脆性材料を対象とした衝撃曲げ試験に関する研究

数値解析による検討 (モルタル試験体)

A STUDY ON THE IMPACT BENDING TEST FOR BRITTLE MATERIALS

—Numerical analysis of cement-mortar specimen—

松 藤 泰 典*, 大久保孝昭**

Yasunori MATSUFUJI and Takaaki OHKUBO

The purpose of this study is to establish the standardized testing method of the impact bending strength for brittle materials. We have proposed a testing method to measure the acceleration of the hammer. The basic properties of mortar specimens under impact bending load have been obtained by some experiments.

In this paper, it was analytically clarified that the testing method in this study was reasonable to evaluate the impact bending strength of specimens.

The behaviors of mortar specimens under impact bending load were calculated by FEM analysis that solved the two-dimensional wave equations. The acceleration curves measured in the experiments were used as input loadings for numerical analysis. The strains of the specimens calculated by FEM analysis coincided with the experimental results, so the acceleration of the hammer could be a value to express the magnitude of impact load to the specimen. Then it seemed that the mortar specimen cracked by tensile stress within the limits of the hammer velocity in this study because the calculated shearing stress of specimen was so small.

The strain of specimen increased in proportion to the magnitude of impulse when the period of impact loading was shorter than the period of first normal mode of specimen. So it was reasonable to express the impact strength of the specimen by physical unit of impulse.

In conclusion, it seems that the testing method and analytical method in this paper would be useful to evaluate the toughness of brittle materials under impulsive bending load.

Keywords : impulse, finite element analysis, impact bending test, brittle materials, acceleration

1. 序

本研究は材料学的な立場から、建築構造物を構成する各種脆性材料の耐衝撃性能の比較が可能な衝撃曲げ強さ試験法の確立を目的としたものである。

筆者らは、衝撃曲げ試験法として、単純支持状態のはり型試験体の中央に鋼製衝撃体を衝突させ、衝撃時の衝撃体の加速度を測定し、これを解析することによって試験体の耐衝撃性能を評価する方法を提案した。すなわち、まず模型試験体、次いでセメントモルタルおよびレンガ等の試験体を用いて、脆性材料の衝撃力に対する抵抗力の基礎的性状を実験的に検討し、本研究で提案する試験法が、各種材料の衝撃曲げ強さ比較できる衝撃試験法の一つであることを明らかにしている^{1)~3)}。

本研究はこれまでの研究に続くもので、衝撃力を受け

るモルタルはり型試験体を対象として、筆者らの提案する衝撃曲げ試験法・評価法の合理性および測定結果の意義を数値解析的に明確にすることを試みたものである。すなわち、衝撃試験法に関しては、測定対象である衝撃体の加速度波形が試験体の受ける衝撃力の大きさの経時変化を表す合理的な測定値であることを明かにし、次いで評価方法に関しては、衝撃力に対する試験体の抵抗力を構成する要因について検討し、それらを力積で表すことの妥当性を示している。

なお、衝撃力を受けるはり型試験体では一般に衝撃速度が速くなるにしたがって、貫通や中抜け⁴⁾などの破壊形式を示すようになるが、本研究における衝撃試験では、試験体が中央(衝撃点)で二分割されるような衝撃速度の範囲(約6 m/s以下)を対象としている。

本論文の一部を昭和63年度および平成元年度の大会学術講演梗概集で発表した。

* 九州大学 教授・工博

Professor of Kyushu University, Dr. Eng.

** 九州大学 助教授・工博

Associate Professor of Kyushu University, Dr. Eng.

2. 本研究で対象とする衝撃現象

1982年6月、西ベルリンのドイツ連邦材料試験所において開催された「衝撃荷重下のコンクリート構造物に関する RILEM, CEB, IABSE, IASS 合同シンポジウム」において、衝撃現象は「物体の衝突あるいは爆発により、短時間内にエネルギーの授受が行われ、慣性力あるいはその分布が構造物の挙動に重大な影響を及ぼすのみならず、各材料にはひずみあるいは応力速度効果が起こり、構造物の挙動をより複雑にする現象」と定義されている⁵⁾。

衝撃現象は上記の定義にもあるように一般に、かなり副広い範囲を対象として認識されている。

この点に関して図—2.1(a), (b) にモルタル試験体Ⅰ(次節、表—3.2 参照)に鋼製衝撃体を衝突させた場合、図—2.2(a), (b) に同試験体に空気を圧力伝達媒体とする衝撃力(急速な空気圧)を作用させた場合の荷重波形および試験体に生じるひずみ波形の一例をそれぞれ示した。衝撃体の衝突による荷重およびひずみ波形(図—2.1)は比較的単調な形状を示しているのに対して空気を圧力伝達媒体とする衝撃力を作用させた場合は、図—2.2に示すように荷重および試験体ひずみは複雑な経時変化を示している。この差は荷重の作用形態の影響によるものと考えられる。すなわち、空気を圧力伝達媒体とする衝撃力が作用する場合には、空気圧は試験体に疎密波の状態で衝撃力を与え、試験体は、試験体内の波動の伝播や固有周期特性の影響を受けて変形し、そのため試験体ひずみは複雑な波形を示す。これに対して鋼製衝撃体が衝突するような場合には、衝撃体が前に進もうとする力が

図—2.1 剛体衝突試験における荷重およびひずみ波形の一例 (モルタル試験体)

図—2.2 急速な空気圧を作用させた場合の荷重およびひずみ波形の一例 (モルタル試験体)

大きく、結果として図—2.1のような比較的単調なひずみの経時変化を示す。以上の結果は、衝撃力を受ける試験体挙動の一例であり、一義的に「衝撃現象」といっても衝撃荷重の種類によって試験体の挙動は異なるため、単一の衝撃試験法ですべての衝撃現象に対する衝撃荷重を表すことは困難である。

鋼製衝撃体を試験体に衝突させて衝撃荷重を与える本試験方法は、構造部材に対する固体の衝突を対象とした衝撃試験法の確立を目的としたものと位置づけられ、かつ本研究における「衝撃現象」とは図—2.1に示すような比較的単調な衝撃荷重を受ける場合である。

3. 数値解析方法

3.1 解析対象 (試験体)

本論文では、表—3.1、表—3.2に示す力学的性状および形状を有するモルタル試験体の衝撃曲げ耐力解析を行った。また、筆者らの提案する衝撃曲げ試験方法に基いて同試験体の衝撃試験も合わせて行った。

表—3.1において、圧縮強度および曲げ強度はそれぞれ

表—3.1 モルタル試験体の力学性状

圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	動弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
387	73.5	2.38	3.50

表—3.2 試験体形状および実験項目

試験体 記号	形状(cm) (幅×せい×長さ)	支持スパン (cm)	緩衝J厚 (mm)	衝撃体 (kg)
I	10×10×40	30	0	1,2,5,10
II	6×6×40	30	0,2,10,20	5

図—3.1 試験体

れ JIS A 1108 および JIS A 1106 に準じて算定した。また、動弾性係数は共鳴振動法（たわみ振動，JIS A 1127）により求めた。

試験体形状は，表—3.2 に示すように，10×10×40 cm（試験体Ⅰ）と 6×6×40 cm（試験体Ⅱ）の 2 種類とし，スパン 30 cm で単純支持したはり型試験体の中央に，幅全域にわたって衝撃体が衝突する場合を対象とする（図—3.1 参照）。

また，試験体のひびわれ発生時ひずみの速度効果に関する検討を行うため，試験体が衝撃力を受ける面に緩衝ゴムをてん付し試験体に生じるひずみ速度を制御した衝撃試験も行った。

3.2 解析方法

数値解析は，図—3.1 中の斜線部に示す断面について平面応力状態で二次元波動方程式を有限要素法で解く方法とした。

平面応力場の二次元波動方程式は次の偏微分方程式に支配される。

$$\frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \\ + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \\ \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \\ + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \\ \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_x \\ -P_y \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに， E ：弾性係数

ν ：ポアソン比

ρ ：比重

u_x, u_y ： x 方向， y 方向の変位

P_x, P_y ：外力

(1) 式を有限要素法による離散化を行い，マトリックス表示すれば次式が与えられる。

図—3.2 試験体の解析を行う断面

図—3.3 試験体Ⅰの領域分割

$$P(t) = Ku(t) + C\dot{u}(t) + M\ddot{u}(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに， M ：質量マトリックス

C ：減衰マトリックス

K ：剛性マトリックス

$u(t)$ ：節点変位ベクトル

$P(t)$ ：節点外力ベクトル

本研究では，衝撃力が作用し，試験体が破壊に至るまでのきわめて短い範囲を解析対象としていることから，(2) 式における減衰項 $C\dot{u}(t)$ は無視した。また，領域は三角形シンプレックス要素⁶⁾に分割して，剛性マトリックス K および分布質量型⁷⁾の質量マトリックス M を算定して解析を行った。なお，(2) 式の時間積分には Newmark- β 法を適用した。

ここで検討を行う試験体は，図—3.2 に示すように，衝撃力を受ける軸を中心として左右対称であるため，解析は試験体の半分について行うこととし，試験体Ⅰに関しては 91 節点，143 要素，試験体Ⅱは 69 節点，103 要素に分割して解析を行った。一例として，図—3.3 に試験体Ⅰの領域分割を示す。

3.3 入力荷重

衝撃力を受ける部材の挙動を解析的に求める場合，解析手法の開発とともに，入力荷重を設定することが大きな課題である。入力荷重を求める方法としては，金属材料，例えば歯車等の機械部品を対象とした数値解析では，入力荷重は，弾性接触論⁸⁾やホプキンソン棒法^{9), 10)}等の入力荷重算定法が提案されている。しかし，これらの方法は試験体に衝撃体が垂直に衝突する理想的な線衝突や

面衝突を仮定しており、機械の部品のように規則的な衝撃力を受ける場合には有効であるが、建築構造物に例えば落石が衝突するような場合には衝撃接触過程が複雑であり接触状態を仮定して解析を進めるこれらの方法は必ずしも有効な手段とはなり得ない。このような複雑な衝撃力を受ける建築部材の挙動を解析的に求め、部材耐力の検討を行うためには、入力荷重は衝撃接触過程を包括し、できる限り簡便かつ実用的な方法で設定することが望ましい。

本論文では、数値解析における荷重算定法として、筆者らの提案する衝撃試験における測定対象である衝撃体の加速度波形から入力荷重を算定する方法を採用した。衝撃体の加速度から衝撃荷重を求める方法は、J. Eibl¹¹⁾ も行っており、算定される最大荷重は弾性論から求められる荷重とほぼ一致することを示している。

すなわち、衝撃体を剛体と仮定し、衝撃時に生じる衝撃体加速度 $a(t)$ に衝撃体質量 M を乗じて荷重 $P(t)$ 算定した。すなわち $P(t)$ は次式で与えられる。

$$P(t) = Ma(t) \cdots \cdots (3)$$

(3) 式において、衝撃体の加速度 $a(t)$ は衝撃試験における測定値である。

衝撃試験は、鋼製衝撃体の衝突により試験体中央に衝撃力を与える水平パネ式衝撃試験機¹²⁾を用いて行った。衝撃体が試験体に衝撃力を与える方法は図-3.2 に示したとおりである。

なお、本研究における実験結果は、図-3.4 に示す装置・方法で測定したデータに基いている。

衝撃体は質量が 1 kg, 2 kg, 5 kg, および 10 kg の 4 種類を用い、衝撃体の加速度の経時変化はひずみゲージ式加速度計 (容量, 1 000 g; 応答周波数範囲, 0~20 kHz), 試験体の引張側縁ひずみは衝撃点真裏にてん付したワイヤーストレインゲージで測定した。また、ひびわれ発生時ひずみは、模式的に図-3.5 に示すひびわれ発生点およびその近傍のひずみゲージ波形から求めた。図中、実線がひびわれ発生点、点線がその近傍でのひずみゲージで測定された波形を示す。ひびわれ発生点のひずみは時間とともに 0 点から A 点まで増加し、A 点で急激に立ち上がり、B 点でゲージは破断する。ひびわれ発生点近傍のひずみ (点線) はひびわれ発生と同時にひずみが解放

図-3.5 ひびわれ発生点およびその近傍のひずみゲージ波形

図-3.6 衝撃体の加速度および荷重

されて減少し始める。この時期が、A 点と一致することから、本研究では図中の A 点をひびわれ時発生ひずみとした。

加速度計およびひずみゲージは動ひずみ計 (応答周波数範囲, 0~50 kHz) を介し、データレコーダ (同, 0~50 kHz) に接続した。データレコーダに記録したデータを一旦、FFT アナライザー (同, 0~100 kHz) に出力し、マイコンを介してフロッピーディスクに記憶させ、その後の解析に用いた。

なお、測定された衝撃体の加速度波形 $a(t)$ および (3) 式で算定される衝撃荷重 $P(t)$ の一例として、試験体 II に質量 5 kg の衝撃体を衝撃速度 2.3 m/s で衝突させた場合について、図-3.6 に示している。

4. 実験および数値解析結果

4.1 試験体に生じるひずみ

4.1.1 ひずみの経時変化と数値解析の精度

衝撃力を受けた試験体が破壊しないときの一例として、図-4.1 に試験体 I に質量 1 kg の衝撃体を衝撃速度 $V_0 = 1.92$ m/s で衝突させた場合、試験体の引張側最大縁ひずみの経時変化を示した。図中、実線は解析結果、点線は実験結果を示す。

衝撃力を受けた試験体のひずみが最初に立ち上がって

図-3.4 実験方法・装置の概要

図—4.1 試験体ひずみの経時変化 (試験体 I)

(a) 衝撃体質量 1kg, 衝撃速度 0.68m/s の場合

(b) 衝撃体質量 2kg, 衝撃速度 1.57m/s の場合

(c) 衝撃体質量 5kg, 衝撃速度 0.45m/s の場合

図—4.2 試験体の引張り最大縁ひずみの経時変化 (非破壊時; 試験体 I)

から 0 に戻るまでの範囲では、解析値は実験値の傾向をよく表している。その後、試験体が自由振動に移行するにしたがって、解析値は実験値よりかなり大きな値を示す結果となっており、先に述べたように、本解析手法が減衰項を無視していることによる影響が現れたものと解

図—4.3 試験体の引張側縁ひずみの分布 (試験体 I)

釈される。しかし、コンクリート、モルタル等は波動の減衰が大きく、本実験の範囲では衝撃後の自由振動の過程で試験体は破壊しないことを確認しており、試験体が衝撃体の 1 打撃で破壊するか否かを試験体の耐力判定の基準とした場合、最初にひずみが立ち上がってから 0 に戻るまでの範囲を検討対象として、減衰項 $C\dot{u}(t)$ を無視した本解析手法は、試験体のひずみの経時変化を精度よく求めることができるといえる。

図—4.2(a)~(c) に、試験体 I に種々の衝撃力を与えたとき、試験体の引張側最大縁ひずみの経時変化に関して、上記の検討対象範囲における解析結果と実験結果の例を示す。図—4.2(a) は衝撃体質量 1kg, 衝撃速度 0.68 m/s, 同図 (b) はそれぞれ 2kg, 1.57 m/s および同図 (c) はそれぞれ 5kg, 0.45 m/s の衝撃力を与えた場合を示したものである。図中、数値解析によるひずみの経時変化はひずみの最大値に関しては実験値と全く一致し、立ち上がり時間に関しては最大 5% 以内の誤差である。また、図—4.3 に、図—4.2(c) に示す衝撃力を与えたときの試験体引張側縁ひずみの分布を示した。図中、実線は解析値、点線は実験値を示し、数字は衝撃開始後の経過時間を表す。解析値、実験値ともに支持点から試験体中央に近づくにしたがって、ひずみの絶対値は大きくなり、立ち上がり時間は早くなる傾向を示している。衝撃開始 0.12 msec. では、試験体は局部曲げ変形のひずみ分布を示しており、既往の実験結果とも一致している²⁾。解析結果はひずみ分布に関しても実験値の傾向をよく表していることがわかる。

試験体 II の衝撃試験において、試験体が破壊されるとき、引張側最大縁ひずみの経時変化の例を図—4.4(a), (b) に示す。図中、一点鎖線は実験結果、実線は解析結果を示したものである。また、図中の「×」は実験において衝撃点真裏の試験体引張側にひびわれが生じたときのひずみを示す。解析値上の「▲」は、次節、図—4.6 に実線で示した本モルタル試験体のひびわれ発生時ひずみである。図—4.4 において、解析結果はひずみの

(a) 衝撃体質量 5 kg, 衝撃速度 1.35 m/s の場合

(b) 衝撃体質量 5 kg, 衝撃速度 2.30 m/s の場合

図—4.4 試験体の引張り最大縁ひずみの経時変化 (破壊時; 試験体Ⅱ)

立ち上がりからひびわれ発生に至るまで、実験値とよく一致している。その他、種々の衝撃力を与えた場合も、立ち上がり過程のひずみ波形に関しては、解析結果は実験結果をよく表すことを確認しており、加速度波形より算定した衝撃力を入力荷重とする数値解析は、衝撃曲げ荷重を受けるはり型試験体の挙動を精度良く求めることができると言える。

以上の結果より、本研究で提案する衝撃曲げ試験法において、衝撃体の加速度波形は、数値解析における入力荷重を簡便に算定できる都合の良い測定対象であり、加えて本試験方法が、試験体の受ける衝撃力の大きさの経時変化を測定できる合理的な試験法であることを示している。

4.1.2 ひびわれ発生時ひずみ

本研究における衝撃速度 V_0 の範囲 ($V_0 < 6$ m/s) では、試験体には衝撃点真裏の試験体引張側からひびわれが進行し、先の図—3.2 に示したように、試験体は中央で2分割される。

図—4.5 に、衝撃曲げ荷重を受ける試験体Ⅱの数値解析で得られた衝撃点真裏の試験体引張側最大縁応力およびせん断応力と衝撃速度の関係を示した。同図は、試験体Ⅱに 5 kg の衝撃体を種々の衝撃速度で衝突させる実験において衝撃開始後、衝撃点真裏の試験体引張側にひびわれが生じる時間における解析値を示したものである。なお図中、せん断応力は、解析された試験体の各点

図—4.5 試験体に生じる引張り応力とせん断応力 (解析結果)

図—4.6 ひびわれ発生時のひずみ—試験体Ⅱ (断面 6×6 cm) の場合—

の変位より (5) 式で算定されるせん断応力のうち、試験体の破断面内での最大値を示した。

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \quad (5)$$

ただし、 γ_{xy} はせん断ひずみ、 τ_{xy} はせん断応力を表す。同図において、試験体の引張側最大縁応力は衝撃速度によらずほぼ 100 kgf/cm² 程度の値を示し、せん断応力はモルタルのせん断強度よりかなり小さな値 (2~10 kgf/cm²) を示した。

したがって、本実験の範囲では、試験体の衝撃点真裏の引張側に最初に生じるひびわれは試験体材軸方向の引張応力によるものと推察される。

図—4.6 に本モルタル試験体Ⅱの衝撃試験を行ったとき、試験体裏側のひびわれ発生時の縁ひずみ ϵ_0 と荷重速度の関係を示す。荷重速度は、最大荷重 $M a_{\max}$ を加速度波形 $a(t)$ の立ち上がり時間で除して求め、緩衝材として試験体表面に貼付したゴム厚および衝撃速度によって変化させた。

図—4.6 において、 ϵ_0 は荷重速度が速くなるにした

図-4.7 モデル荷重

図-4.8 試験体のひずみと荷重周期の関係(解析結果)

がって増加する傾向を示している。図中、安全側をとって実線で示したひずみを各衝撃速度に対する本モルタル試験体のひびわれ発生時ひずみ $\epsilon_{\min}$ と仮定すれば、数値解析で算定される試験体のひずみ ϵ_c が $\epsilon_{\min}$ を越えた場合、試験体にはひびわれが発生するものと判断することができる。先の図-4.4(a), (b) において解析値上の「▲」はこのひびわれ発生時ひずみ $\epsilon_{\min}$ を示したものである。

4.1.3 力積と試験体のひずみ

一般に、衝撃現象においては、被衝撃体の変形、ひずみの大きさは力積の大きさに支配されると言われている¹³⁾。

一方、一質点系の振動解析においては、質点の変位が力積に比例する荷重周期・速度の範囲は限られていることが確認されており、衝撃現象においても同様のことが予想される。

本研究における衝撃荷重算定法では、力積は例えば図-3.6において、 $P(t)$ の積分值、すなわち荷重波形の面積で与えられる。以下、衝撃体の加速度波形から算定される衝撃荷重を簡便化した3角形モデル荷重を試験体に入力して数値解析を行い、力積と試験体に生じるひずみの関係について検討を行う。

数値解析として、最大荷重を一定とし、荷重周期を変化させたモデル荷重(図-4.7)を試験体Ⅰに入力した場合について、図-4.8に解析された試験体の引張側最大縁ひずみと荷重周期 T の関係を示す。図中、点線は

図-4.9 モデル荷重(力積一定)

図-4.10 試験体ひずみと荷重周波数(周期)の関係(解析結果)

試験体の一次固有周期 T_0 を示す。荷重周期 T が試験体の一次固有周期 T_0 よりも短い範囲(領域 a)では、ひずみは荷重周期、すなわち力積に比例して直線的に増加している。

荷重周期 T が T_0 よりも長い範囲(領域 b)ではひずみと力積の関係は上に凸の曲線で表され、 $T = \text{約 } 1.0 \text{ msec}$ で最大値を示し、 T がそれ以上長くなると力積が大きくなるにかかわらずひずみは減少する。さらに荷重周期 T を長くすると、ひずみの大きさは最大荷重に支配され、静的な解析値に収束しはじめる。すなわち、領域 b は衝撃現象から静的な現象へ移行する遷移領域と見なすことができる。なお、領域 a よりも荷重周期 T が短い領域では、ひずみと力積は厳密には比例関係を示さなくなる。この領域では試験体が高次の変形モードを示すようになり、各変形モードに対応する荷重周期の範囲においてのみ、ひずみと力積は比例関係を保ち、比例定数は各変形モードに対応してそれぞれ定まるものと推定される。

次に、最大荷重および荷重周期を変化させて、力積を一定 ($0.05 \text{ kgf} \cdot \text{s}$) としたモデル荷重(図-4.9)を試験体Ⅰに入力した場合の数値解析結果を図-4.10に示

図—4.11 荷重周期と衝撃速度の関係(試験体Ⅱ, 緩衝ゴムなし)

す。図中、荷重周波数 f は、 $f=1/T$ (T : 荷重周期) で算定した値、試験体のひずみは衝撃点直裏の試験体引張側最大縁ひずみを示したものである。また、点線は試験体の一次固有周波数 f_0 ($=1/T_0$) を示す。

荷重周波数 f が f_0 より小さな領域、すなわち荷重周期が試験体の固有周期よりも長い領域 b' (図—4.8 では領域 b に相当する) では、力積が一定であっても、試験体のひずみは荷重周波数 f が大きいほど増加している。すなわち、最大荷重が大きくなるほど試験体のひずみは増大する。

荷重周波数 f が試験体の一次固有周波数 f_0 よりも大きな領域 a' (荷重周期が試験体の固有周期よりも短い領域; 図—4.8 の領域 a に相当する) では、試験体のひずみはほぼ一定値を示している。すなわち、この領域では最大荷重の絶対値や荷重周期が異なっても、力積が一定であれば試験体のひずみは一定値を示すことが明かである。

以上の結果に関しては、測定される加速度波形に類似した正弦波モデル荷重を入力した場合も同様であり¹⁴⁾、試験体のひずみが力積に支配され、その絶対値に比例する範囲は、荷重周期が試験体の一次固有周期よりも短い衝撃力が作用する場合であるといえる。

図—4.11 に、試験体Ⅱ (緩衝ゴムてん付なし) を 5 kg の衝撃体で衝撃試験を行ったとき、試験体が破壊される場合の荷重周期 T と衝撃速度 V_0 の関係を示す。図中、点線は試験体の一次固有周期 T_0 を示す。

本実験の衝撃速度の範囲では、試験体が破壊されるとき、荷重周期 T は、試験体の固有周期 T_0 よりもわずかに短い範囲に集中していることがわかる。この荷重周期は、先の図—4.8 および図—4.10 における領域 a 、領域 a' の範囲、すなわち試験体に生じるひずみの大きさが力積の大きさに支配される領域に属する。

以上の解析結果は、筆者らの提案する衝撃試験において、試験体の衝撃力に対する抵抗力を力積 (運動量の単位) で表すことの合理性を示すものである。

図—4.12 試験体の衝撃曲げ耐力(試験体Ⅱ)

例えば、材料強度試験において試験体が静的な荷重を受ける場合には、試験体に生じるひずみあるいは応力が荷重 (力の単位) の大きさに支配され試験体の耐力が荷重の大きさを基に判断できることから、載荷荷重を測定対象とし、この結果から材料強度を求める。試験体が衝撃荷重を受ける場合も同様で、試験体に生じるひずみの大きさを支配する力積を測定対象とする衝撃試験方法は、本衝撃速度の範囲では材料の強度試験として試験体の耐力を表すのに合理的であると考えられる。

ただし、先の解析結果で示したように衝撃荷重が試験体の一次固有周期よりも長い場合には、試験体に生じる最大ひずみは、力積の大きさよりも最大荷重の方がより支配的であり、このような領域では静的な材料強度試験の評価法に準じて測定される加速度波形より求められる最大荷重 $Ma_{\max}$ から材料強度求めることができる。

4.2 試験体の衝撃曲げ耐力

先にも述べたように、筆者らは、これまで衝撃曲げ荷重を受けるはり型試験体の耐力 P を力積によって表示し、これを試験体の慣性抵抗力 F_I と衝撃曲げ強さ F_s と名付けた 2 つの要因に分けて検討する衝撃試験方法を提案し、種々検討を行ってきた^{1)~3)}。すなわち

$$P = F_I + F_s \dots\dots\dots (6)$$

P : 衝撃曲げ耐力

F_I : 慣性抵抗力

F_s : 衝撃曲げ強さ

(6) 式中、 P は衝撃体が試験体に接触し、破壊するまでに衝撃体が失う運動量で評価する方法とし、また、試験方法としての簡便化のため、慣性抵抗力 F_I は試験体の運動を剛体運動と仮定して算定する方法とした。

上記の方法で求めた、本モルタル試験体の衝撃曲げ耐力 P を図—4.12 に示した。既往の研究結果と同様に、荷重周期が試験体の固有周期より遅い衝撃速度に相当する衝撃速度 V_0 の範囲 (図中、領域 b') では、 P は V_0 が速くなるにしたがって減少し、それ以上の V_0 の範囲 (領域 a'') では、 P は V_0 が速くなるにしたがって大き

図—4.13 試験体の衝撃曲げ強さ（試験体Ⅱ）

くなる傾向を示している。

衝撃曲げ強さ F_s は、実験的には、図—4.12 の P から剛体運動と仮定した試験体の慣性抵抗力 F_l を差し引くことによって求められる。

また、(6) 式において力のつりあいを考えると、衝撃曲げ強さ F_s は支点反力の力積値に相当するものと考えられる。したがって、 F_s は解析的には、支点反力の力積を計算することによって算定される。

図—4.13 に、加速度波形がピークに達するまでの衝撃曲げ強さ F_s を示す。図中、点線は実験で求めた値、実線は解析によって算定した値を示している。

図からわかるように、実験から求めた F_s が解析値よりも大きな値を示している。これは、実験による慣性抵抗力が試験体の運動を剛体運動と仮定して算定していることによる影響と推察される。

図—4.13 に示すように、実験、解析のいずれの場合も、衝撃曲げ強さ F_s は、 V_0 が遅い範囲（領域 b'）では、 V_0 の増加にしたがって減少し、速い範囲（領域 a'）では、ほぼ一定値を示している。このように、実験で求められる衝撃曲げ強さは、解析による支点反力の力積とほぼ一致した傾向を示しており、これまで筆者らが提案してきた試験方法における衝撃曲げ強さ F_s は支点反力にも支配される値である。したがって衝撃曲げ強さ F_s は、実際の構造物では、例えばはり部材が衝撃力を受ける場合、柱頭に伝達される衝撃力に対応する。また、通常の静的な材料強度試験においては、載荷荷重は視点を変えれば試験体の支点反力を測定する方法でもあり、この意味では本衝撃試験で求められる衝撃強さ F_s は静的な試験で得られる測定値と等価性を有する範疇の指標であると言える。

5. 結 び

本研究は、脆性材料を対象とした衝撃曲げ試験方法の確立を目的としたものである。本論文ではモルタル試験体を用いて、筆者らの提案する衝撃曲げ試験法および評価法が材料の強さ試験として合理的な方法であることを数値解析的に明らかにした。ここで得られた主な知見は

以下のとおりである

(1) 数値解析は、有限要素法により波動方程式を解き、部材内部の応力、ひずみを算定する方法、入力荷重に関しては、衝撃体を剛体と仮定し、衝撃試験で測定された加速度波形より入力荷重を算定する方法とした。この方法で算定した試験体ひずみの経時変化は、試験体の破壊・非破壊のいずれの場合も実験結果とよく一致し、筆者らが提案した衝撃試験において測定対象とする衝撃体の加速度波形は試験体の受ける衝撃力の経時変化を表し得る合理的な測定値であることが明らかとなった。

(2) 本研究における衝撃速度の範囲 ($V_0 < 6 \text{ m/s}$) では、衝撃力を受けるはり型試験体に生じるせん断応力が試験体の衝撃点真裏の引張縁応力に比べてかなり小さいことから、試験体のひびわれ発生の有無は、引張側最大縁ひずみに基づいて判定できることがわかった。なお、このひびわれ発生時ひずみは衝撃荷重速度が速いほど大きくなることが明らかとなった。

(3) モデル荷重を入力して行った解析から、荷重周期が試験体の一次固有周期よりも短い場合には、力積の大きさが試験体に生じるひずみの大きさを支配することを明らかにした。本研究の衝撃速度の範囲では、はり型試験体が破壊される時の荷重周期は上記の範囲に集中し、試験体の衝撃力に対する抵抗力を力積で表すことの合理性を確認した。

以上本論文では、モルタル試験体を用いて、衝撃曲げ荷重を受ける単純支持はり部材の耐力判定法に関して種々検討を行ったが、筆者らがこれまで提案してきた。衝撃体の加速度を測定対象とする衝撃試験方法が合理的で汎用性のある方法であることが明らかとなった。

本研究は、佐治泰次先生（大分工業高等専門学校校長、九州大学名誉教授）の御指導のもとに行ってきたものである。また、実験、解析には小山智幸氏（九州大学助手）の協力を得た。末尾ながら合わせて謝意を表す。

参考文献

- 1) 佐治泰次, 松藤泰典, 大久保孝昭: 脆性材料を対象とした衝撃曲げ強さの評価法に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 358 号, pp. 10~21, 昭和 60 年 12 月
- 2) 佐治泰次, 松藤泰典, 大久保孝昭: 脆性材料の衝撃曲げ試験に関する基礎的研究—セメントモルタル試験体による場合—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 361 号, pp. 31~39, 昭和 61 年 3 月
- 3) 佐治泰次, 松藤泰典, 大久保孝昭: セメントモルタル試験体の衝撃曲げ強さの評価に関する考察, 九州大学工学集報第 58 巻 6 号, pp. 881~888, 昭和 60 年 12 月
- 4) 藤井 学, 宮本文穂: 衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動: コンクリート工学 Vol. 21, No. 9, pp. 25~36, 昭和 58 年 9 月
- 5) RILEM, CEB, IABSE, IASS Interassociation Symposium: Concrete structures under Impact and Impulsive

- Loading, Introductory report and Proceedings, Berlin (BAM), 1982
- 6) 川井忠彦著：応用有限要素法解析，丸善，pp. 63～69，1980
 - 7) I. E. Smith 著，戸川隼人訳：有限要素法のプログラミング，啓学出版，pp. 84～85，1984
 - 8) 戸部俊美，加藤正名：はりの横衝撃に関する研究，日本機械学会論文集（第 1 部）第 38 巻 315 号・pp. 2506～2513，昭和 47 年 10 月
 - 9) 田中吉之助，加賀爪俊秀：ホプキンソン棒を用いた鋼の低温衝撃曲げ試験，日本機械学会論文集（A 編）第 46 巻 403 号，pp. 302～310，昭和 55 年 3 月
 - 10) 河田幸三：固体の耐衝撃性とその新しい測定法：材料，第 36 巻，第 411 号，pp. 2～12，昭和 62 年 12 月
 - 11) J. Eibl, K. Block : Zur Beanspruchung Von Balken und stützen bei hartem Stoß, Bauringenieur 56 pp. 369～377, 1981
 - 12) 佐治泰治，松藤泰典，田口茂久：水平バネ式衝撃曲げ試験機の試作とこれによる基礎的実験研究，セメント技術年報，36，pp. 375～378，昭和 57 年 12 月
 - 13) 武藤 清：力積破壊の世界，建築学会大会論文集，pp. 246～251，昭和 16 年 4 月
 - 14) 松藤泰典ほか 3：衝撃曲げ荷重を受けるモルタルはり部材の耐力解析，（その 2）耐力判定，日本建築学会，学術講演梗概集 A，pp. 809～810，1989
- (1989 年 10 月 10 日原稿受理，1990 年 5 月 8 日採用決定)
-