$  の変曲点 B とが一致するので、 $\Delta t_1$  の変曲点 B' との対応で  $e$  の変曲点 B を決めることができる<sup>6)</sup>。

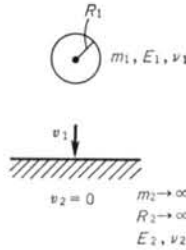


図-4 弾性球と床面との衝突

図-4 および図-11 に示すように鋼球とタイル張り床との弾性衝突における接触時間は、H. Hertz の接触理論より式(5)のように与えられる。

$$\Delta t_1 = 2.943 \left[ \frac{5\pi\rho_1 \{E_2(1-\nu_1^2) + E_1(1-\nu_2^2)\}}{4E_1E_2} \right]^{\frac{2}{3}} \frac{R_1}{v_1^{\frac{1}{3}}} \dots\dots(5)$$

ここで、 $E_1, \nu_1$ : 鋼球の弾性係数とポアソン比  
 $E_2, \nu_2$ : タイルの弾性係数とポアソン比

$\rho_1$ : 鋼球の密度  
 $R_1$ : 鋼球の直径  
 $v_1$ : 鋼球の衝突前の速度

式(5)より分かるように、衝撃の接触時間  $\Delta t_1$  は落球や床材の諸物性値が一定であれば、鋼球の直径  $R_1$  に比例し鋼球の衝撃速度  $v_1$  の 1/5 乗に反比例することになる。

式(5)は鋼球と床面との弾性衝突における接触時間  $\Delta t_1$  を表わしている。接触時間  $\Delta t_1$  は、図-2 で示したように弾塑性域まで表わせるとしたが、その理由は次のように考えられる。

鋼球と床面との衝撃過程は、便宜上異なる3つの過程に分けて考えられる<sup>7)</sup>。

第一の過程は衝撃の初めに生じる鋼球と床面との弾性変形の段階であり、床面の幾つかの点で降状応力に達するまで続く（この段階の接触時間は Hertz の式で計算できる）。第二の過程は塑性ひずみの区域が床面の衝撃接触面の中で広がってゆく段階であり、弾性範囲を超えたひずみが床の衝撃接触面のどの箇所でも生じ、鋼球が床面の上で停止するまで続く。第三の過程は、貯えられた弾性エネルギーによって鋼球を上方に加速させる鋼球のはね返りの段階である。この段階における弾性定数は、初めの弾性段階での載荷のときとほとんど同じであり、この過程の持続時間も Hertz の式によって計算できる。

このように、Hertz の式が適用できない段階は第二の過程であるが、弾性計算からの推定の偏差は衝突による弾性変形の全体積と、比較した局部的塑性変形の体積との相対的大きさによると考えられる。塑性変形が生じ始

める衝撃速度より数10倍の衝撃速度のときを除いて、局部的塑性変形の体積は極めて少ないと考えられる。それゆえ、塑性変形が生じ始める速度からある範囲までの速度（後述するが、タイル張りの場合タイルの打抜き破壊や張付けモルタルの降伏破壊の生じる段階まで）においては、Hertz の理論式による接触時間との隔りはあまり大きくないと考えられる。

衝撃破壊指数  $\beta$ 、変曲点 B が生じるときの鋼球の落下高さ  $h_1$  等と床構成材料の諸物性値のうち、衝撃破壊性状に影響すると考えられる次のような物性：

- ① タイルの弾性係数 ( $E_T$ )
  - ② 張付けモルタルの弾性係数 ( $E_M$ )
  - ③ タイルの厚さ ( $T_T$ )
  - ④ タイルと張付けモルタルとのせん断付着強度 ( $B_S$ )
- 等との関係を捉えれば、耐衝撃性のタイル張り床を構成するための指標が得られる。

### § 3. 衝撃試験方法

#### 3.1 実験計画

衝撃試験の実験要因とその水準は表-3 に示すとおりである。タイルの材質3水準（タイルの種類としては9種類）、タイルの張付け工法2水準の全組合わせの供試体について、鋼球を1~500cmの高さから自然落下させてタイル張り床の衝撃破壊性状を検討した。

#### 3.2 落球式衝撃試験方法

##### (i) 衝撃試験体

実験に用いた陶磁器質タイルの寸法・形状および諸物性値は表-4 に示すとおりであり、これらのタイルはすべて市販品である。また、圧着張りおよびクリンカー張りに用いた張付けモルタルの調査、強度等は表-5 に示すとおりである。

タイル張りの下地コンクリートとしては、厚さ25~30cmの土間コンクリートを用いた。タイルの目地は目地幅を約1cmとり、空目地の状態とした。なお、衝撃試験には、タイルを張付けて3~4カ月後に実験に供した。

##### (ii) 落球式衝撃試験装置

床面に働く衝撃外力としては、種々の落下物による衝

可変要因	水 準
タイルの材質	磁器質, 炆器質, 陶器質
張付け工法	圧着張り工法, クリンカー張り工法
鋼球の落下高さ	1~500cm

表-3 実験の要因とその水準

撃の他に手押し車等の動車輪の運行による衝撃がある。  
本実験では前者の衝撃外力をモデル化し、鋼球の落下に

よる衝撃試験を採用した。

衝撃破壊の評価は、鋼球を自然落下させ1回目の衝撃

材質	タイルの種類 No.	寸法 (mm)	重量 (g)	裏足の形状	裏足の出 (mm)	吸水率 (o/wt.)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	圧縮弾性係数 ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	引張弾性係数 ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	曲げ強度 <sup>*1</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )	
											A法	B法
磁器質	1	93×93×8.3	165		0.62	0.03	1,161	5.12	4.98	0.282	289	299
	2	93×93×7.8	155		0	0.04	1,024	5.95	—	0.276	185	289
	3	108×108×8.0	215		0	0.12	1,761	5.70	6.65	0.228	189	393
	*2 4	150×150×13.3	710		2.59	1.38	1,448	5.22	5.73	0.277	127	222
炆器質	5	108×108×8.6	230		0.96	5.33	370	2.88	3.53	0.235	189	266
	8	180×180×13.6	1,110		5.24	1.38	592	4.40	4.80	0.253	156	228
	9	180×180×13.9	1,120		3.41	1.50	508	3.55	4.10	0.248	131	209
陶器質	6	200×200×12.4	880		1.49	15.43	225	1.47	1.49	0.220	137	133
	7	200×200×9.3	665		0.92	18.03	286	1.51	1.52	0.218	119	119

\* 1) A法は実大寸法のタイルを供試体を用いてタイル表面を載荷側にし、スパン距離をタイル辺長の3/4とした。

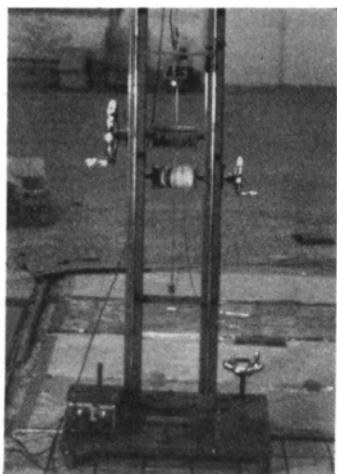
B法は幅5cmにタイルを切出し、タイル表面を載荷側にし、スパン距離を8cmとした。

\* 2) このタイルはJIS A 5209のきじの質による区分では吸水率(1.0%以上)から、炆器質に属するが、強度が大きいため磁器質とした。

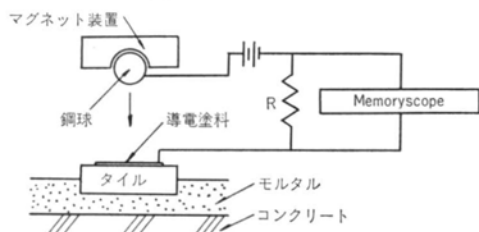
表一4 実験に用いたタイルの形状および諸性状

タイルの張付下地	タイルと下地との納まり	張付モルタルの割合(重量比)	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		圧縮弾性係数 $E_M$ ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	
			4×4×16 7ヵ月	5φ×10 2ヵ月 11週	4×4×16 7ヵ月	5φ×10 2ヵ月 11週	4×4×16 7ヵ月
圧着張り 工法		調合 (セメント) (砂) (水) (メチルセル) 1 : 2 : 0.497 : 0.001	66.9	252	159	1.283	2.222
クлинカー 張り工法		調合 (セメント) (砂) (水) 1 : 3 : 0.291 タイルの張付け直前に、セメント・ペーストののりかけを行う	22.7	50.7	68.9	0.837	1.298

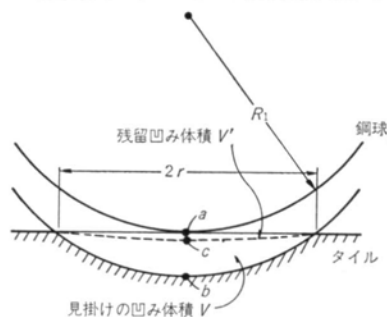
表一5 張付けモルタルの張付け仕様、調合および強度



写真一 2 衝撃試験装置



図一 5 接触時間  $\Delta t_1$  およびはね返り滞空時間  $t_1'$  の計測法

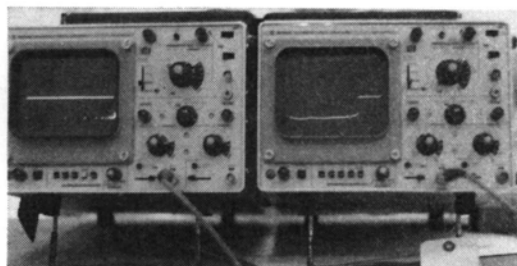


図一 6 衝撃時のタイルの変形

によるタイルの破壊性状を観察することによって行なった。タイルへの鋼球の落下位置は、衝撃破壊が他の鋼球の落下による破壊の影響を受けない位置を選定して行なった。各条件ごとの繰返し数は、ばらつき等を考慮して 5~10回とした。

衝撃試験装置は写真一 2 に示すような架台、可動レール、マグネット装置等からなる落球方式のものであり、鋼球の最大落下高さは 5 m まで可能となっている。衝撃用の鋼球は、JIS B 1501 (玉軸受用鋼球) に規定されている呼び  $1\frac{7}{8}$  in. (直径 47.6 mm)、並級の重量 440 g、弾性係数  $2.0 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup> のものを用いた。

本実験の場合、鋼球の落下高さが 4 m 前後で、図一 2



写真一 3 メモリスコープによる  $\Delta t_1$  および  $2t_1'$  の測定に示す第三の破壊過程 (破壊域) が生じるようにするため、上記の鋼球を使用した。それゆえ、鋼球の落下高さ 1 cm 以上では第一の過程である弾性域は計測されなかった。なお、本報で論じるはね返り係数は、弾塑性域の衝撃破壊性状を示すものである。

(イ) 衝撃接触時間およびはね返り滞空時間の計測

落球衝撃時の接触時間  $\Delta t_1$  およびはね返り滞空時間  $2t_1'$  を測るために (図一 1 参照)、タイル表面に導電塗料 (福田金属箔粉工業製導電塗料 RL-10、銀粉混入酢酸ビニル塗料) を刷毛で均一に塗り、鋼球とタイルの間に図一 5 に示すような電気回路を組んだ。鋼球をマグネット装置にセットし、回路を切ることによって鋼球をタイル面に自然落下させ、衝撃接触時間  $\Delta t_1$  およびはね返り滞空時間  $2t_1'$  を 2 台のメモリスコープ (東京ナショナル電子計測製、10 MHz、2 元象、ストレージオシロスコープ VP-5701 A) で測定した。

衝撃接触時間  $\Delta t_1$  は、図一 6 (図一 1 参照) に示すように鋼球とタイルとが a 点で接触すると同時に回路が閉じ、電流が流れメモリスコープが掃引し始める。b 点で変形が最大に達し、その後タイルの弾性回復により c 点まで変形が戻り、鋼球とタイルとの接触が切れると掃引の立上がりりが切れ  $\Delta t_1$  として計測される。このときのメモリスコープの掃引時間は 1 目盛当り 0.05~0.1 m sec とした。また、はね返り滞空時間  $2t_1'$  は、メモリスコープの掃引時間を 1 目盛当り 20~200 m sec にセットし、図一 1 に示すように第 1 回目の衝撃から第 2 回目の衝撃までの時間を  $2t_1'$  として計測した (写真一 3 参照)。

(ロ) タイルの衝撃破壊率

鋼球の衝突によるタイルの破壊の程度は、図一 7 に示すように 5 段階に分け、目視観察により 0~100% の破壊率として算定した。

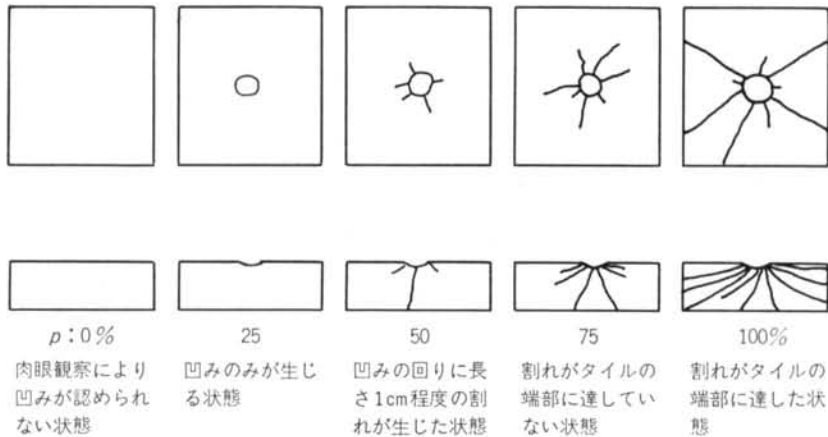


図-7 タイルの破壊モードとその破壊率

## § 4. 衝撃試験結果および考察

### 4.1 衝撃試験結果

鋼球の落下高さ  $h_1$  とタイルの破壊率  $p$  との関係は図-8に、また鋼球の落下高さ  $h_1$  とはね返り滞空時間  $t_1'$  との関係の一例は図-9に、さらに鋼球の落下高さ  $h_1$  とはね返り係数  $e$  との関係は図-10に示すとおりである。

鋼球の落下高さ  $h_1$  もしくは衝撃速度  $v_1$  と、衝撃接触時間  $\Delta t_1'$  との関係の一例は図-11に示すとおりである。

### 4.2 タイルの破壊率

鋼球の落下高さ  $h_1$  を1~500 cmまで可変し、鋼球を自然落下させてタイルに衝撃を与え、図-7の破壊率の判断基準により目視観察した結果は図-8に示すとおりである。

これによると、鋼球の落下高さが小さい段階ではクリンカー張り工法より圧着張り工法の方が破壊率が大きくなっている。しかし、ある落下高さを超えるとクリンカー張りの工法の方が圧着張りの工法より破壊率が大きくなる傾向が見られる。この交差する点は低い強度の陶器、炝器質タイルほど早く始まり、破壊率が25~50%近辺で生じている。タイルの破壊率50%は、図-13に示すようにタイルの破壊が裏面に達する段階である。これ以降においてクリンカー張り工法の破壊が早く生じやすいのは、圧着張り工法に比べ張付けモルタルの強度が弱く、降伏破壊が生じやすいためと考えられる。

タイルの材質による差は、寸法・形状が各タイルによって異なっているので明確ではないが、破壊過程を通じて材質的に弱い陶器質タイルが特に割れやすい（破壊が進みやすい）という傾向は認められなかった。

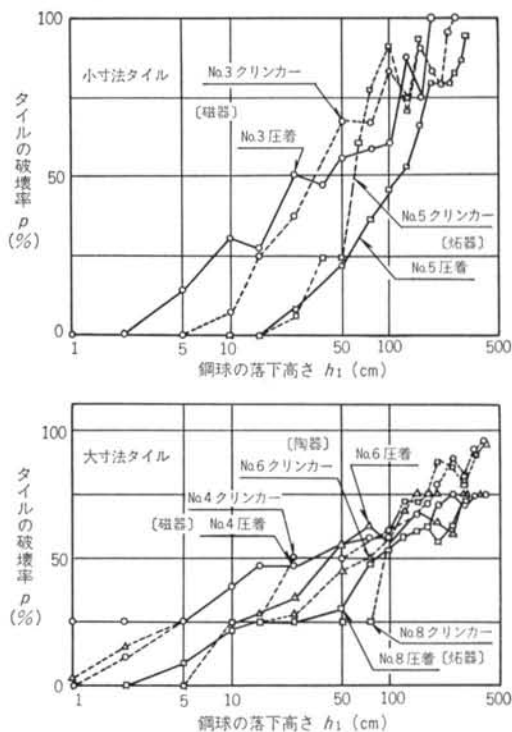


図-8 鋼球の落下高さ  $h_1$  とタイルの破壊率との関係

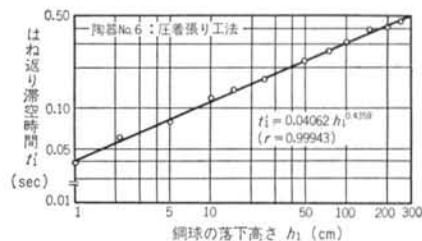


図-9 鋼球の落下高さ  $h_1$  とはね返り滞空時間  $t_1'$  との関係



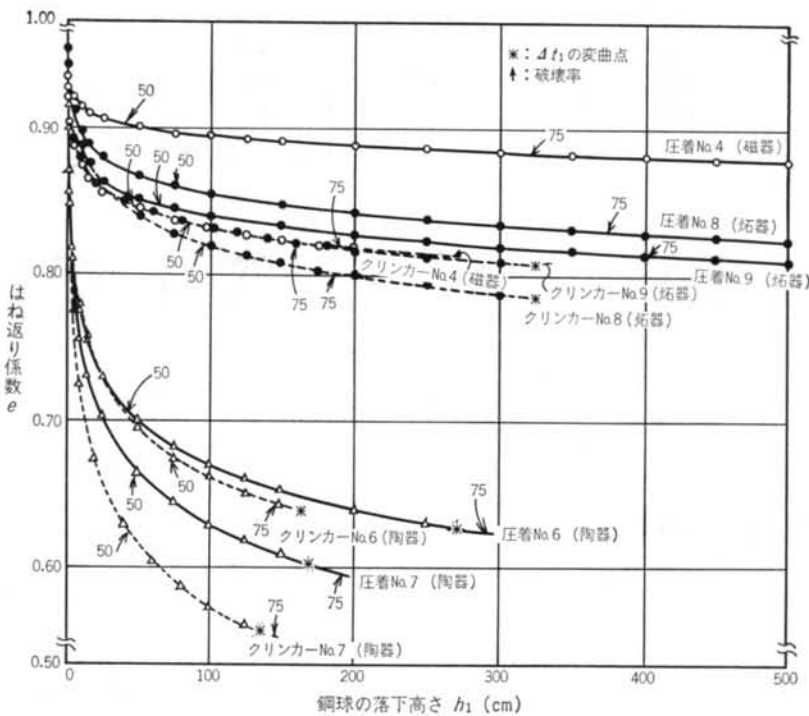


図-10 鋼球の落下高  $h_1$  とはね返り係数  $e$  との関係

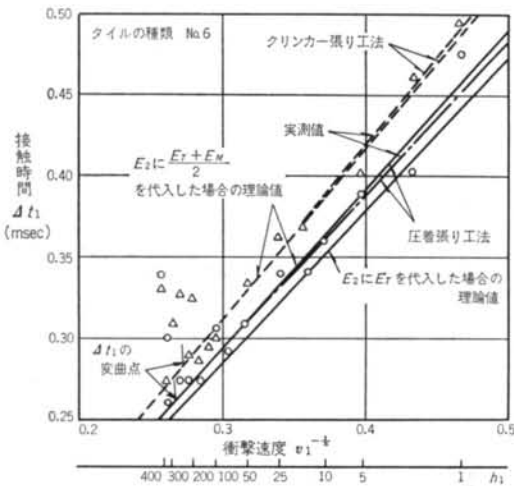


図-11 衝撃速度  $v_1$  と衝撃接触時間  $dt_1$  との関係

### 4.3 はね返り係数

鋼球の落下高さ  $h_1$  と実測されたはね返り滞空時間  $t_1'$  との関係の一例は図-9 に示したが、最小二乗法により式(3)の実験定数  $\alpha$  および  $\beta$  を求めた結果は表-6 に示すとおりである。これらの結果を基に、鋼球の落下高さ  $h_1$  とはね返り係数  $e$  との関係を示したのが図-10 である。タイルの寸法・形状が不揃いであるためばらつきはある

が、定性的にはほぼ図-3 に示すように衝撃破壊指数  $\beta$  が小さくなるほど、衝撃破壊が進みやすいという傾向が認められる。

### 4.4 衝撃接触時間

鋼球の衝撃速度と衝撃接触時間  $dt_1$  との関係を図-11 に示した。その図中に、式(6)の  $E_2$  にタイルの弾性係数  $E_T$  を代入した値、および  $E_T$  と張付けモルタルの弾性係数  $E_M$  の平均値を代入した場合の理論値を示したが、後者の方が実測値の傾向と良く近似している。これは、今回実験に用いたタイルの厚さが 8~14 mm と比較的低いため、衝撃の影響が張付けモルタル層まで及んでいることを示している。

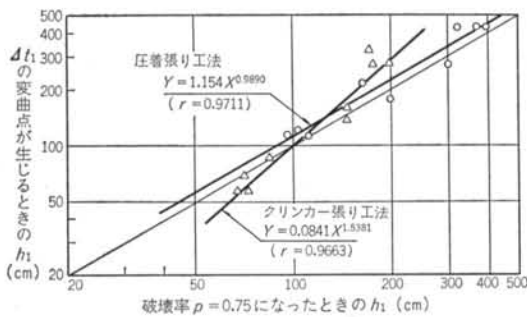
図-2 に示す衝撃接触時間  $dt_1$  の変曲点  $B'$  が生じるときの鋼球の落下高さ  $h_1$  と、視覚的観察によるタイルの破壊率  $p=0.75$  が生じるときの  $h_1$  との関係は、図-12 に示すように相関性が大きいため、変曲点  $B'$  がほぼタイルの破壊率 75% の近辺で生じているといえる。

変曲点  $B'$  近辺のタイルの破壊がどのような状態になっているかを調べるため、衝撃試験後のタイルを引きはがしタイルの表面と裏面の破壊モードとを比較した。その一例を示すと図-13 のとおりであり、全般的に表面の破壊より裏面の破壊の方が進んでいる。また、圧着張り



張 付 け 工 法	タ イ ル 種 類 No	衝撃破壊性状を示す特性				材 料 物 性 値					
		実 験 定 数		接 触 時 間 $d_{t1}$ の 変 曲 (cm)	下 高 さ 点 を 示 す 鋼 球 の 落 (cm)	破 壊 率 $p$ 0.75 が 生 (cm)	落 下 高 さ じ る と き の 鋼 球 の (cm)	タ イ ル の 弾 性 係 数 ( $\times 10^4 \text{kg/cm}^2$ )	タ イ ル 厚 (cm)	せん 断 付 着 強 度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	弾 性 係 数 の 数 ( $\times 10^4 \text{kg/cm}^2$ )
		$\alpha$	$\beta$	$h_1$	$h_1$	$E_T$	$T_T$	$B_S$	$E_M$		
圧 着 張 り	1	0.04181	0.4867	118.8	105	5.05	0.83	21.4	1.28		
	2	0.04161	0.4851	112.5	97	5.95	0.78	23.3	1.28		
	3	0.04304	0.4758	112.5	112	6.18	0.80	15.0	1.28		
	4	0.04223	0.4902	425.0	325	5.48	1.33	24.4	1.28		
	5	0.04231	0.4662	212.5	165	3.21	0.86	14.3	1.28		
	6	0.04062	0.4359	275.0	300	1.48	1.24	11.5	1.28		
	7	0.04104	0.4201	175.0	200	1.52	0.93	5.3	1.28		
	8	0.04253	0.4787	425.0	375	4.60	1.36	15.4	1.28		
	9	0.04157	0.4798	425.0	400	3.83	1.39	23.0	1.28		
ク リ ン カ ー 張 り	1	0.04329	0.4539	56.3	74	5.05	0.83	22.4	0.84		
	2	0.04252	0.4509	56.3	69	5.95	0.78	20.9	0.84		
	3	0.04240	0.4679	87.5	87	6.18	0.80	15.8	0.84		
	4	0.04152	0.4781	275.0	200	5.48	1.33	18.2	0.84		
	5	0.04247	0.4566	68.8	72	3.21	0.86	23.2	0.84		
	6	0.04153	0.4286	162.5	150	1.48	1.24	8.3	0.84		
	7	0.04139	0.3981	137.5	150	1.52	0.93	4.0	0.84		
	8	0.04348	0.4648	325.0	175	4.60	1.36	18.3	0.84		
	9	0.04178	0.4767	275.0	180	3.83	1.39	20.8	0.84		

表一六 衝撃破壊性状を示す特性と材料物性値

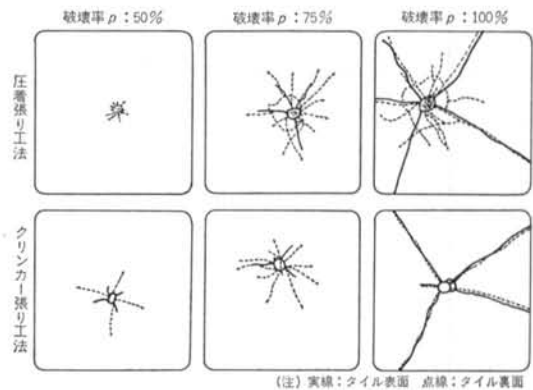


図一十二 タイルの破壊率  $p=0.75$  になったときの  $h_1$  と  $d_{t1}$  の変曲点が生じたときの  $h_1$  との関係

工法では破壊率75%近辺において写真一四に示すようなタイルの打抜き破壊が生じ、クリンカー張り工法では張付けモルタルの降伏破壊が生じる傾向にあるといえる。

#### 4.5 衝撃破壊性状に影響する要因

前節までにおいて、タイルの破壊率、はね返り係数および衝撃接触時間に関する衝撃破壊性状を検討した。本節では、床陶磁器質タイル張り仕上げの衝撃破壊がどの



図一十三 タイル表面と裏面の破壊の比較

ような要因によって影響されているかを検討するため、重回帰分析(変数減増法)を行なった。

従属変数および説明変数は次に示すとおりであり、4個の従属変数の各々について4個の説明変数で分析を行なった。



写真-4 圧着張り工法で張られたタイルの打抜き破壊

- ①タイルの弾性係数:  $E_T$
- ②タイルの厚み:  $T_T$
- ③タイルと張付けモルタルとのせん断付着強度:  $B_S$
- ④張付けモルタルの弾性係数:  $E_M$

重回帰分析に用いたインプットデータは表-6に、またその結果は表-7に示すとおりである。重回帰分析の結果より、各従属変数に関してほぼ次のようなことがいえる。

(1) 実験定数:  $\alpha$

実験定数  $\alpha$  は、式(3)および図-9からも分かるように  $h_1 = 1 \text{ cm}$  のときはね返り滞空時間  $t_1'$  の値である。この値はタイルの表面性状や導電塗料の厚みの違い等によるばらつきも含んでいるが、衝撃速度が小さいため弾性衝撃に近い状態であり、図-14に示すようにほぼタイルの弾性係数  $E_T$  に比例しているといえる。

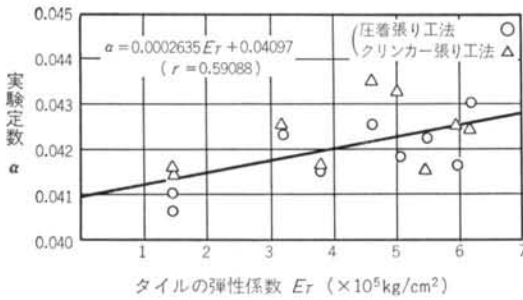
(2) 実験定数 (衝撃破壊指数):  $\beta$

実験定数  $\beta$  は、衝撃破壊性状を支配する重要な値であり、タイルの弾性係数  $E_T$ 、タイルと張付けモルタルとのせん断付着強度  $B_S$ 、タイルの厚み  $T_T$  およびモルタルの弾性係数  $E_M$  の順に効いているといえる。求められ

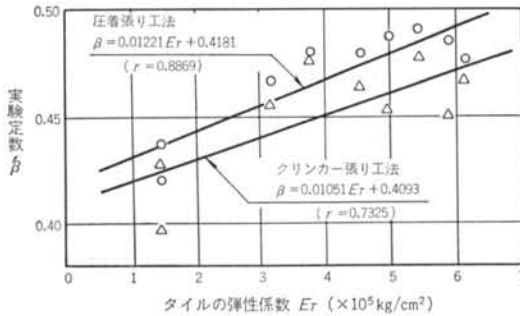
- ① 実験定数:  $\alpha$
- ② 実験定数 (衝撃破壊指数):  $\beta$
- ③ 衝撃接触時間  $\Delta t_1$  の変曲点 B' が生じる鋼球の落下高さ:  $h_1$
- ④ タイルの破壊率  $p = 0.75$  が生じる鋼球の落下高さ:  $h_1$

従属変数	定数項	$x_1 = \text{タイルの弾性係数}$ $E_T$ ( $\times 10^8 \text{ kg/cm}^2$ )	$x_2 = \text{タイル厚}$ $T_T$ (cm)	$x_3 = \text{せん断付着強度}$ $B_S$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$x_4 = \text{モルタルの弾性係数}$ $E_M$ ( $\times 10^8 \text{ kg/cm}^2$ )
実験定数 $\alpha$	$\alpha = 0.0410$ ( $R^2 = 0.370$ , $n = 17$ )	+ 0.00024 $E_T$ $F_0 = 10.39$	—	—	—
実験定数 $\beta$	$\beta = 0.33946$ ( $R^2 = 0.9324$ , $n = 16$ )	+ 0.00891 $E_T$ $F_0 = 31.28$	+ 0.02667 $T_T$ $F_0 = 11.24$	+ 0.00170 $B_S$ $F_0 = 16.62$	+ 0.02592 $E_M$ $F_0 = 9.20$
生じる鋼球の落下高さ $h_1$ (cm)	$h_1 = -570.934$ ( $R^2 = 0.9546$ , $n = 15$ )	+ 11.3548 $E_T$ $F_0 = 4.17$	+ 489.0351 $T_T$ $F_0 = 252.87$	—	+ 196.6931 $E_M$ $F_0 = 29.92$
破壊率 $p = 0.75$ が生じる $h_1$ (cm)	$h_1 = -390.463$ ( $R^2 = 0.8501$ , $n = 16$ )	—	+ 300.7751 $T_T$ $F_0 = 66.01$	—	+ 230.2149 $E_M$ $F_0 = 30.23$

表-7 実験定数  $\alpha$ ,  $\beta$ , 接触時間  $\Delta t_1$  の変曲点および破壊率  $p = 0.75$  が生じるときの鋼球の落下高さ  $h_1$  に関する重回帰分析結果



図一14 実験定数  $\alpha$  とタイルの弾性係数  $E_T$  との関係



図一15 タイルの弾性係数  $E_T$  と衝撃破壊指数  $\beta$  との関係  
た重回帰式は次に示すとおりである。

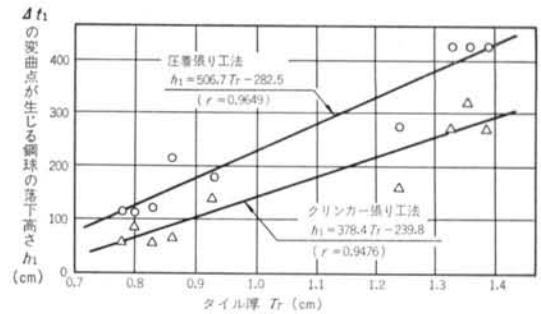
$$\beta = 0.3395 + 0.00891 E_T + 0.00170 B_S + 0.02667 T_T + 0.02592 E_M$$

実験定数  $\beta$  とタイルの弾性係数  $E_T$  との関係は 図一15 に示すとおりであり、相関性が大きい。これらの物性値を大きくすることによって、衝撃破壊指数  $\beta$  の値を 1/2 に近づけることができ、§2.にも記したように耐衝撃性のあるタイル張り床が構成できる。

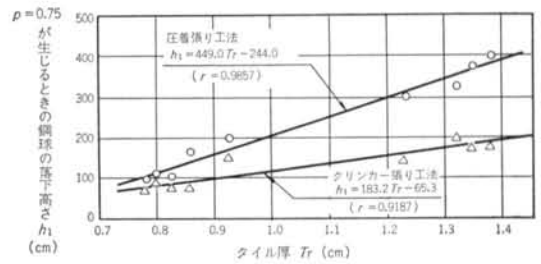
(3) 衝撃接触時間  $\Delta t_1$  の変曲点およびタイルの破壊率  $p = 0.75$  が生じるときの鋼球の落下高さ  $h_1$

標題の両者の関係は、図一12に示すように大体45度線上に乗っており、両者は破壊現象面ではほぼ同じものと考えられる。重回帰分析により求められた重回帰式も両者の間でほぼ似た説明変数が取上げられ、タイルの厚み  $T_T$  と張付けモルタルの弾性係数  $E_M$  が効いているといえる。取り上げられた両要因とも、それらを大きくすることによって、タイルの破局的破壊を生じにくくすることができる。

衝撃接触時間  $\Delta t_1$  の変曲点およびタイルの破壊率  $p = 0.75$  が生じるときの鋼球の落下高さ  $h_1$  と、これらに対して寄与度の大きいタイルの厚さ  $T_T$  との関係を示すと 図一16 および 図一17 のとおりであり、高い相関性が得られている。



図一16 タイル厚  $T_T$  と  $\Delta t_1$  の変曲点を示す鋼球の落下高さ  $h_1$  との関係



図一17 タイル厚  $T_T$  と  $p=0.75$  が生じるときの鋼球の落下高さ  $h_1$  との関係

## § 5. まとめ

以上の床タイル張り仕上げの落球衝撃試験および実態調査等の結果より、次のようなことが結論付けられる。

(1) 床陶磁器質タイル張り仕上げの鋼球落下による衝撃破壊性状を表わすはね返り係数  $e$  は、鋼球の落下高さ  $h_1$  との関係で、次のような実験式として表わすことができる。

$$-e = ah_1^b \sqrt{\frac{g}{2h_1}}$$

(2) 実験定数として求められる  $\beta$  は耐衝撃性の程度を表わす指数と考えられ、 $\beta$  の値を 1/2 に近づけてゆくと、はね返り指数  $e$  は一定値の  $\alpha \sqrt{\frac{g}{2}}$  に近づき、衝撃破壊が進みにくくなる。一方、 $\beta$  の値を零に近づけてゆくほど  $e$  の減衰が速く、衝撃破壊が生じやすくなる。

(3) 衝撃破壊指数  $\beta$  には、タイルの弾性係数  $E_T$ 、タイルと張付けモルタルとのせん断付着強度  $B_S$ 、タイルの厚さ  $T_T$ 、張付けモルタルの弾性係数  $E_M$  が主に影響しており、重回帰式として次のように表わせる。

$$\beta = 0.3395 + 0.00891 E_T + 0.00170 B_S + 0.02667 T_T + 0.02592 E_M$$

これらの4つの説明変数の値を大きくするような材料・工法の選定を行なうことによって、耐衝撃性のタイル

張り床の構成が可能となる。

(4)衝撃によってタイルの割れがタイルの周辺まで広がる破壊段階において、圧着張り工法ではタイルの打抜き破壊が、またクリンカー張り工法では張付けモルタルの降伏破壊が生じる傾向がある。

(5)タイルの打抜き破壊や張付けモルタルの降伏破壊の生じ始める段階は、衝撃接触時間  $t_c$  の変曲点として捉えることができる。

(6)タイルの打抜き破壊や張付けモルタルの降伏破壊が生じる時点は、タイルに許容される破壊の限界と考えられる。この段階の破壊現象に対しては、タイルの厚さ  $T$  と張付けモルタルの弾性係数  $E_M$  が効いているといえる。

(7)強度的に弱い陶器質タイルでもタイルを厚くし、か

つ付着に対して有効に働く裏足を保有するタイルを採用し、圧着張り工法で張付けることによって、より耐衝撃性の床張りが得られる。しかし、陶器質タイルは耐摩耗性に劣るため、通行量の多い箇所への使用は避けるべきである。

鋼球を自然落下させる、モデル化した本衝撃試験の中で、はね返り係数および衝撃接触時間を測定することにより、張付けられたタイルの衝撃破壊性状を捉えることができた。また、これらを解析することにより耐衝撃性のタイル張り床を構成するための指針が得られた。

謝辞 本研究の遂行に当たっては、西田稔(現、進工業株式会社)、小坂輝明(現、関建工業株式会社)等の諸氏の協力を得た。ここに深く感謝いたします。

#### <参考文献>

- 1) 陶磁製タイル流通構造研究会：“陶磁製タイルの流通構造調査” 流通システム開発センター (昭和58年3月)
- 2) 浜田 稔：“建築材料学” 丸善 (昭和39年11月)
- 3) 床材料摩耗試験方法 (回転円盤による摩耗および打撃法) 作成委員会：“床材料の摩耗試験方法に関する 研究報告” 建材試験センター (昭昭43年7月)
- 4) J. M. Lifshitz & H. Kolsky: “Some Experiments on Anelastic Rebound” J. Mech. Phys. Solids, Vol. 12 (1964)
- 5) 熊谷敏男, 丸一俊雄：“床用陶磁器質タイルの張付工法とその衝撃破壊性状 (その1) はね返り係数について” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和50年10月)
- 6) 熊谷敏男, 丸一俊雄：“床用陶磁器質タイルの張付工法とその衝撃破壊性状 (その2) 衝撃接触時間について” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和51年11月)
- 7) S. P. Timoshenko & J. N. Goodier: “Theory of Elasticity” McGraw-Hill (1970)