

シート状圧電素子による衝撃力の面的測定法の開発

鈴木真次¹・石川信隆²・鳥場利郎³・古川浩平⁴

¹正会員 工修 防衛大学校研究員 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

²正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

³ダイキン工業(株)化学事業部マーケット開発部 (〒530 大阪府大阪市北区中崎西2-4-12)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

土石流の衝突に対する砂防構造物の耐衝撃設計において衝撃力の設定が重要であるが、その衝撃力を実際に測定した研究例はほとんどなく、最大衝撃力のみを測定したものか一例あるに過ぎない。そこで、本報告では衝撃力を直接測定するために、土石流を受ける砂防構造物に直接取り付けることが可能で、面的に衝撃力を測定できる衝撃力測定法の開発を試みた。すなわち、薄いシート状に加工した圧電素子を用いた衝撃力測定装置を開発し、ロードセルと加速度計を取り付けた重錘を3つの異なる条件下で衝突させ、得られた荷重～時間関係の比較検討よりその有効性を確認した。

Key Words: sheet piezoelectricity, impact force, collide, measurement system, debris flow, huge rock, check dam

1. 緒言

近年都市化が進み、山林による保水力や災害防止力が減少するとともに土石流による災害が大きな問題となっている。土石流とは、急勾配の溪流等から水が砂礫粒子を高密度に含有し流出してくる現象である。土石流は先端部に非常に多くの巨礫を集め(逆グレイディング現象¹⁾)、この部分が大きく盛り上がった段波として来襲するため人家や砂防構造物に大きな被害を与える。写真-1は土石流による被災後の砂防構造物周辺に残った巨礫であり、これらが3～10m/secで流下するものである。土石流については昔から目撃例があったが、その詳しい状況がわからない「幻の土石流」であった。1969年から建設省と京都大学防災研究所により土石流を写真撮影する観測が始まり土石流の流れの様子が良く知られるようになり、現在では土石流の発生や流下現象に関して多くの研究^{2), 3)}がなされている。また、砂防構造物に土石流が衝突した際の衝撃力に関して、模型実験等により巨礫の衝突に着目した研究⁴⁾と流体と仮定した研究⁵⁾がなされている。

しかしながら、実際に土石流が構造物に衝突した際の衝撃力の測定は、衝突が一般的に広い範囲にわたるため極めて困難である。そのため、従来最大衝撃力のみが計測できる圧痕計を用いた研究⁶⁾があるにすぎない。これは、図-1に示すように巨礫が衝突した際に鋼板に取り付けられたコーンが反対側のアルミ板に押し付けられた



写真-1 土石流の下流後の状況

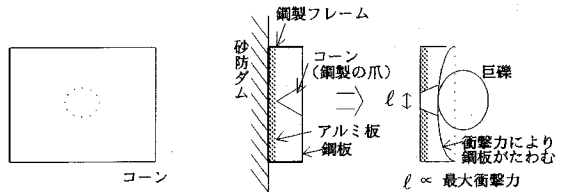
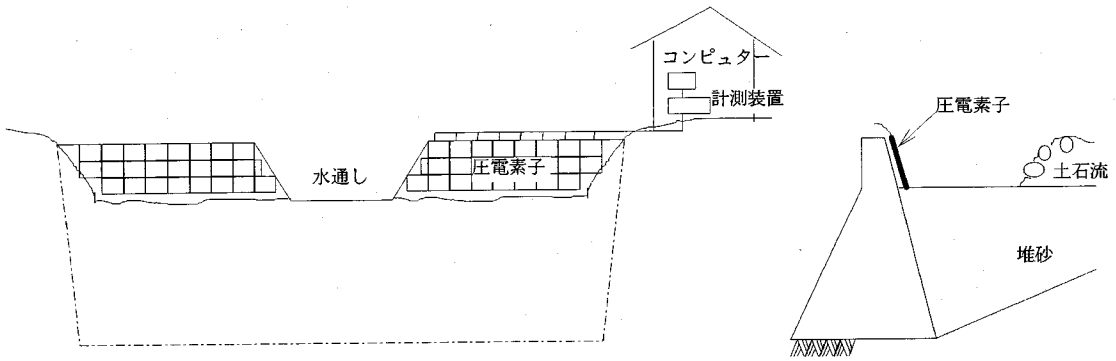
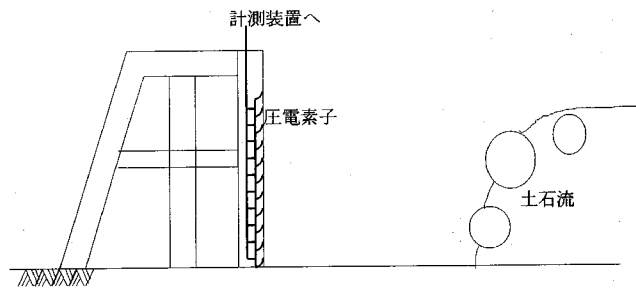


図-1 コーンによる最大衝撃力測定法

ときのアルミの傷の長さ $ℓ$ を被災後に測定することにより最大衝撃力 P_{max} を静的載荷における荷重 P ～傷の長さ $ℓ$ 関係より推定するものである。しかし、直接衝撃力を計測したものでないため、多くの誤差が含まれていると考えられる。加えて砂防ダムの耐衝撃設計を行うには、その最大衝撃力がどの程度かを知ることが大切であるが、その衝撃力の時間的変化や力積を知ることがさらに重要である。しかし、実際の土石流がどのような荷重～



(i) コンクリート製砂防ダム（上流側より） (ii) コンクリート製砂防ダム（側面より）
 (a) コンクリート製砂防ダム設置例



(b) 格子形鋼製砂防ダム設置例（側面より）
 図-2 土石流の衝撃力測定システム

表-1 土石流衝撃力測定に考えられる装置

計測装置	利点	欠点
圧痕計	• 取り扱いが簡単	• 荷重～時間関係を取れない(最大荷重のみ) • 構造物に取り付けた際に装置自体が緩衝効果をだす恐れがある。
ロードセル	• 荷重～時間関係を計測 • 精度が良い	• 広範囲の計測は設置個数が多くなり高価。 • ロードセルの端の部分に衝突する現象に不向き。
シート状圧電素子	• 荷重～時間関係を計測 • 広範囲の計測は比較的安価	• 精度の検証がなされていない。

時間関係となっているかについては未だ全く究明されていない。実際の土石流発生状況においては衝突側（土石流中の巨礫）に計測器を取り付けることは不可能であるため、被衝突側（砂防ダム）に取り付ける必要がある。衝撃力の時間的変化を測定するためには、表-1に示すように砂防ダムにロードセル（点で測定するため、）を設置することも考えられるが、土石流の衝撃力を測定するためには土石流が砂防ダムのどの部分に衝突するか分からないため広範囲に設置する必要があり、費用面の負担が大きければかりでなく、点での測定であるため、ロー

ドセルの端に衝突するような計測点正面からの衝突以外の衝突に対しての精度的な問題がある。

そこで本報告は、図-2に示すような実際の土石流衝突等の衝撃力を面的に計測するシステムを実現するために、シート状圧電素子による衝撃力測定法を開発しようとしたものである。すなわち、ロードセルよりも安価で簡単なうえ、面的に衝撃力を計測できるように圧電素子の端に衝突しても問題なく、また構造物にある程度の湾曲がある場合でも測定が可能であるような、シート状に加工した圧電材を利用した衝撃力測定法を開発し、その精度を実験的に検討するものである。具体的には、開発した計測装置であるシート状圧電素子に直接ロードセルを衝突させて、両者の示す値を比較することによりその実用性を確認し、その後にシート状圧電素子を用いた応用的な衝撃力測定法を示したものである。

2. シート状圧電素子の特性

(1) 圧電材の物性

圧電効果とは、物質が応力を受けてひずみが発生すると物質に誘電分極あるいは電界が発生する、もしくは逆に電界を加え分極を起こさせると物質にひずみが発生

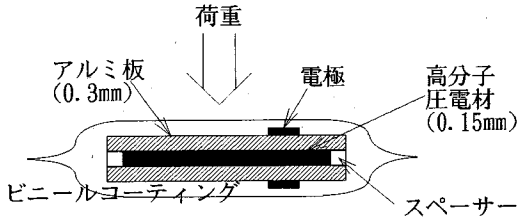


図-3 本研究で用いた圧電素子

する現象のことである。この圧電効果を用いた例は数多く、加速度計のセンサー部分等にも用いられている。

圧電効果は、圧電物質（結晶）に加わる応力、電界、結晶におこるひずみ、電気変位が相互に関係する効果であって、例えば応力、電気変位およびひずみの関係を示す圧電方程式（ g -形式）⁷⁾は3次元下で以下になる。

$$\mathbf{S} = \mathbf{sT} - \mathbf{g}'\mathbf{D} \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{S} ：ひずみマトリックス、 \mathbf{T} ：応力マトリックス、 \mathbf{D} ：電気変位マトリックス、 \mathbf{s} ：弾性コンプライアンス、 \mathbf{g} ：圧電定数マトリックス、 $'$ ：転置マトリックス。

ここで、フックの法則より、

$$\mathbf{T} = \mathbf{E}\mathbf{S} \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{E} ：弾性剛性マトリックス。

ここで、式(1)に式(2)を代入し変形すると次式になる。

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{g}'\mathbf{D}}{\mathbf{s} - \mathbf{E}^{-1}}$$

つまり、圧電素子の弾性コンプライアンス(\mathbf{s})、弾性剛性マトリックス(\mathbf{E})および圧電定数マトリックス(\mathbf{g})を一定とすると、電気変位 \mathbf{D} を測定することにより、応力 \mathbf{T} が計測されることになる。

(2)シート状圧電素子の特色と衝撃力測定の原理

まず、本開発において必要とした計測装置の特色を列挙する。

- ①コンクリートもしくは鋼版に取り付け、その際に構造物の緩衝材になるような大きなものにならない。
- ②面的に測定が可能である。
- ③衝撃力の時間履歴が計測可能である。
- ④ある程度の精度をもつ。

本開発で用いた圧電材は、以上の条件を満足するように開発したものである。すなわち、図-3に示すように高分子圧電体（フッ化ビニリデン-トリフルオロエチレンコーポリマー）をシート状(0.15mm)に加工し、電極としてのアルミ板(0.3mm)ではさんだものをビニールで絶縁コーティングしたものである（以下これをシート状圧電素子と呼ぶ）。ここで用いた圧電材料の諸元を表-2に示

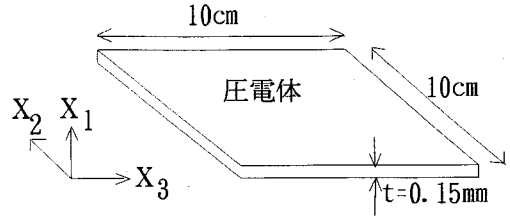


図-4 圧電体の形状

表-2 開発で用いた圧電材（フッ化ビニリデン-トリフルオロエチレンコーポリマー）の一般特性

特性			
密度	1.88g/cm ³	体積抵抗率	2.0×10 ¹⁶ Ω/cm
弾性率	3.0×10 ⁹ N/m ²	比誘電率	10at1kHz
耐熱温度	120°C	絶縁破壊電圧	150kV/cm
圧電定数			
d31	10.0pC/N	d33	-35.0pC/N
g31	0.11Vm/N	g33	-0.30Vm/N
k31	7.0%	kt	30%

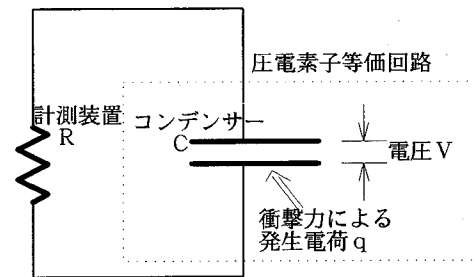


図-5 圧電素子の等価回路

す。

このように薄いシート状にしたうえ、 x_2 および x_3 方向に電導体（電極としてのアルミ板）があるため、図-4の x_2 および x_3 方向の電荷が無視され、 x_1 方向のシート状圧電素子の応力は、次のように発生電荷に比例する。

$$\sigma = Gq' \quad (3)$$

ただし、 σ ：応力(N/cm²)、 G ：シート状圧電素子の材料定数(N/C)、 q' ：単位面積あたりの発生電荷(C/cm²)。これを面積で積分すると、衝撃力 P は次のように算出される。

$$P = \sum_A \sigma = G \sum_A q' = Gq \quad (4)$$

ただし、 P ：衝撃力(N)、 q ：全発生電荷(C)(= $\sum_A q'$)。

一方、圧電材は表-2に示すように特定の比誘電率と電氣的絶縁性を持つため電極間でコンデンサーと等価となり、図-5に示すようなコンデンサーに対して衝撃力 P に比例して電荷が供給される等価回路とみなされる。ここで、電流が流れることによる電圧降下が起きない理想状態では、次のような関係が得られる。

$$V_R = q/C \quad (5)$$

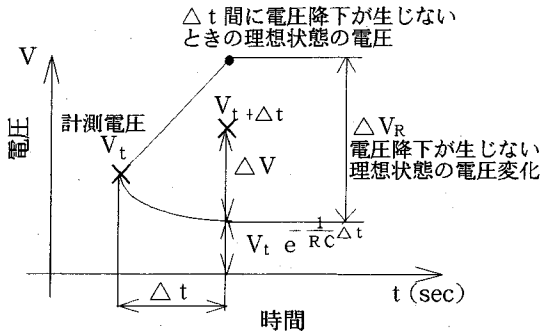


図-6 Δt間の電圧変化

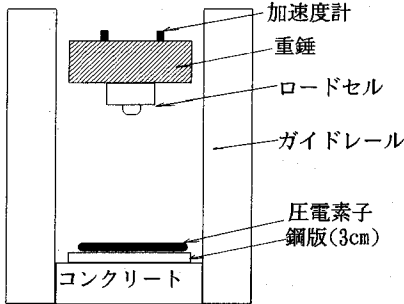


図-7 落錘式衝突実験

ただし、 V_R : 理想状態でのシート状圧電素子の電圧(V),
 C : 電気容量(F)
 よって、シート状圧電素子の衝撃力Pは次のように求められる。

$$P = G \cdot C \cdot V_R \quad (6)$$

さて、実際の計測においては図-5に示すように、計測装置(R)に電流が流れるため電圧が降下する。ここで、発生電荷がない状態で電圧降下したときの電圧は、次のように表される。

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

ただし、 V : 時刻 t における電圧(V), V_0 : $t = 0$ の電圧(V), R : 計測器による抵抗(Ω)

ここで用いたシート状圧電素子により測定した電圧は、測定装置への電流による電圧降下を含んでいるので、測定時間間隔 Δt の外力の変化を一定と考え、電圧降下の生じない理想状態の電圧変化 (ΔV_R) を図-6のように仮定すると、電圧降下する実際の測定における電圧変化 ΔV が次式のようになる。

$$\Delta V = \int_0^{\Delta t} \left(\frac{\Delta V_R}{\Delta V} \right) e^{-\frac{1}{RC}(\Delta t - t)} dt \quad (8)$$

これを解いて ΔV_R を求めると

$$\Delta V_R = \frac{\Delta V \cdot \Delta t}{RC \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \right)} \quad (9)$$

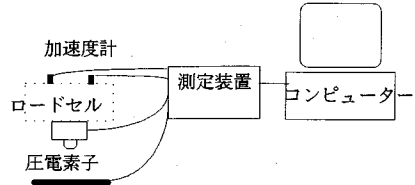


図-8 計測システム

表-3 実験ケース

ケース	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
重錘	518N	1031N	518N
鋼版	有り	有り	なし(コンクリートに衝突)
衝突速度	1.0 m/sec 1.5 m/sec 2.0 m/sec 2.5 m/sec	0.8 m/sec 1.0 m/sec 1.5 m/sec	0.8 m/sec 1.0 m/sec 1.5 m/sec 2.0 m/sec
実験回数	4 × 各2回	3 × 各2回	4 × 各2回

つまり、電圧降下を排除した補正電圧 V_R は次式により求められる。

$$V_R = \sum \Delta V_R \quad (10)$$

よって、式(10)を式(6)に代入すると任意の時刻 t における衝撃力Pが求まることになる。

3. シート状圧電素子による衝撃力測定実験

(1) 実験装置および測定項目

本実験では、図-7に示すように下部にロードセルを取り付けた重錘を、ガイドレールに沿って落下させ鋼版またはコンクリート上に取り付けられたシート状圧電素子 (10 cm × 10 cm) に衝突させた。その際、図-8に示すようにロードセルによる荷重、加速度計による加速度、シート状圧電素子の発生電圧を 10 μ sec 間隔で測定した。

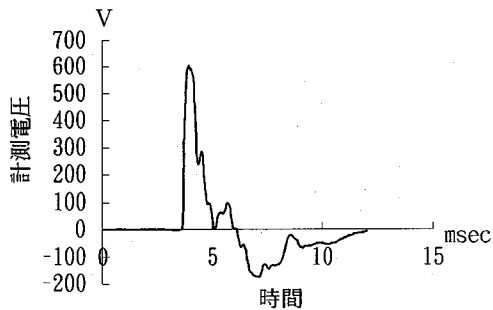
(2) 実験ケース

表-3に示すような3種類の衝突実験を行い、異なった荷重条件でどのような測定値が得られるかを検討した。なお、 C と G は一定で本実験で用いたシート状圧電素子は、 $C = 7.4 \times 10^{-9}$ F, $G = 30.4 \times 10^{10}$ N/Cである。

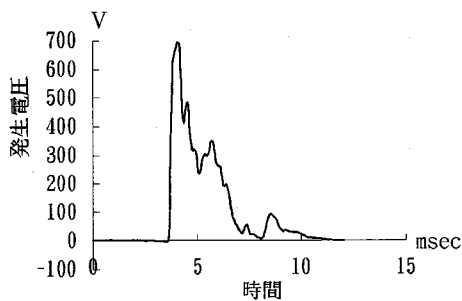
4. 実験結果および考察

(1) 荷重～時間関係

実験により得られたシート状圧電素子の測定電圧は、Aタイプの衝突速度1.0m/secでは図-9(a)に示すような時間履歴が得られる。そこで、式(9)および(10)に基づき補正を行なうと図-9(b)に示すような発生電圧が求まる。そこで式(6)により、この発生電圧を荷重に変換すると図-10に示すような荷重～時間関係が得られる。ここで、比較のためにロードセルおよび加速度計(加速度



(a)計測電圧～時間関係



(b)発生電圧～時間関係

図-9 圧電素子の電圧～時間関係

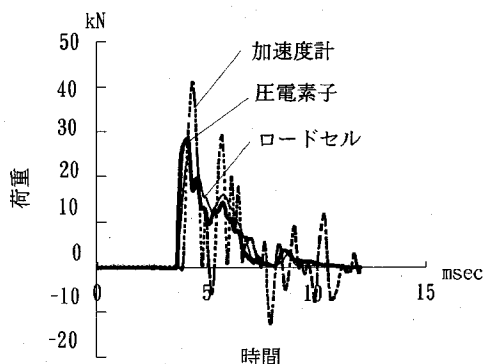


図-10 Aタイプ衝突速度 1.0m/sec の荷重～時間関係

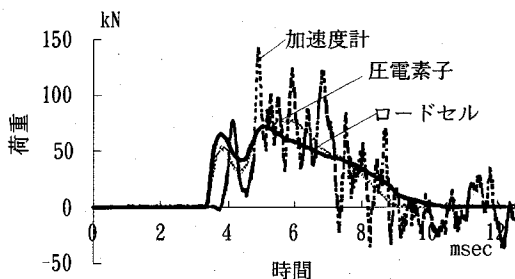
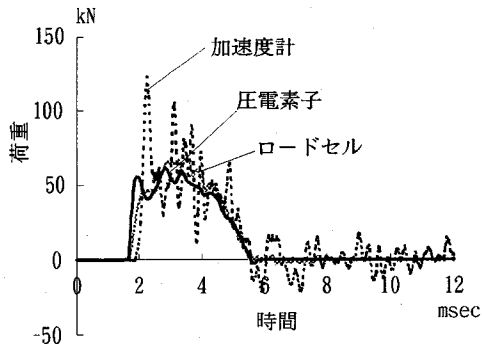
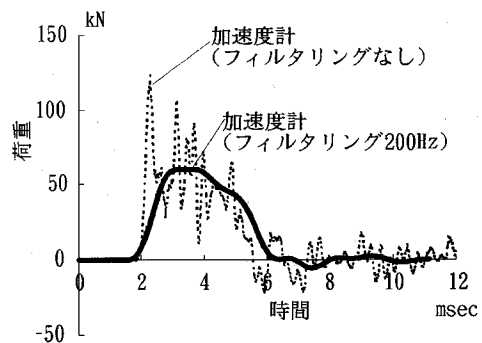


図-11 Bタイプ衝突速度 1.5m/sec の荷重～時間関係

×重錘の質量)からの荷重～時間関係を同時に示した。この図から、シート状圧電素子による測定荷重はロード



(a)各装置による荷重



(b)加速度計による荷重に対するフィルタリング

図-12 Cタイプ衝突速度 2.0m/sec の荷重～時間関係

表-4 衝突の力積と計測力積

実験ケース	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
重錘重量	518 N	1031 N	518 N
衝突速度	1.0m/sec	1.5m/sec	2.0m/sec
衝突体の力積	53.0N・sec	151.9N・sec	106.0N・sec
ロードセルによる力積	51.3N・sec	159.6N・sec	103.4N・sec
圧電素子による力積	50.6N・sec	165.6N・sec	98.6N・sec

セルと同様な時間変化を示していることがわかる。また、同様の傾向を示し、シート状圧電素子が衝撃力測定に有効であることが認められる。つまり、シート状圧電素子図-11, 12(a)にBタイプの衝突速度1.5m/secとCタイプの衝突速度2.0m/secの場合を示す。他のタイプにおいても取り付け部分の剛性にかかわらずロードセルと同様な荷重～時間関係が得られることが確認された。一方、加速度計による荷重は重錘内部の内部振動等の影響で大きな高周波成分がのっているが、このような高周波成分はシート状圧電素子による荷重およびロードセルの荷重には見られなかった。加速度計による荷重もフィルタリング⁸⁾により、図-12(b)に示すようにロードセルおよびシート状圧電素子とはほぼ同様な荷重～時間関係を示すことがわかる。よって、シート状圧電素子による衝

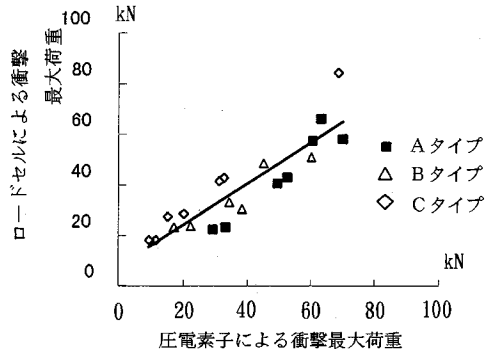


図-13 各ケースにおけるロードセルおよび圧電素子の最大荷重

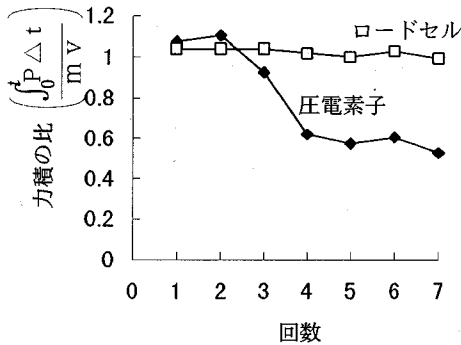


図-14 繰り返し载荷における計測力積の変化

撃力測定は精度上十分であると思われる。

(2)力積

図-10, 11, 12に示した荷重～時間関係を積分 ($\int_0^{t_{end}} F dt$, F : 荷重) した力積と、衝突前に重錘が持っていた力積 (mv) とを比較してみた。その結果、表-4に示すように良い一致が見られ、シート状圧電素子による衝撃力測定法はある程度信頼性のあるものと考えられる。

(3)ロードセルによる荷重との相関

また、図-13に各実験のロードセルとシート状圧電素子の示す最大荷重の相関関係を示したが、衝突実験における最大荷重の計測結果はばらつきやすいことを考慮しても、相関係数0.88となり、シート状圧電素子による衝撃力の計測は、本実験範囲内では十分有効であることを確認できた。ここで、Aタイプは下側、Cタイプは上側に若干偏っている。これは、図-10, 11, 12(a)に見られるように圧電素子とロードセルの荷重ピーク値の取り方 (Aタイプは荷重の山の前半のピーク値、Bタイプは荷重の山の前半部分、Cタイプは荷重の山の中央

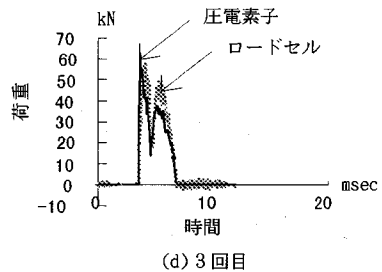
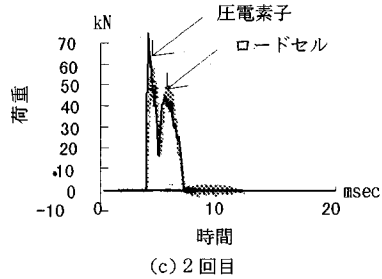
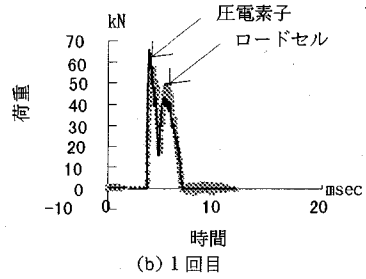


図-15 繰り返し载荷による測定された荷重～時間関係

部分) により上記のような差が出たものと思われる。

(4)シート状圧電素子の能力

a)計測最大圧力

本実験では、表-3に記した実験ケースよりも速いスピードで衝突した実験も実施したが、シート状圧電素子 (電極としてのアルミ板部分) が破損して短絡し、計測結果が得られなかったため実験ケースからは排除した。しかし、表-3に示したケースではすべて測定が可能であった。その限度は最大荷重で約90kN前後であり、確実にシート状圧電素子の電圧が測定できた70kNを上限としても衝撃載荷面積で割ると約22kN/cm² (シート状圧電素子の換算応力) の計測能力があることを確認できた。ここで、実際に巨礫の最大衝撃力を測定した水山ら⁶⁾の研究によるとコンクリート強度を2.0kN/cm²として衝撃力を推定していることを考えると、コンクリート構造物に直接取り付けられる場合には十分の測定能力と考えられる。

b)繰り返し载荷

载荷によるシート状圧電素子の劣化 (高分子圧電体の

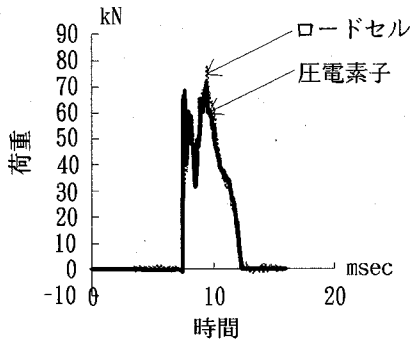


図-16 電極を真ちゅうにした場合の荷重～時間関係

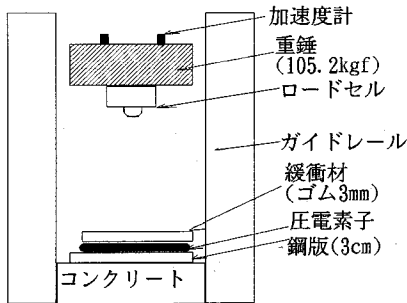


図-17 落錘式衝突実験

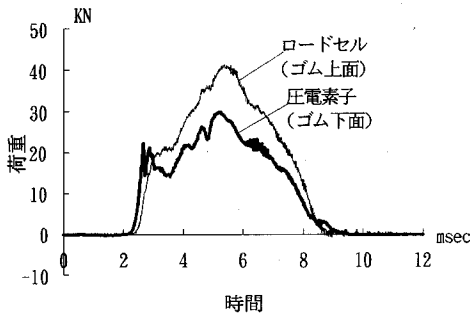


図-18 緩衝材としてゴムを用いた際の緩衝効果

繊維が破壊するための圧電性の低下)を確認するため、繰り返し载荷をAタイプで速度2.0m/secで行った。この実験ケースでの衝突荷重はa)で明らかにした最大荷重の約70%の値で、確実に計測出来ると考えられる上限の荷重である。実験では、同じ载荷部分に载荷を行った。実験結果を図-14および15に示す。図-14より確実に計測可能な能力のほぼ上限程度の最大荷重でも3回の実験までほぼ良い精度で計測ができた。つまり、仮に土石流の巨礫が同じ個所に衝突しても数回までの衝突であれば、その衝撃力の計測が可能なが分かった。また、図-15より、3回目までの衝撃力～時間関係はロードセルと極めて良い一致を得ることが判明した。

c) 電極材質による変化

a)で示したように、本研究では電極としてのアルミ板

が破壊するかどうか、本シート状圧電素子の性能を決定する。そのため、ここでは、材質をアルミ板から真ちゅう(0.3mm)に変更してBタイプの条件で衝突速度2.0m/secの計測を行った。この条件下では図-16に示すように、より大きな荷重であっても破れることなく測定でき、かつロードセルと良い一致を得た。つまり、本報告で用いたシート状圧電素子の電極はアルミ板であるが、このシート状圧電素子の性質上真ちゅう等(アルミよりも剛性の高い通電性の金属)の材質も使用可能なため、それらの材質を用いることにより計測能力を上げることができる。また、その電極は基本的に湾曲していても電気容量さえ計測できれば使用可能なため、曲面(鋼管等)に対しても設置が可能となる。すなわち、平面でも曲面でも衝撃力を面で測定できるとともに、ロードセルと比べ安価になる。これらの計測でどのような電極板を用いるのが最適であるのか現在試作中である。

5. シート状圧電素子の応用例

シート状圧電素子による測定法の応用例として、ゴム板の緩衝効果の評価を試みた。すなわち、図-17に示すようにBタイプの実験条件下で3mmのゴムシートをシート状圧電素子に被せて設置し、ゴム板の緩衝効果を検証した。図-11と同様の衝突速度で得られた荷重～時間関係を図-18に示す。ロードセルを直接衝突させたときにはほぼ同一な荷重～時間を示したが、ゴム板を間に挟むことによりここに示すように最大荷重が約3/4に減少することが分かった。その際ゴム板自体は破断した。このように、緩衝材の下にシート状圧電素子を敷くことにより、従来計測が難しかった緩衝材が構造物に伝える衝撃力を測定することが可能であることを確認できた。

6. 結論

本報告の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 衝撃力測定法の一つとしてシート状に加工した圧電材を用いた装置を開発することができた。
- (2) 模型衝突実験により、シート状圧電素子を用いて、衝撃力を測定することが可能であることを確認できた。
- (3) シート状圧電素子の衝撃実験に対し、本研究で用いた電圧降下の補正方法が適正であることを確認できた。
- (4) このシート状圧電素子による測定法は、衝撃力を面で測定できるため、土石流のような衝撃力測定に有用であると思われる。
- (5) シート状圧電素子を用いて、緩衝材が構造物に伝える衝撃力を直接測定することが可能であることを確

認した。

また、砂防構造物の実際の土石流の衝突衝撃力の測定における今後の課題としての問題点を列挙すると、

(1) より耐衝撃性のよい電極板および圧電材を検討するとともに、実際に近い実物実験を実施しその適用性を確認

(2) 現在の装置では電氣的絶縁を保つためビニールコーティングをしているが、土石流の衝突に際してのその水密性の検討。

(3) 土石流衝突時におけるケーブルの保護方法などが挙げられる。現在これらの問題点の解明に尽力しており、結果が出次第報告したいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたりご援助頂いた八千代エンジニアリング(株)水工部長下田義文氏に対し謝意を表します。

参考文献

1) 橋本晴行, 椿東一郎: 土石流における逆グレイディング機

構, 土木学会論文報告集, 第336号, pp. 75-84, 1983. 8.

2) 高橋保, 水山高久: 講座土砂災害の予知と対策5. 土石流(その1), 土と基礎, 32-3, pp. 59-66, 1984. 3.

3) 渡辺正幸, 中山政一: 講座土砂災害の予知と対策5. 土石流(その2), 土と基礎, 32-4, pp. 61-42, 1984. 4.

4) 下田義文, 水山高久, 石川信隆, 古川浩平: 巨礫を受けるコンクリート製砂防ダム袖部の衝撃模型実験と被災例シミュレーション, 土木学会論文集, No. 450/I-20, pp. 131-140, 1992. 7.

5) 土木学会: 構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法, pp. 263-270, 1994. 1.

6) 水山高久: 砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点, 新砂防, Vol. 112, pp. 40-43, 1979年6月.

7) 田中哲朗, 岡崎清, 一ノ瀬昇: 圧電セラミック材料, 学術社, pp. 11-16, 1973. 12.

8) 小暮幹太, 佐々木晃, 大野友則: 衝撃実験における計測データのフィルター処理, 第49回年次学術講演会講演概要集, pp. 1586-1587, 1994. 9.

(1996. 4. 22 受付)

A DEVELOPMENT OF SURFACE MEASUREMENT METHOD OF IMPACT FORCE

USING THE SHEET PIEZOELECTRICITY

Shinji SUZUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Toshiro TOBA

and Kohei FURUKAWA

This paper presents a development of surface measurement method of impact force using a sheet piezoelectricity under the debris flow. This system is used for setting directly to check dam and measured at area. Impact tests were executed for the three types of condition at measuring impact force using sheet piezoelectricity, load-cell and measure of acceleration. It was found from the load-time curves at three equipments that sheet piezoelectricity is made good use of surface measuring of impact force.