荷重体としての物体の機械的荷重体への同定方法の提示

物体が与える動的荷重による架構式床の破損の評価方法に関する研究 (その1)

PRESENTATION OF THE SUBSTITUTION METHOD OF LOADS AFFECTED
BY PHYSICAL BODIES TO THAT OF MECHANICAL LOADING SYSTEMSStudy on the evaluation method of fracture of framed floors
under dynamic loads affected by physical bodies (Part 1)

小野 英哲*1, 高橋 宏樹*2, 井戸川 純子*3, 菊池 純子*4, 崔 寿 旻*5

*Hidenori ONO, Hiroki TAKAHASHI, Junko IDOGAWA,**Junko KIKUCHI and Soo Kyung CHOI*

The purpose of this study is to establish the evaluation method of the fracture of framed floors under dynamic loads affected by physical bodies.

First, we measured dynamic loads affected by rigid steel bodies, and showed relations between maximum loads and masses of rigid steel bodies under each condition (stiffness of framed floor and falling height).

Next, we measured dynamic loads affected by some physical bodies, and obtained each actual mass by means of the relation.

As a result, in this paper part 1, we presented the substitution method of loads affected by that of physical bodies to mechanical loading systems.

keywords: dynamic loads by physical bodies, substitution method, framed floors, fracture, evaluation method, mechanical loading system
物体が与える動的荷重, 同定方法, 架構式床, 破損, 評価方法, 機械的荷重体

1. 序

近年, 建築物床は, フリーアクセスフロアなどにみごとく架構式構造により構成されることが従来より多く, これらの床には, 施工性の向上, 自重の軽減などの観点で軽量化, 接合方法の簡易化などが強く望まれている。

一方, 軽量化, 接合方法の簡易化などを計る前提条件として所定の耐力の確保が必要不可欠となるため, より合理的な耐力設定が重要な課題となっている。

耐力設定の一つの指標となる架構式床(以降, 単に床と呼ぶ)の耐力判定方法に関して, これまで, 国内外で様々な提案がなされ, 我が国でも, JIS A^{1), 2)}などに, 静的荷重および動的荷重に対する耐力判定方法が定められている。

しかしながら, 動的荷重に対する耐力判定方法に関しては, 特に負荷される動的荷重に関し, 実際との関連が十分には吟味されていない, 破損の検出方法が定量的, 客観的でない, などの理由で, 様々な動的荷重に対する妥当な評価ができるとはいえず, 動的荷重に対する耐力不足による破損が発生したり, 逆に過剰な耐力をもつ不合理な床が開発されるなどの問題が解決されない状況にある。

動的荷重は大きく人間および物体により負荷されると考えられるが,

著者の一部らは, すでに人間が与える動的荷重による架構式床・壁の破損の評価方法に関して考究した結果を報告している^{3)~5)}。

本研究は, 物体が与える動的荷重による床の破損の評価方法を提示しようとするもので, 本論文はそのうち特に重要となる荷重体としての物体を機械的荷重体へ同定する方法および結果を述べるものである。

なお, 本論文の概要は平成9年度日本建築学会大会に発表済みである⁶⁾。

2. 本研究の目的と範囲

本研究の最終目的は, 物体が与える動的荷重による床の破損を定量的に評価できる方法を提示することにある。

このうち, 本論文では, 動的荷重を与える観点で複雑な様相をもつ様々な物体をより簡易な機械的荷重体へ同定する方法を検討することを目的とする。

なお, 同定された機械的荷重体を用いて床の破損を定量的に評価する方法に関しては次稿に発表する予定である。

また, 物体が与える動的荷重による床の破損の定量的評価に関する課題では, 荷重体あるいは荷重条件の設定が最も重要で, かつ, 国

*1 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

*2 東京工業大学工学部建築学科 助手・博士(工学)

*3 東京工業大学 大学院生・修士(工学)

*4 株式会社大林組(当時東京工業大学)

*5 建国大学校 非常勤講師・博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
Obayashi Corporation
Part-time Lecturer, Konkuk University, Dr. Eng.

内外においてこれまで、明確な筋道のもとに設定された例は皆無であることを付記する。

さらに、人間や物体による動的荷重を建築分野では一般に衝撃荷重としているが、著者の一部の研究^{3), 4), 6), 12)}において、衝撃の定義を利用できない小さな速度であることを明らかにしているため、本研究では既往の研究に関して論ずる場合以外は動的荷重と呼ぶこととする。

3. 既往の研究

床の耐衝撃性に関する既往の研究は、大きく、人間が与える動的荷重による場合と物体が与える動的荷重による場合に分けられる。このうち、人間が与える動的荷重による破損の評価方法に関しては、著者の一部の研究^{3)~5)}において、既往の研究をも含め詳述しているので、本論文では割愛する。

物体が与える動的荷重による床の破損に関連する研究はいくつかあるが、大きくは、物体の速度、相当質量を何らかの方法で求めている研究^{7)~10)}など、一定の衝撃負荷に対する床板の破損の観察¹¹⁾など、に分けられる。いずれも貴重な知見を提示しているが、物体による負荷と設定した荷重体あるいは荷重条件との近似性、さらには、破損の定量的検出方法に関しては、より厳密な検討が必要とされるがなされておらず、いまだ妥当な評価方法の提示までには至っていないといえる。

その他、床以外に物体の衝突による壁、ボード類の耐衝撃性を論じた研究や規格も数多くみられる。しかし、いずれも厳密にはその妥当性が検討されていない鋼製錘や砂袋による破損を取扱っているもので、材料や部材の品質管理の手法としては有効とも考えられるが、動的荷重による床の破損の定量的把握を目的とする本研究への適用には無理があるといえる。

4. 本研究における動的荷重の同定方法の骨子

4.1. 既往の研究におけるおもな方法

4.1.1 運動量保存則を適用する方法^{7)など}

物体(質量 m_1, m_2 , 衝突直前の速度 v_1, v_2 , 衝突直後の速度 v_1', v_2')が衝突するときには運動量が保存されるという(1)式に示す関係を用い、

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad \cdots \cdots (1)$$

両者の衝突前後の速度 v_1, v_2, v_1', v_2' を計測し、物体の相当質量 $m_1 = m_2(v_2 - v_2') / (v_1' - v_1)$ を求める同定方法であるが、2つの物体の反発係数や衝突時の変形量などを求めるのが困難なため、相当質量の絶対値を求めることは極めて困難といえる。

4.1.2 衝撃理論を適用する方法^{9), 9), 10)など}

速度 v の物体が衝突時に対象に与える最大荷重 F と作用時間 Δt の関係性を求め、運動量と力積が等しいという(2)式に示す関係を用い、

$$\int_0^{\Delta t} F dt = m v \quad \cdots \cdots (2)$$

物体の相当質量 m を求める同定方法である。しかし、現実には荷重 F を真の値として求めるのが非常に困難なこと、少なくとも本研究の範囲での Δt の値はいわゆる衝撃現象の場合と比較して極めて大きすぎるため衝撃理論から誘導される(2)式の適用が不適切なのが実証されていることから^{3), 4), 6), 12)}、本方法は適切ではないといえる。

4.1.3 与えられる荷重と近似する荷重を機械的荷重体により再現する方法^{3), 4), 12), 13)など}

4.1.1, 4.1.2, の場合のように理論的に仮説を立てて物体の相当質量などを求めるのではなく、物体により与えられる動的荷重と同等の動的荷重を具現するような機械的荷重体を一般には試行錯誤的に求める同定方法である。動的荷重は、物体さらには床側の特性により大きく変化するなど複雑な様相を呈するので、4.1.1, 4.1.2で述べたように論理的に求めることは困難なことから、本方法は近年よく用いられる方法である。

しかし、本方法はそれぞれの研究目的の範囲内での妥当性は確保される点で都合な方法ではあるが、同定される荷重体あるいは荷重条件の汎用性に関しては注意深く検討する必要がある。

4.2. 本研究における同定方法の基本的考え

4.2.1 本研究で対象とする動的荷重

床に破損を生じさせるような物体による動的荷重は、大きく、搬送車などによるもの、物体の衝突によるもの、に分けられる。

このうち、搬送車などによる過大な動的荷重が作用することがあらかじめ床の設計条件となる場合は非架構式床つまり相対的に剛な下地床からなる塗り床、張床とすることが多く、本研究で対象とする架構式床の破損が問題となるのは極めて稀なことから、搬送車などによる動的荷重は対象外とし、本研究では日常最も問題となる頻度の高い物体の衝突による動的荷重を対象にすることとした。

4.2.2 動的荷重を与える物体と同定する機械的荷重体との関係についての基本的考え

床に破損を発生させるような動的荷重を与える物体は、厳密にはある質量を持つ粘弾性体と見なすべきであるが、一般には人体などと比較して相対的に剛な物体といえるため床の破損に対する効果の観点からは、4.1に述べた既往の研究における考え方と同様に、本研究においても物体の場合と同等の大きさの動的荷重を床に与える相当の質量を持つ剛な物体を軸とする機械的荷重体として同定できるといえる。

つぎに、床の破損に対する効果として質量の他に、衝突速度、および荷重の作用時間、さらに接触部の形状、を考慮する必要がある。このうち、衝突速度に関しては、本研究において物体の実際の衝突速度をその都度同定する機械的荷重体の衝突速度として取り入れることで解決できることになる。

また、相対的に剛とみなせる物体の衝突によって生ずる荷重の作用時間は床側の動的挙動特性および衝突速度に大きく依存すると考えてよく、物体による差異は相対的に極めて少ないと考えてよい。すなわち、同定される機械的荷重体の衝突速度を物体の速度と同一にすることを前提とすれば、本研究において床の破損の観点では物体と機械的荷重体による作用時間の微小な差異を問題とする必要はないといえる。

さらに、床と接触する部分の物体の形状は床の破損に大きな影響を及ぼすが、床の破損の観点から最も不利な状況に同定すれば問題はないことから、本研究においては床と接触する部分を点接触とするよう同定される機械的荷重体の床との接触部(以降ヘッドと呼ぶ)の形状を球形とすることで解決できるといえる。

4.3. 本研究における同定方法の骨子

4.2に述べた基本的考え方に基づき設定した同定方法は基本的に4.1.3に述べた方法とするがその骨子は以下のとおりである。

・実情の床の剛性、質量などの力学的諸性状に近似した系を持つ荷

重測定装置を用い、球形ヘッドを具備した鋼製重錘(以降重錘と呼ぶ)を軸とする機械的荷重体を所定の高さからの自由落下により衝突させた時の最大荷重を求め、図1に示す実線の関係を求める。

- 次に、実際の物体を同一の高さからの自由落下により荷重測定装置に衝突させた時の最大荷重 P_{max} を測定し、図1を用いて、点線の経路で同等の最大荷重を発生させる重錘の質量つまり相当質量 m を求める。

なお、所定の高さからの自由落下としたのは本論文の段階における実験を簡易にするためであり所定の衝突速度と置き換えても何ら差し支わりがないことを付記する。

以上が物体による動的荷重を同等の動的荷重を発生させる機械的荷重体へ同定する方法の骨子である。

ここで留意すべき点は、物体あるいは機械的荷重体の衝突によって発生する動的荷重の諸性状は荷重測定装置の力学的諸性状および荷重検出方法に大きく依存するので、

- 荷重測定装置の剛性、質量等の力学的諸性状はできる限り実情の床に近似させること、
 - 同定は設計・試作する荷重測定装置を媒体として行うこと、つまり設計・試作する荷重測定装置は本研究においてのみ同定の媒体となり得るクローズドシステムであり、得られる最大荷重などの値を普遍性のある絶対値として理解しないこと、
- にある。

従来研究においては、ほぼ同様の方法で得られた動的荷重などの値を絶対的な値さらには一般性のある値として理解しているものが多いが、大きな誤りであり、設計した荷重測定装置の力学的諸性状および荷重検出方法の条件下での限定された値として理解すべきこと、ただし、同定される機械的荷重体は普遍性のある荷重体であること、を強調したい。

5. 重錘による動的荷重の測定

5.1. 荷重測定装置の概要

図2に設計・試作した荷重測定装置の概要を示す。本装置は設計許容荷重2000kgf(最大能力3000kgf)の動的荷重測定装置で、荷重受板、荷重変換器、梁および移設が可能なピン、基台で構成され、荷重受板の中央部分に重錘あるいは物体によって載荷された荷重は荷重受板に直結されている4つの荷重変換器によって動的に検出できるようになっている。

おもに梁の撓みで具現する荷重受板部分の剛性は床の剛性の差による動的荷重の差異を検討できるように下記のように実情の床の剛性の範囲を包含するように3種類とし、ピンで支持されるスパンで調節できるようになっている。

スパン 615mm 静的撓み剛性 $K_a = 1677\text{kgf/cm}$
 スパン 880mm 静的撓み剛性 $K_b = 700\text{kgf/cm}$
 スパン1080mm 静的撓み剛性 $K_c = 287\text{kgf/cm}$

*静的撓み剛性:直径70mmの載荷板による値

また、合板で構成される荷重受板の表面には5mm厚の鉄板を貼り

付けさらに3mm厚の塩化ビニルシートを貼付して実際の床の表面性状に近似させると同時に、重錘あるいは物体の衝突により、荷重受板の表面が破壊しないように工夫している。

なお、塩化ビニルシートは常に取り換えることにより荷重受板の力学的性状が変化しないようにしている。

また、重錘あるいは物体の衝突により挙動する荷重受板および梁の重量は、約25kg(スパン1080mmの場合)から約15kg(スパン615mmの場合)で実際の床の有効質量(載荷時に挙動する部分の質量)に近似した値としている。

図2 荷重測定装置の概要

5.2. 重錘および落下高さ

重錘は鋼製で図3に示すようにヘッド(曲率半径25mm)を持つ質量可変の機構をもつもの(鋼製プレートを増減することにより質量を増減する機構)で、電磁石の開閉により所定の高さから荷重受板中央部分に自由落下するものである。

重錘の質量と落下高さの組み合わせは実情の物体の落下を想定して表

図3 重錘の概要(2kgの例)

1のように設定した。なお、本論文の段階では同定方法の骨子を提示するもので、質量と落下高さの厳密な設定は実情を大きく逸脱しない範囲であれば不必要であることを付記する。

表1 重錘質量と落下高さの組み合わせ

重錘質量 (kg)	落下高さ (cm)					
	5	20	40	60	80	100
0.89	○	○	○	○	○	○
1.00	○	○	○	○	○	○
2.00	○	○	○	○	○	○
3.10	○	○	○	○	○	○
4.00	○	○	○	○	○	○
5.85	○	○	○			
11.40	○	○				

5.3. 測定経過および結果

荷重測定装置を用いて重錘による動的荷重を測定した。

実験概要を写真1に示す。

図4に動的荷重・時間曲線の例を示すが典型的な衝撃的波形を示しており、破損の観点から最も重要と考える荷重の最大値(最大荷重

写真1 実験状況

(重錘質量2kg, 落下高さ40cm, 荷重受板部分の剛性287kgf/cm)

図4 動的荷重・時間曲線の例

Pmaxと呼ぶ)も明確に読みとれる。

5.4. 最大荷重と重錘質量との関係

図5に荷重測定装置の剛性(Ki)ごとに最大荷重(Pmax)と重錘質量(m)の関係を示す。

今、荷重測定装置の力学系を剛性Kなる単純梁と見なした場合、質量Mの重錘の高さHからの衝突により発生する荷重Pは、エネルギーの等価交換の関係からごく単純には(3)式のように表せ、最大荷重Pと重錘質量の関係はKとHを一定とした場合指数関数的な関係になる。

$$P = \sqrt{2KM_gH} \quad \dots\dots (3)$$

図5を見ると、いずれの場合も最大荷重Pmaxと重錘質量mの関係は指数関数的な関係にあり、単純な理論から導かれる(3)式と同じ傾向になっているといえる。

また、Pmaxは荷重測定装置の剛性(Ka~Kc)、重錘質量および落下高さの増加とともに増大しており、(3)式で表される傾向と同じ傾向にあることがわかる。

なお、(3)式におけるPは重錘と梁との接触面で検出される荷重であり、本測定の場合は荷重受板の下端で検出される荷重で、本質的には異なる荷重といえるが、両者は比例関係にあると見なせることから、

H; 落下高さ(cm), 添数字は作用時間(ms)
点線は6.2においてCRTの相当質量を求めた経緯を示す。

図5 重錘質量と最大荷重の関係

定性的に考察する上では、PとPmaxを同義とみて問題はないことを付記する。

なお、重錘の質量および落下高さを同一としても検出される荷重の絶対値は荷重測定装置の剛性、挙動部の質量などの力学的特性により変化することが明確で4.3.で論じた留意点を実証しているといえる。

さらに、Pmaxの作用時間Δtはすべてを含めて0.73ms~1.12msの狭い範囲にあり、物体の場合の作用時間との近似性を検討した後明言すべきであるが、床の破損の観点では重要な要因として取り込む必

要性が少ないこと、つまり最大荷重 P_{max} のみを対象としてよいことも推察できる。

以上、様々な知見を得るとともに、4.3.に述べた方法で同定するために必要な最大荷重 P_{max} と重錘質量 m の関係を定量化できたといえる。

6. 物体による動的荷重の測定および相当質量の導出例

6.1. 物体および落下高さの設定および測定

床に動的荷重を与える物体および落下高さ(衝突速度)の組合せは無限にあるといえるが本論文では同定方法の骨子を提示するという観点から

- ・手近にあること
- ・衝突時の物体側のエネルギーの吸収に差を持たせること

に留意し代表例として表2に示す物体、落下高さおよび衝突状況を設定した。

なお、落下高さが物体により異なっているが、予備実験から、物体が破損する際は最大荷重 P_{max} は非常に小さくなるので、物体が破損しない範囲で測定可能な落下高さを各々設定したものである。

測定は5.と同様の方法で行い、最大荷重 P_{max} を求めた。

ここで最大荷重 P_{max} の作用時間を検討した所、すべてを含めた範囲が0.56ms~17.8msにあり、重錘の範囲0.73ms~1.12msと比較して、幅が広がっているが、動的荷重の効果の観点からは架構式床の固有振動数を考慮した共振応答などの有無の観点からみて問題とならない差異なので、動的荷重の効果は P_{max} のみで論じてよいといえる。

6.2. 相当質量の導出

求めた最大荷重 P_{max} を用い、図5を用いて相当する重錘質量つまり相当質量 m_e を求めた。

図5中に例としてCRTの相当質量を求めた経緯を点線で示す。

つぎに、物体の質量 m_0 に対する求めた相当質量 m_e の比、つまり相当質量比(m_e/m_0)を求めた。

7. 考察および同定方法の提示

図6に求めた相当質量比を荷重受板部分の剛性および落下高さとの関係として示す。

図からつぎのことが考察できる。

物体が破損しない範囲では物体の相当質量比は、落下高さつまり衝突速度、荷重受板部分の剛性つまり床の剛性、にかかわらず、物体ごとにほぼ一定の値となる。

物体が変形にくいほど(例えばセラミックタイル、ビール瓶など)、つまり衝突時のエネルギーの損失が少ないほど、相当質量比が大きい。

表2 物体、落下高さおよび床の衝突状況

	セラミックタイル	井	ビール瓶	本	椅子*1	椅子*2	CRT
質量 m (kg)	0.58	0.59	0.61	2.55	3.54	3.54	13.54
落下高さ H (cm)	Ka	100	100	100	20, 40, 60	20, 40, 60	80
	Kb	100	100	100	20, 40, 60	20, 40, 60	80
	Kc	100	100	100	20, 40, 60	20, 40, 60	80
衝突状況

図6 相当質量比と荷重受板部分の剛性および落下高さとの関係

以上の結果は本研究の範囲でいえることであるが、物体の設定において特徴的な物体を設定していることから、一般論として結論づけても大きな問題はないといえる。

また、以上の考察から今後の研究においては、特に過大な動的荷重を与える物体つまり質量の大きな物体を機械的荷重体に同定する場合図5の重錘質量と最大荷重の関係、さらには、物体による最大荷重は荷重測定装置の能力の範囲内つまり、非常に小さな衝突速度で同定して問題がないこと、さらに荷重測定装置の荷重受板部分の剛性はひとつで同定してよいこと、などの研究遂行上非常に有益な知見を得ることもできる。

以上の結果から、荷重体としての物体の機械的荷重体への同定方法をつぎのように提示する。

- 1) 対象とする物体を設計・試作した荷重測定装置に所定の条件で衝突させて最大荷重を求める。
- 2) あらかじめ求めた重錘による最

大荷重と重錘質量の関係に、求めた最大荷重を照合し、相当する重錘質量つまり相当質量を求める。

- 3) 求めた質量を持つ剛性重錘を軸とする荷重体を、対象とする物体の機械的荷重体とする。

なお、1), 2), 3)における衝突速度および荷重測定装置の荷重受板部分の剛性は各々1条件でよい。

- 4) 求めた機械的荷重体を用いて床へ動的荷重を負荷する場合の速度は実情を勘案しながらのその都度の課題とする。

8. 結

物体が与える動的荷重による架構式床の破損の評価方法を確立する重要性を述べるとともに、評価方法を確立するために必要不可欠となる、荷重体としての物体の機械的荷重体への同定方法を提示した。

また、本論文において、様々な場面で問題となる近似した動的荷重を取り扱う場合の留意点をも含めて強調したつもりである。

次稿では、様々な物体の同定資料を提示するとともに、破損を定量的に評価するための方法を提示する予定である。

なお、結びにあたり、論文作成に協力頂いた東京工業大学技官石澤砂月氏に感謝いたします。

<参考文献>

- 1) JIS A 6519「体育館用鋼製床下地鋼製材」
- 2) JIS A 1450「フリーアクセスフロア構成材試方法」
- 3) 小野英哲, 崔寿晃: 床・壁に人間が与える動的荷重の解析—人間が与える動的荷重による架構式床・壁の破損の評価方法に関する研究(その1)—, 日本建築学会構造系論文集 No.460, pp.27~35, 1995.4
- 4) 小野英哲, 崔寿晃: 人間の動的荷重による架構式床・壁の破損評価試験装置の設計・試作—人間が与える動的荷重による架構式床・壁の破損の評価方法に関する研究(その2)—, 日本建築学会構造系論文集 No.470, pp.19~28, 1995.4
- 5) 小野英哲, 崔寿晃, 井戸川純子: 架構式床・壁の破損評価試験装置の設計・試作, 破損判定方法および破損の評価方法の提示—人間が与える動的荷重による架構式床・壁の破損の評価方法に関する研究(その3)—, 日本建築学会構造系論文集 No.495, pp.15~20, 1997.5
- 6) 菊池純子, 小野英哲, 高橋宏樹: 物体による架構式床の対衝撃性能に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, pp.491~492, 1997.9
- 7) 宇野英隆, 吳謙治, 山本公也: 人間動作の衝撃力について, 日本建築学会論文報告集号外, 1967.10
- 8) 内田祥哉, 胡占星ほか: 床のかたさが人体に及ぼす影響について, 日本建築学会論文報告集号外, 1968
- 9) 内田祥哉, 宇野英隆, 吳謙治, 山本公也: Building Elementに加わる衝撃力とその耐衝撃性能(その1)—衝撃力の分析と被撃物の挙動—, 日本建築学会論文報告集 No.153, pp.49~58, 1968.11
- 10) 内田祥哉, 宇野英隆, 吳謙治, 山本公也: Building Elementに加わる衝撃力とその耐衝撃性能(その2)—建築の耐衝撃性能判定に対する提案—, 日本建築学会論文報告集 No.154, pp.1~8, 1968.12
- 11) J.Dubblin Mc Natt and Lawrence A.Soltis: 「Instrumented Impactor for Testing Wood-Base Floor Panels」, JOURNAL OF TESTING AND EVALUATION, JTEVA, vol.18 No.4, July 1990, pp.265 ~ pp.273
- 12) 小野英哲, 吉岡丹: 体育館の床の弾力性に関する研究(その2)—体育館の床の弾力性測定装置の設計・試作—, 日本建築学会論文報告集 No.187, pp.1~10, 1971.9
- 13) 小野英哲, 吉岡丹: 体育館の床の弾力性に関する研究(その1)—運動競技者が床に与える荷重の解析—, 日本建築学会論文報告集 No.181, pp.7~14, 1971.4

(1997年7月10日原稿受理, 1998年5月8日採用決定)