

圧電フィルムを用いたひずみセンサーの地震応力計への適応性

Applicability of Strain Sensor using Piezoelectric Polymer Film to a Seismic Stress Measurement

園田恵一郎*, 石丸和宏**, 岩田節雄***, 納谷健一****

Keiichiro SONODA, Kazuhiro ISHIMARU, Setuo IWATA, Ken-ichi NAYA

*工博 大阪工業大学教授, 八幡工学実験場 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一の谷4番地)

**工博 明石高専助教授, 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

***日立造船(株), 技術研究センター (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

****シグマ・ガル(株), 大阪事業所 (〒545-0011 大阪市阿倍野区昭和町1-3-28)

This paper presents experimental studies on availability of a piezoelectric polymer film sensor to measure the strain of structures. In this study, both of impact test for a concrete mortal rod and explosion test for a model bridge pier were conducted to specimens bonded with polymer film sensor and wire strain gauge at the same position. As a result, the electric charge of this sensor was approximately proportional to strain measured by wire strain gauge and its applicability was found.

KEY WORDS : polymer film, piezoelectric, sensor, strain, gauge

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により多くの人命が失われ、土木・建築構造物なども甚大な被害を受けた。この地震は大都市部で起きた直下型地震であったが、地震計のデータは最大鉛直加速度は神戸海洋気象台で水平 818gal、鉛直 332gal であり、従来の海洋型地震と同様に鉛直加速度は水平加速度の 1/2 程度であった。しかしながら、被害を受けた構造物の中には従来の地震では見られなかった、衝撃的な鉛直力を受けたと思われる破壊形式を示すものが確認されている^{*)}。また被災者の証言の中には「ドンと突き上げられた」などの突き上げの体験談^{**)}があり、これらは上下方向の衝撃的な力が働いたのではないかと考えられる。発表された加速度の記録と被災者の証言との違いの原因は、地震初期の衝撃的上下動の高周波成分が地震計の周波数特性を超えた範囲であることやローパスフィルターにより高周波成分が消失したなどの理由が考えられる。また、跳躍現象を再現した実験、実構造物で見られた破壊形式を再現した衝撃実験^{**)}および解析^{**)}では非常に短い衝撃力が作用するため、地震計では感知できないことがわかり、実際の構造物にも同様な鉛直方向の衝撃力の存在が推測される。

実構造物が地震時に受ける力は地盤と構造物の接触条件が大いに関係し、構造物が受けた力を計測するためには直接応力またはひずみを計測し、地震時の構造物の応

力特性をつかむことが望ましいと思われる。しかしながら、構造物の応力特性の計測には、ひずみゲージがもっとも一般的であるが、従来の地震計と同様に長期間計測するには安定性に不安な面が多く、また遠隔地に設置する場合には電源の問題、小型化の面で改良の余地があるように思われる。

本研究ではひずみゲージの代わりに、圧電素子を用いたフィルムをひずみ計として利用するセンサーの開発を行うことを目的とする。まず、圧電フィルムの特性を調べるためにモルタル柱にひずみゲージと圧電フィルムを貼り付け、衝撃を与える実験でセンサーの基礎データを得る。次に RC 高架橋橋脚モデルを取り扱い、その底面で人工地震を発生させ、その際に受ける構造物の力を計測するとともに圧電フィルムの特性を調べる。

2. ピエゾフィルムセンサー

圧電材料は応力あるいはひずみがかわると分極を生じる性質を持ち、力学的エネルギーを電氣的エネルギーへと変換するものである。この性質を有する材料は天然材料では電気石、水晶などであり、その他の材料としてはセラミック圧電材料と高分子圧電材料がある。その高分子圧電材料の中でポリフッ化ビニリデン(PVDF)は顕著な圧電性を有する高分子圧電材料の代表的なものの一つである。PVDF の圧電性はその結晶構造によって大きく変

化するため、圧電材料として用いるときは、大きな圧電性を有するβ形結晶を得るために延伸、分極処理がなされ、以下の特徴を有する。

- ・誘電率が無機圧電体に比べて小さいため、高い圧電電圧感度を示す。
- ・軽量かつ柔軟であるため、衝撃や屈曲によく耐える。
- ・音響インピーダンスが小さいため、水や生体とよくマッチングがとれる。
- ・Q 値(共振の鋭さ)が小さいため、広範囲の周波数に応答する。
- ・耐電圧が大きく、大入力に耐えられる。
- ・誘電率と比熱が小さいため、高い焦電電圧感度(高性能指数)を示す。
- ・熱拡散係数が無機圧電体に比べて小さいために空間分散能に優れている。

本研究ではひずみ計測時にひずみ状態を乱すことなく測定するために、軽量、柔軟性に富み、加工性がよいポリフッ化ビニリデン(PVDF)を取り扱う。実験において用いるセンサーは独自に作成したもので、圧電フィルム、銅板、リン青銅板からなり、圧電フィルムは呉羽化学工業(株)が開発したポリフッ化ビニリデン(PVDF)の一軸延伸分極フィルム(KF ピエゾフィルムと呼ばれる)である。図1に示すセンサーの厚みは40 から 80 ミクロンの KF ピエゾフィルムを 0.1mm 厚の 2 枚のリン青銅板の間に蒸着したもので、延伸方向にひずみを受け取るとリン青銅板の間に電極が発生(分極)し、力学的エネルギーを電気エネルギー(圧電性)に変換する機能を持っている。写真1に使用したピエゾフィルムセンサーを示す。

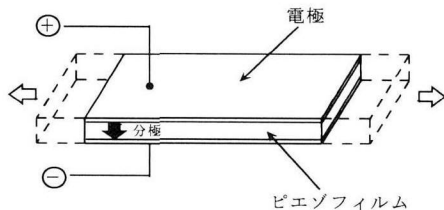


図1 ピエゾフィルム

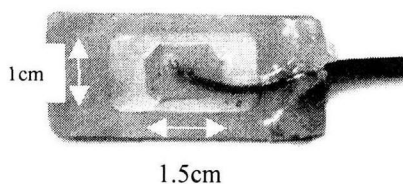


写真1 ピエゾフィルムセンサー

3. 衝撃実験

3.1 実験概略

本研究ではモルタル柱を打撃する実験と RC 高架橋橋脚モデルを用いた人工地震実験を行った。まずモルタル柱にひずみゲージとピエゾフィルムセンサー(以下ピエゾセンサーと呼ぶ)を隣接するように貼り付け、モルタル柱をコンクリート床にたて、その端部をハンマーで打撃することで衝撃力を与え、ピエゾセンサーの衝撃応答性を検証した。次に人工地震を発生させ、その際の計測状況を検証した。

3.2 ひずみ計測装置

ピエゾセンサーの出力はチャージアンプ、ひずみゲージは直流型動ひずみ計を通して、ともにデジタルデータレコーダに接続し、記録した。

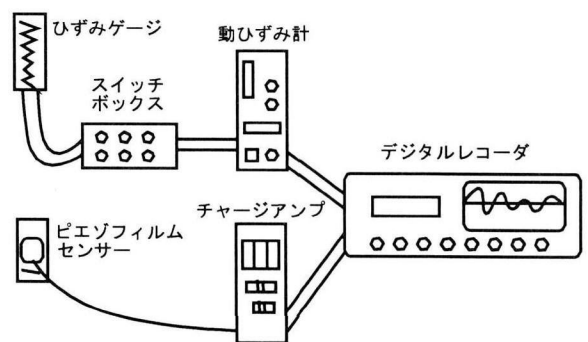


図2 両ひずみ計の計測システム

3.3 モルタル柱打撃実験

作成したモルタル柱は直径 86mm、長さ 1m であり、モルタル内部には鉄筋のかわりとして真鍮の寸切り 4 本を入れた(参照図3)。またモルタルを直接打撃しないように

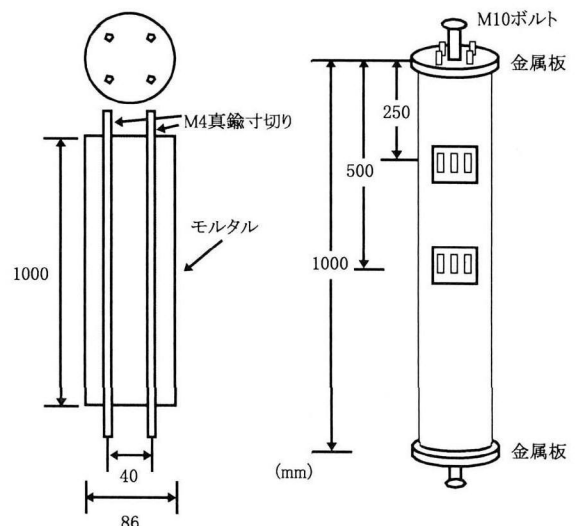


図3 モルタル柱供試体

端部には鉄板を貼り付け、寸切りとボルトで結合した。モルタル柱にひずみゲージ2種類(5mm, 60mm 長ゲージ)とピエゾセンサーの合計3種類を端部より 25cm と 50cm の位置に並べてモルタルに直接貼り付けた。計測では衝撃の波動をとらえるためにサンプリング周波数はデータレコーダの最大である 200kHz とした。

図4に供試体端部を打撃した際のひずみ応答図を示す。ローパスフィルターは動ひずみ計では 30kHz, チャージアンプはフィルターをかけずに計測を行った。(a)はひずみゲージ長 5mm, (b)は 60mm, (c)はピエゾセンサーの応答である。図において大きな応答の変動は打撃による応力波の到達を表している。一般に、小さなひずみを計測する場合には感度を上げるが、S/N(signal-to-noise)比が小さくなるため、ノイズの影響が大きくなってしまい、その改善のためにフィルターをかけなければいけない。しかし、ピエゾセンサーの場合はローパスフィルターをかけなくても値が安定しており、またひずみゲージで見られるノイズも、ピエゾセンサーでは見られない。ノイズの有無に違いはあるが、いずれの曲線においても応答の大きな変動の時刻はほぼ一致しており、またその波形形状もほぼ同じであるため、ピエゾセンサーはひずみゲージと同様にひずみ計測に用いることが可能であると考えられる。ひずみゲージ長 5mm と 60mm による応答の差はほとんど見られなかった。これはモルタルを材料としているため、材料の最大粒径がゲージ長より短いためである。

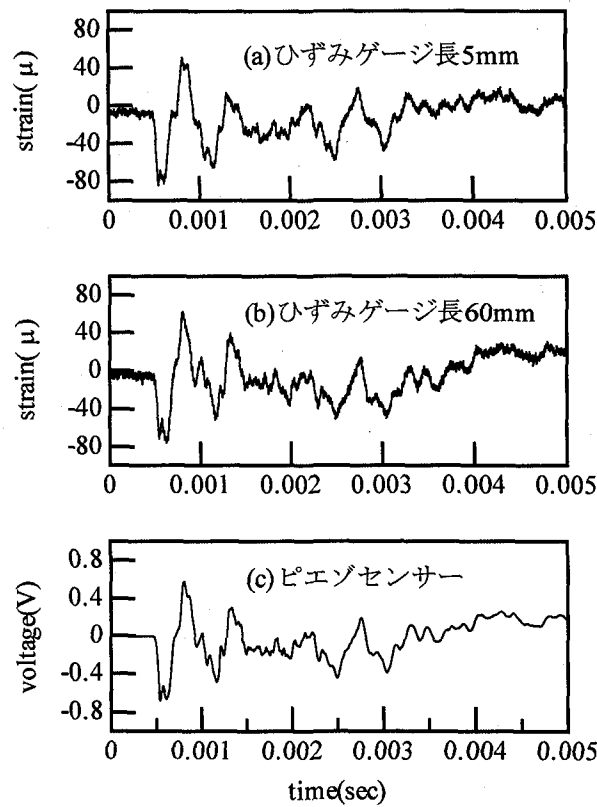


図4 打撃実験によるひずみ応答曲線

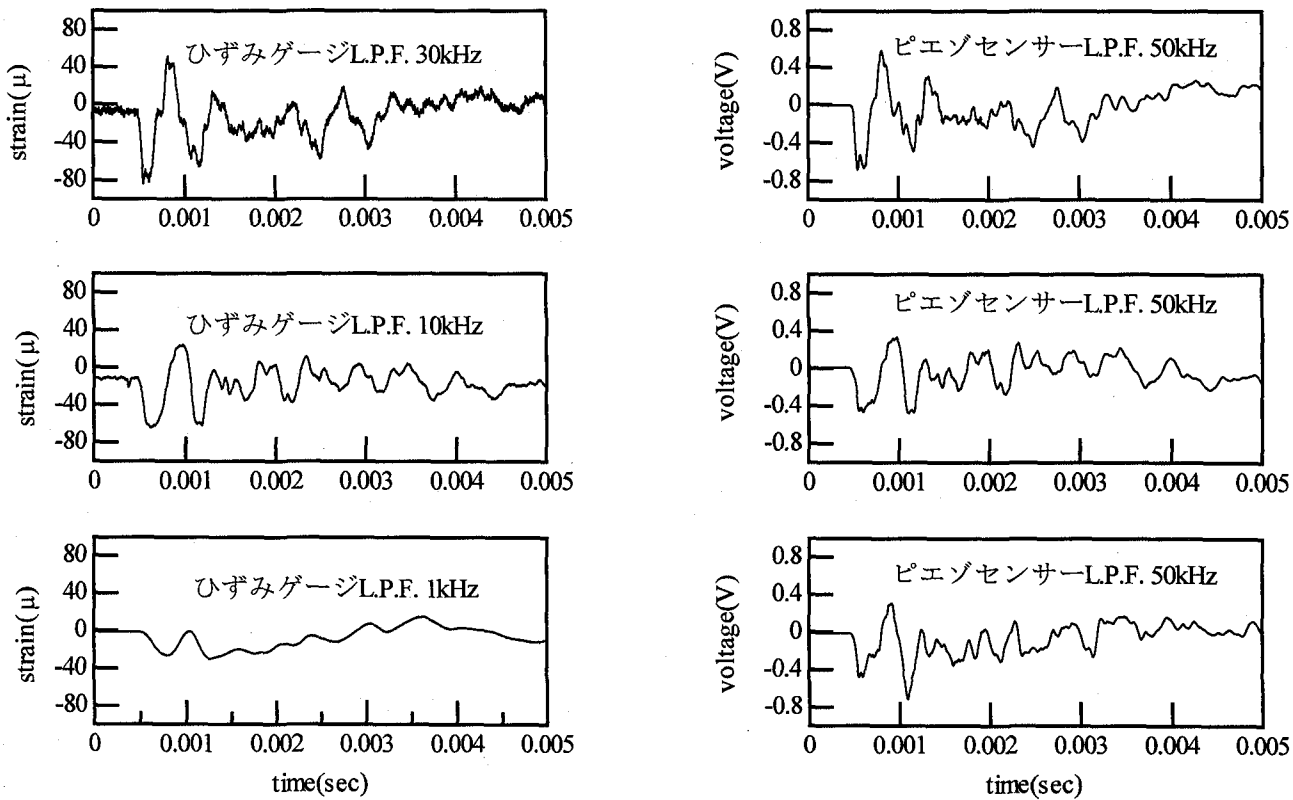


図5 ローパスフィルターがひずみ応答に及ぼす影響

衝撃問題ではローパスフィルターはひずみを計測する際、応答曲線に大きな影響を与える。したがって、ローパスフィルターの設定がひずみゲージの応答に与える影響を図 5 に示す。図は 3 回の実験結果を示しており、左側はひずみゲージによる計測、右側はピエゾセンサーによるものである。ひずみゲージの動ひずみ計のローパスフィルター(L.P.F.)を 30kHz, 10kHz, 1kHz と小さな値となるのにもない、ひずみゲージの応答は微細な変動がなくなっていることがわかる。またピエゾセンサーの応答と比較すると、応力波が到達している時刻においても変動が滑らかなっているため波動をとらえておらず、またその応答値も小さくなっている。したがって、衝撃力をとらえるためにはローパスフィルターの設定には十分気をつけなければならないことがわかる。

図 6 にひずみゲージ(5mm)より得られたひずみとピエゾセンサーより得られた電圧の相関関係を示す。ただし、ローパスフィルターは動ひずみ計では 30kHz, チャージアンプは設定なしで記録を行った。図において、ひずみゲージの応答前の小刻みな変動やひずみゲージとピエゾセンサーの若干の位置の違いによる影響があるため、若干ばらついてはいるが、ほぼ線形の関係があるといえる。したがって、ピエゾセンサーは衝撃などのひずみ計測に適用できるものと考えられる。

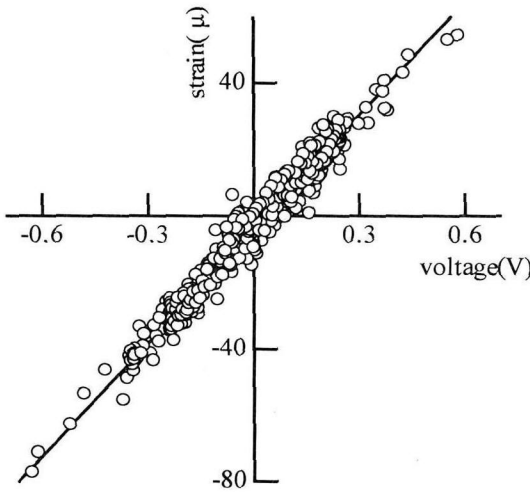


図 6 ひずみとピエゾセンサーのひずみ-電圧相関図

3.4 人工地震による衝撃実験

モルタル柱で行った実験より、ピエゾセンサーはひずみを安定して計測できることがわかったため、次に RC 高架橋を想定した縮小モデルを作成し、その供試体の地下で衝撃を発生させることで人工的に地震を発生させ、その際に構造物が受ける加速度およびひずみをひずみゲージ、ピエゾセンサーで計測した。ひずみの計測は橋脚中央部の 4 側面(A,B,C,D 面)全部、加速度はフーチング部

上にひずみ式加速度計 3 軸を設置した。衝撃力の発生には火薬の代用である線爆装置を用いた。またサンプリング周波数は計測器の都合上 20kHz とし、ローパスフィルターはともにフリーとした。

図 8 に RC 橋脚中央におけるコンクリート表面に貼り付けたひずみゲージ(5mm)およびピエゾセンサーの計測結果を示す。ただしサンプリング周波数は計測器の都合上 20kHz とし、ローパスフィルターは動ひずみ計、チャージアンプともにフリーとした。ひずみゲージの応答はローパスフィルターをフリーにしたため、ノイズと思われる微細な変動が見られ、またピエゾセンサーと比較すると全く異なった応答となった。これは S/N 比が小さかったこと、モルタル柱の場合の 1 次元棒のような応力波伝播とは異なり 3 次元的な複雑な入力波の到達のためだと考えられる。

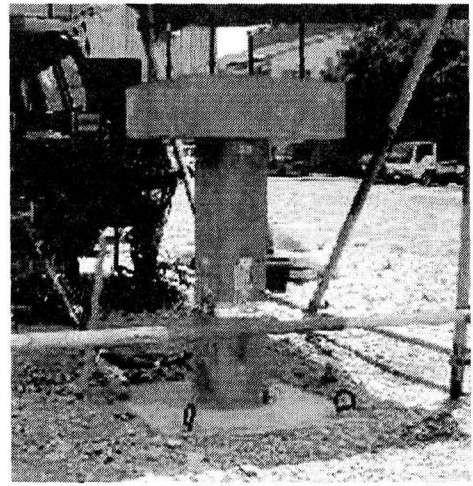


写真 2 実験供試体

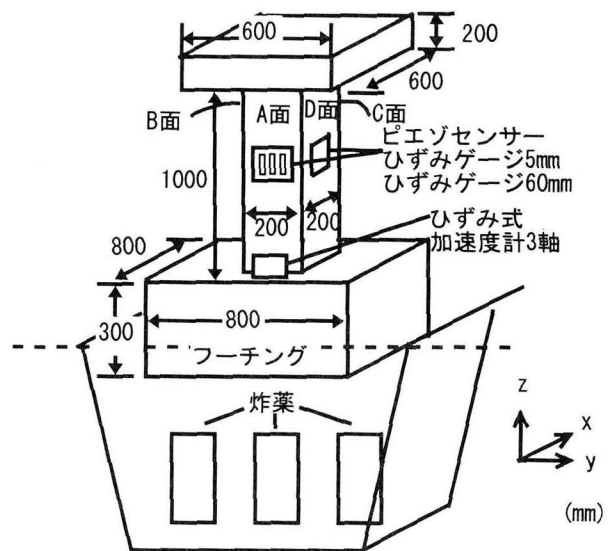


図 7 RC 橋脚モデル概要

2つの加速度計を隣接してフーチング部上面に設置し、地震を受ける場合の加速度を図9に示した。ただし左図はサンプリング周波数 20kHz, ローパスフィルターなしとし、右図は地震計を想定して、サンプリング周波数 100Hz, ローパスフィルター30Hz として計測を行った。図より応答は全く異なったものであり、その加速度の大きさも異なっている。したがって、構造物が衝撃を受けた場合には地震計ではとらえることが困難であることがわかった。

4. まとめ

高周波特性を有するピエゾセンサーとひずみゲージを貼り付け、打撃、人工地震による実験を行った。その結果、打撃実験ではピエゾセンサーの応答はひずみゲージとほぼ一致し、ひずみ計測に関して、高い応答性を示す

ことがわかった。また、ひずみとピエゾセンサーより得られる電圧には、ほぼ線形の関係があることがわかり、ピエゾセンサーはひずみ計測に利用可能であると考えられる。しかしながら、人工地震の実験では応答ひずみが小さく、ひずみとピエゾセンサーの電圧との相関関係が得られなかった。これには複雑な衝撃の入力がある場合には隣り合った場所においても応答が異なることも考えられる。次に、衝撃的な力を構造物が受けた場合、地震計ではその波動の動きをとらえることができないことがわかった。

現在、ピエゾフィルムセンサーは手作りであるため、全く同じものを作成するのは困難で、今回の実験においても常に同じ傾きを持った相関関係を得ることができなかった。今後、さらなる衝撃、振動実験などを行い、ピエゾフィルムの特性を調べ、簡易で長期間使用可能な動ひずみセンサーの開発を行う予定である。

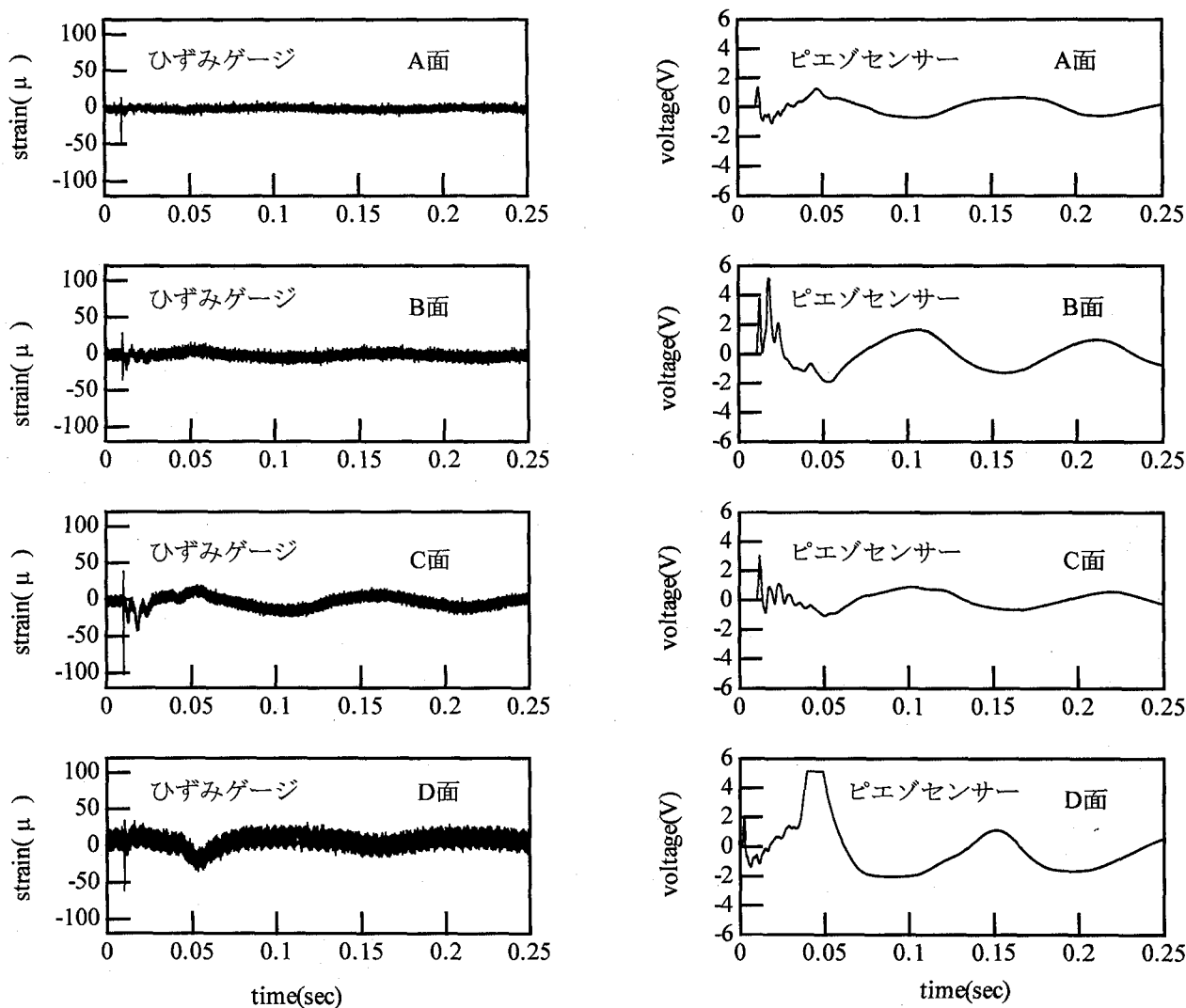


図8 ひずみゲージとピエゾセンサーの計測結果

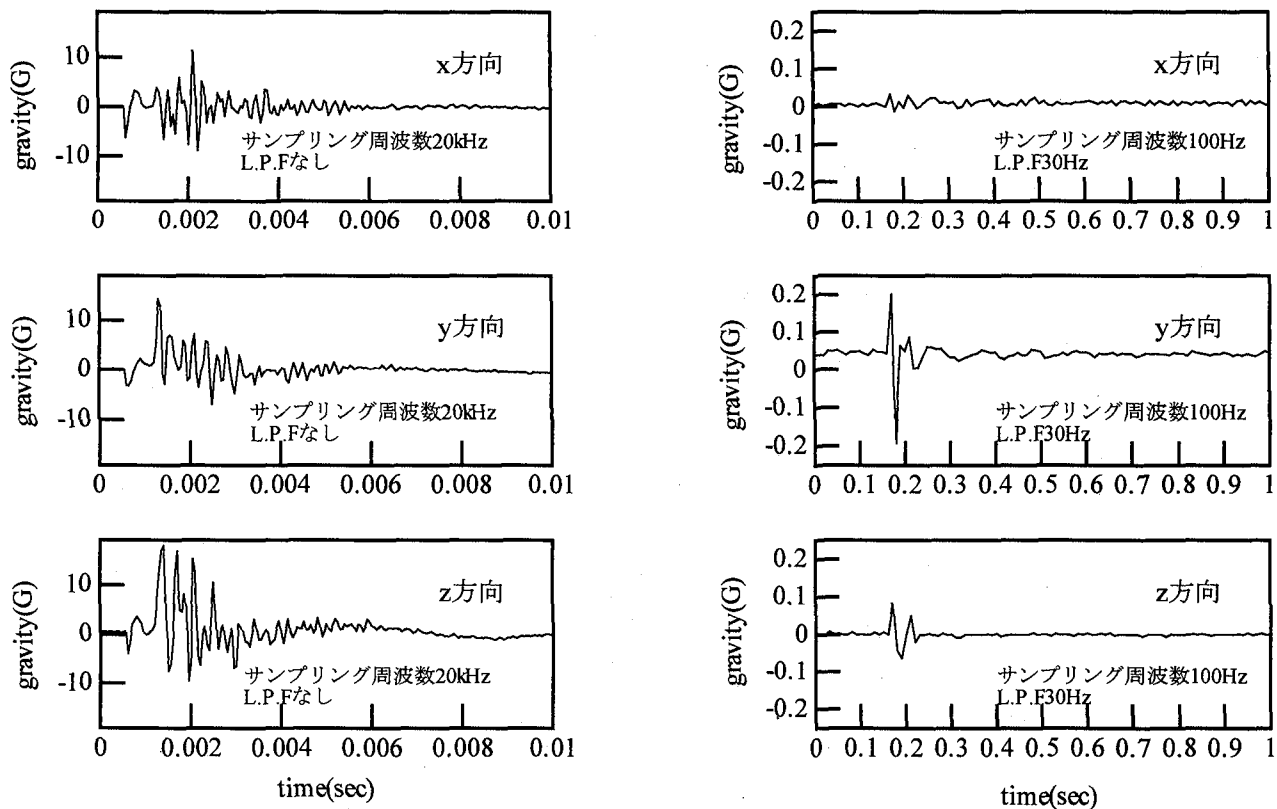


図9 加速度計と地震計の計測

謝辞

今回の実験においては大阪市立大学工学部土木工学科教授高田直俊先生、日立造船(株)技術研究所前畑英彦氏、シグマ・ガル(株)岡田勉氏には多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 園田恵一郎, 小林治俊: 兵庫県南部地震における土木構造物の衝撃的破壊の事例, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 155-120, 1996年6月.
- 2) 園田恵一郎, 小林治俊, 永野圭: 兵庫県南部地震一初期上下動の証言について, 大阪市立大学工学部紀要・震災特別号, pp. 187-278, 1997年1月.
- 3) 園田恵一郎, 高田直俊, 石丸和宏他: 水中線爆装置による高架橋RC橋脚モデルの衝撃破壊実験, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 251-256, 1998年6月.
- 4) 園田恵一郎, 高田直俊, 小林治俊他: 水中線爆装置による衝撃破壊実験に関するシミュレーション解析, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 257-262, 1998年6月.
- 5) 内海慶彦: 高分子圧電フィルムを用いたひずみ計の開発, 平成12年度大阪市立大学卒業論文, 2000年3月.
- 6) 園田恵一郎: 地震時に実在構造物に導入される応力(ひずみ)の現場計測システムの構築, 土木学会構造工学委員会衝撃実験・解析法の標準化に対する研究小委員会資料, 2000. 10.
- 7) 勝見圭介, 琵琶志郎, 松本英治, 柴田俊忍: 高分子圧電フィルムを用いた静的ひずみ分布の測定, 日本機械学会論文集(A)編, 64巻617号, 1988. 1.

(2001年9月14日受付)