

文部科学省委託事業「学校施設の防災力強化プロジェクト（平成 25 年）」

学校建物の耐震安全性即時チェックシステム 報告書

1 はじめに

都市が震災に見舞われた時、学校施設には、被災した住民の避難場所として、さらに復興の拠点としての役割が期待される。震災時には、学校建物が大きな被害を受けていないか、またすぐに利用することができるかどうか、速やかに判断する必要がある。我が国の学校施設については耐震診断・補強が進みつつあるが、その目的は倒壊の防止であり、大地震時には一部の柱・壁に幅数ミリの太いひび割れが発生することがあり得る。この場合、施設を避難所として使用可能であるかを学校の職員が即時に判断することは難しい。この事業では、地震後に避難所として使用可能かどうか、あるいは専門家による調査が必要かどうかの情報を即時に職員室へ伝えるシステムを試作する。

被災した建物の残存耐震性能の評価手法として、加速度計を利用するものが提案されている¹⁾。加速度波形を適切にフィルタすることによって層間変形を評価しようとするもので、普及している小型地震計を利用することで安価かつ簡便なヘルスマモニタリングが可能である。ただし、層間変形に注目する手法のため、建物に局所的に大きな損傷が発生して、層間変形角が大きくなる前に建物が危険な状態になる場合には適用が難しい。本事業で開発するシステムでは、局所的に大きな損傷が生じやすい建物、具体的には極脆性柱やせん断柱を有する建物を対象として、損傷集中箇所の変形を重点的に監視することにより、震災を受けた地域の学校建物の安全性を即時にチェックする。

2 開発するシステムの概要

比較的古い片廊下型の学校建物では、一般に建物の東西方向の耐震壁が比較的少なく、場合によっては北側の柱が腰壁や垂壁によって極短柱となっている。このような建物が地震時に損傷を受けると、極短柱が東西方向にせん断破壊する可能性が極めて高い。すなわち、耐震診断である階の評点が低く、かつ当該階のある柱が極短柱の判定となった場合、この極短柱のせん断ひび割れ幅を計測すれば、建物全体の危険度を代表させることができると考えられる。十分な耐震性能を有する建物でも極短柱にせん断ひび割れが生じる可能性があり、ひび割れが大きい場合、倒壊は避けられたとしても建物の継続使用は困難である。

そこで本事業では、耐震診断によって極脆性柱又はせん断柱と判定された柱に設置してひび割れ幅を常時監視し、ある閾値を超えると警告を表示するシステムを開発する。システムの概要を図 1 に示す。柱の東西面（建物長手方向）のスパン中央部分に変位計を設置して出力を職員室の受信機に送り、柱せいの増大を常時監視する。増大量がある閾値を超えると職員室で警告を発する。

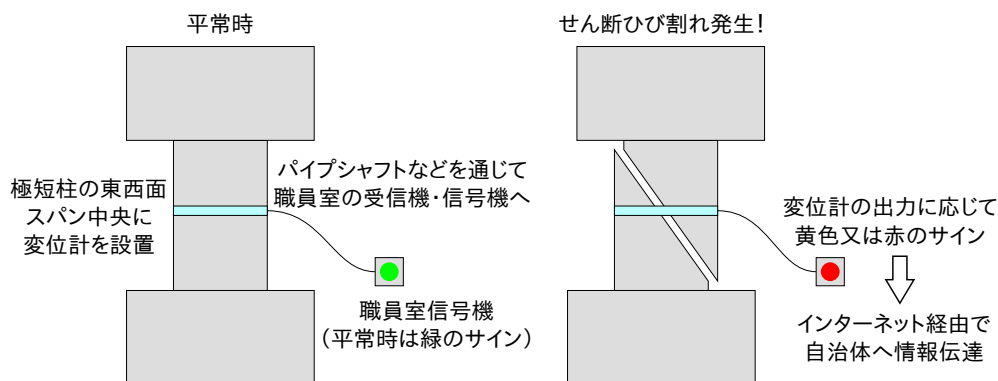


図1 システムのイメージ

3 学校建物の地震被害

本事業で対象とする建物や柱について明らかにするため、過去の地震で被害を受けた標準的な学校建物の典型的な被害状況について説明する。東日本大震災で被災した学校における、損傷を受けた柱の写真を図2に示す。いずれも1971年以前に竣工した片廊下型の建物であり、兵庫県南部地震を始めとした他の被害地震でも数多く見られた同タイプの建物における典型的な被災状況を呈している。

(a), (b) に示す通り、南側の構面には一般に大きな窓があつて柱が長く、北側は腰壁や垂壁によって短柱化している。このような建物に過大な地震動が入力すると、長い柱は比較的剛性が低いので、短い柱に力が集中し、北側構面の破壊が先行する。特に1971年以前竣工の古い建物では、短柱においてせん断余裕率が小さく、斜めのひび割れを伴うせん断破壊が発生する。せん断破壊によって柱は急激にその水平耐力を失い、同時に鉛直支持力を喪失するため、建物は大変危険な状況に陥る。

(c), (d), (e) は北側構面の柱で、せん断スパン比2以下の極短柱に分類される。これらの柱には幅2mmを超える大きなひび割れが生じており、せん断補強筋が降伏や破断に至っている可能性がある。(c) 及び (d) では、鉛直方向の支持力は失っていないと考えられるが、補強筋の降伏に伴って水平耐力を大きく失う可能性があり、危険な状態である。このような場合、これらの柱のひび割れ幅がこの階全体の変形量を代表していると考えられる。すなわち、柱スパン中央部における柱せいの変化を計測すれば、当該階の層間変形を見積もることができる。一方 (e) は、柱が軸方向に短縮しており、鉛直支持力を失い始めていることがわかる。多くの柱がこのような状況になると、建物全体が倒壊に至る可能性があり、極めて危険な状態である。この場合、柱中央における柱せいの変化は、この階の層間変形を大きく上回ると考えられるが、建物全体の損傷度は、当該階の層間変形から評価されるものよりも大きいと考えられる。

(f)～(i) は別の建物で、こちらは (e) までと比べるとスパンが長いものの、やはりすべてせん断



(a) 南側の柱は一般に長く、被害が小さいことが多い



(b) 北側には腰壁や垂れ壁があり、柱が短い



(c) 極短柱のせん断ひび割れ



(d) 北側構面の全ての柱にせん断ひび割れが発生



(e) 極短柱ではせん断ひび割れがスパン中央に及ぶ



(f) せん断柱全体に及ぶひび割れ



(g) スパンが長い場合、損傷箇所が上下に偏る場合がある



(h) 仕上げモルタルのずれ、ひび割れ分散



(i) 仕上げモルタル剥落、コンクリートの損傷は小さい

図2 学校建物の地震被害の例（東日本大震災）

破壊に至っている。(f)のように柱全体にひび割れが入る場合、柱スパン中央部で柱せいの変化を測定すれば、層間変形角をある程度良く評価できると思われるが、(g)のようにスパン中央を避けるようにひび割れが生じる場合、計測システムが柱の損傷を検知できない可能性がある。一般に、建物施工時のコンクリート打設の際の条件によって、柱の上部で下部よりもコンクリート強度が小さくなる場合が多いため、柱がある程度長い場合には柱スパン中央よりもやや上で柱せいの変化を監視すべきである。ただし、柱スパン中央よりもやや下で破壊が生じた例も少ないながら存在するので、この場合複数の柱を監視対象にする必要がある。また、(h)や(i)の柱では、柱の仕上げモルタルが柱のコンクリートから剥離している。このような場合、柱表面においてせいの変化量を計測すると、損傷を過大評価する可能性がある。しかしながら、仕上げモルタルが剥がれ落ちる状況では、建物躯体の損傷もさることながら、コンクリート落下による被害も懸念されるため、仕上げモルタルのずれによる層間変形の過大評価は、建物の危険度の判定に対してはむしろ望ましいとも考えられる。

以上、東日本大震災で被害を受けた建物を例として、典型的な形式の古い学校建物の柱の被害状況について述べた。建物、特に北側構面に極短柱が存在する場合、この柱のせいの変化量を計測することによって、当該階の損傷を評価することができる。ある程度スパンの長いせん断柱については、せん断ひび割れの発生位置に注意する必要があるものの、数本程度の柱せいの変化量に注目して建物全体の地震被害を評価することができると考えられる。ただし、せん断柱が曲げ破壊に至る可能性や、腰壁、垂れ壁が先行破壊して実質的な柱スパンが変化する可能性が考えられるため、対象とする柱のせん断余裕度や雑壁の強度については十分に精査する必要がある。

4 ひび割れ計測システムの開発

本年度の事業では、開発初期費用を抑えるため、なるべく既存の機器を使用してシステムを作製した。市販の変位計とAD変換器、測定器及びパソコンを接続し、変位計の数値の変化量をパソコン上で表示するとともに、閾値を超えると警報音を発する。柱のひび割れ幅を計測する計測部と、得られたひび割れ幅に応じて警報を表示する表示部からなるシステムのブロック図を図3に示す。

本年度の事業では測定部と表示部のみを対象としたが、各校で観測した被災度情報を自治体に集約することができれば、地域全体の被災度状況判断及び避難復興計画の一助となると考えられる。地震直後にもインターネット回線が利用できる場合もあるとの報告があるので、将来的には、表示部からリレーユニットを介して教育委員会や自治体に情報発信するシステムを構築することも視野に入れる。

開発したシステムの計測部外形及びサイズを図4に、変位計とAD変換器の写真を図6に、計測器とパソコンにインターネット情報発信用のリレーユニットを接続した写真を図5に示す。

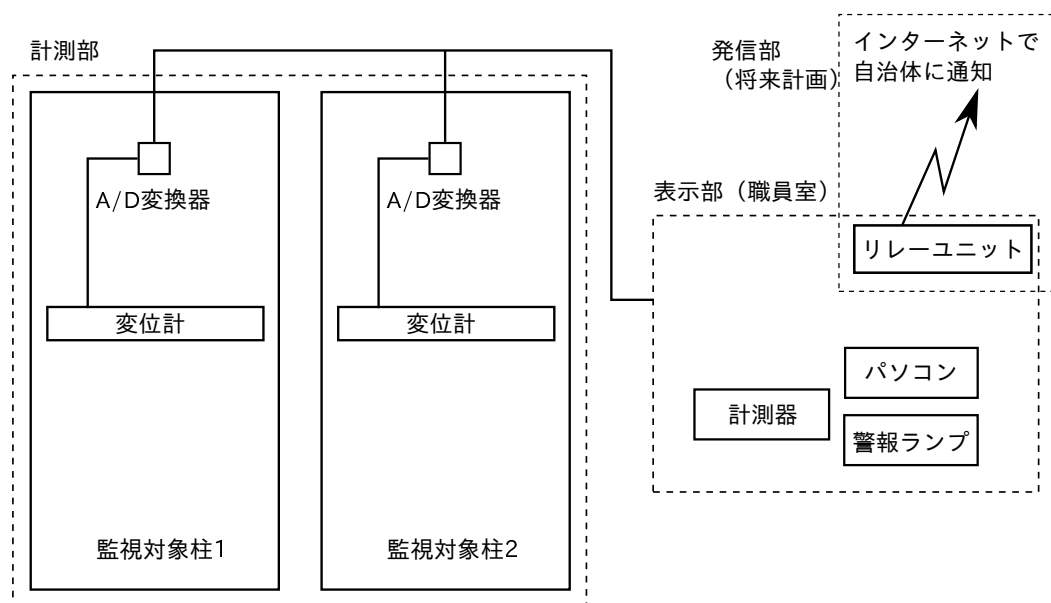


図3 即時チェックシステムブロック図

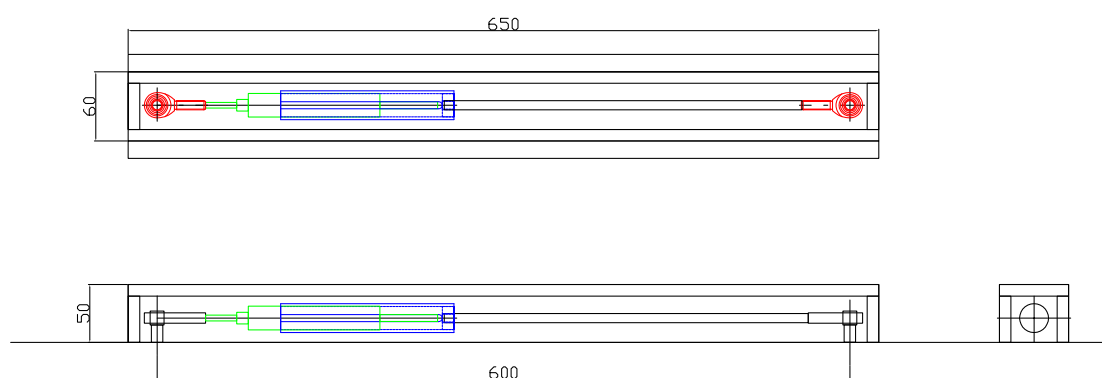


図4 計測部（変位計+アクリルカバー）外形

4.1 警報閾値の設定

計測した柱せいの変化量に応じて職員室に警告を発するが、ひび割れ幅や層間変形の数値情報を送るのではなく、建物の危険性・安全性について即時に判断できるような単純な出力とする。具体的には、通常時は緑色、軽微な損傷を検知して専門家の調査を要請する黄色、重大な損傷を検知して即座に利用を停止した上で専門家の調査を要請する赤の三通りとする。

情報を単純化するため、観測した柱せい増大量と、表示する警告レベルの対応を決定する必要がある。被災度区分判定基準及び復旧技術指針²⁾によると、「ひび割れ幅 2mm」と「鉄筋の破断」が、それぞれ柱の被災度区分 IV、V の境界となっている。通常のサイズの柱では、せん断ひび割



図 5 計測器，パソコン，リレーユニット

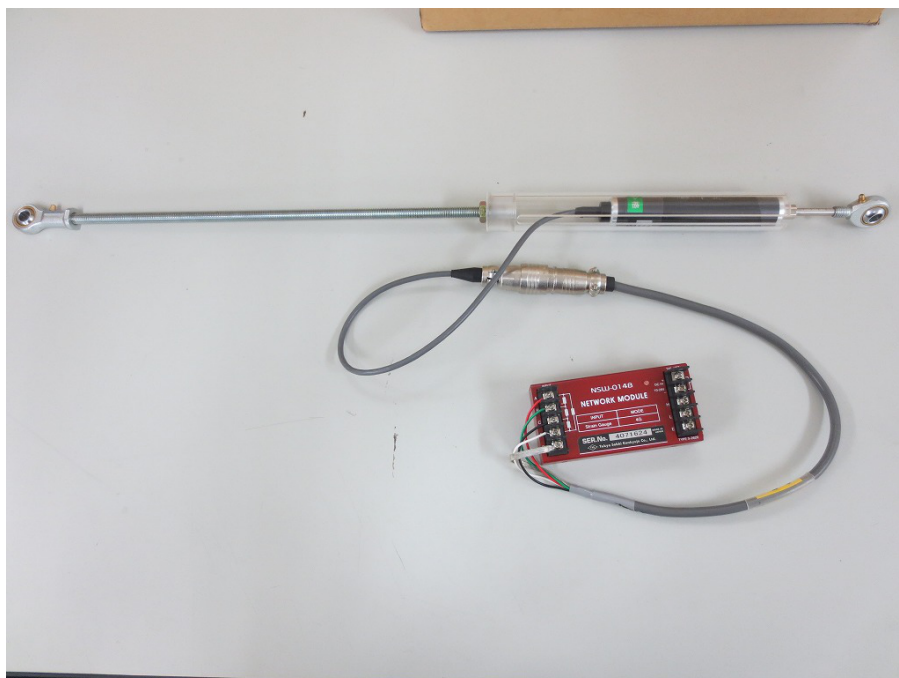


図 6 計測部（変位計 + AD 変換器）

れが 2mm 程度開いている時には、補強筋が降伏に至っていると考えられる。破断時のひび割れ幅は不明だが、耐震診断基準³⁾によると、層間変形角が 1/500 程度の時に、極短柱が終局強度に達するとしている。開発するシステムは、ひび割れ幅ではなく柱せいの増大を計測するものであり、上記の事項を反映させるためには柱せいの増大とひび割れ幅又は層間変形角の関係を導く必要がある。ひび割れ幅については、仮にひび割れ角度が 45 度とすると、柱せいの増大が 2mm の時に $2 \times \sqrt{2} = 1.4\text{mm}$ となる。層間変形角 1/500 の時、仮に柱のみが変形するとして階高を 4000mm とすると、柱せいの増大は 8mm となる。ここではどちらも安全側とするため、2mm 及び 8mm の柱せい増大を柱損傷の目安とする。

当該柱が第二種構造要素の場合、この柱の損傷の度合いに応じて警告を出すことが妥当であると考えられる。第二種構造要素でない場合、1/500 程度の変形角では建物全体としては危険な状況にはならないとも考えられる。しかし、8mm もの大きなひび割れが発生すると、柱の仕上げモルタルやコンクリートが落下する可能性もあり、建物を継続利用は困難な状況に陥ることも考えられる。そこで、当該柱が第二種構造要素であるか否かによらず、信号の閾値として 2mm と 8mm を採用する。すなわち、センサの出力が 2mm を超えると黄色信号、8mm を超えると赤信号が点灯するように設定する。

4.2 振動台を用いたシステムの検証実験

開発したひび割れ幅計測部について、地震時の急激なひび割れの発生を模擬した振動台実験により、過酷な環境下で正しくひび割れ幅を計測し、警報に結び付けられるかどうか検証した。

せん断ひび割れを生じるコンクリートの柱に見立てた 60cm×30cm のコンクリート板 2 枚をまたぐように変位計を取り付け、別途二枚の板の相対変位を観測しながら、兵庫県南部地震または東北地方太平洋沖地震で観測された地震動を入力し、実際の地震下での急激な変形の発生を検知できるかどうか検証した。試験体の概要を図 7 に、振動台実験の写真を図 8 に示す。図中の橙色の変位計とロッド、アンカーが実験対象で、黒い変位計 4 本を用いて板の相対変位を観測している。対象変位計は A-D 変換器と計測器を介してパソコンに接続され、前節で用いた条件で警報を発するように設定されている。コンクリート板が振動台から落ちないように四方に鉄製のストッパーを設け、振動台を保護するために試験体の下に石膏ボードを敷いている。

図 7 に示す方向に、1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸 NS 波、または 2011 年東北地方太平洋沖地震の K-NET 日立観測点 NS 波を係数倍して入力した。なお、変位計は本来柱に対して水平に設置するので、図 7 の振動方向は地震入力のイメージとは異なっているが、この実験では地震時のひび割れ発生（実験では二枚のコンクリート板の離間）を正しく計測できるかどうかを調べるのが目的であるから、実験が実施し易い方向を選択した。直交方向に加振すると、ひび割れ幅が負になる方向に変位が生じた。石膏ボードと試験体の摩擦、ストッパーと試験体の衝突による試験体の変位挙動は複雑で予測困難なため、実際の建物の柱が地震時に受ける変形に相当する応答になるよう、試行錯誤しながら入力地震動の倍率を決定した。両地震動について合計 18 回の試行を繰り返した。計測サンプリング時間は、ひび割れ幅計測については 1/1000 秒、対象変位計の出力につ

いては1秒とした。JMA 神戸波，K-NET 日立波それぞれについて，いずれも倍率0.5の時の入力の際の，実験対象変位計と別途計測した変位計によるひび割れ幅との関係を図9に示す。ch1～ch4はコンクリート板相対変位計測用変位計の出力，Crack widthがch1～ch4から求めたひび割れ幅，Specimenが対象変位計の出力である。Crack widthを見ると，JMA 神戸波(a)では数回大きくひび割れが開くのに対して，K-NET 日立波では小刻みに少しずつひび割れが開閉していることがわかる。Specimenをみると，対象変位計の出力時間刻みが粗いために横軸がずれているものの，縦軸はCrack widthとよく一致しており，瞬間的なひび割れ発生に対しても，徐々に開くひび割れに対しても，開発したシステムで正しくひび割れ幅を計測できることがわかる。前節で述べた柱損傷の閾値2mm及び8mmについては，これらを超えた時にパソコン画面上に警告色を表示するとともに，警報音を発することを確認した。

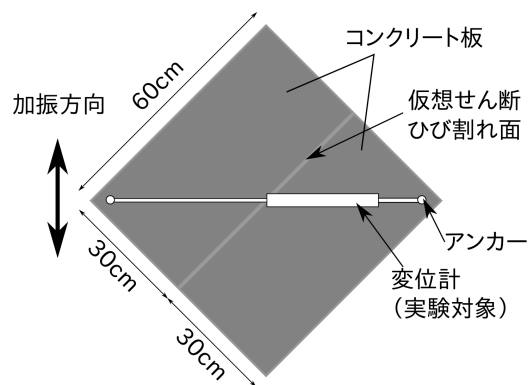


図7 試験体概要

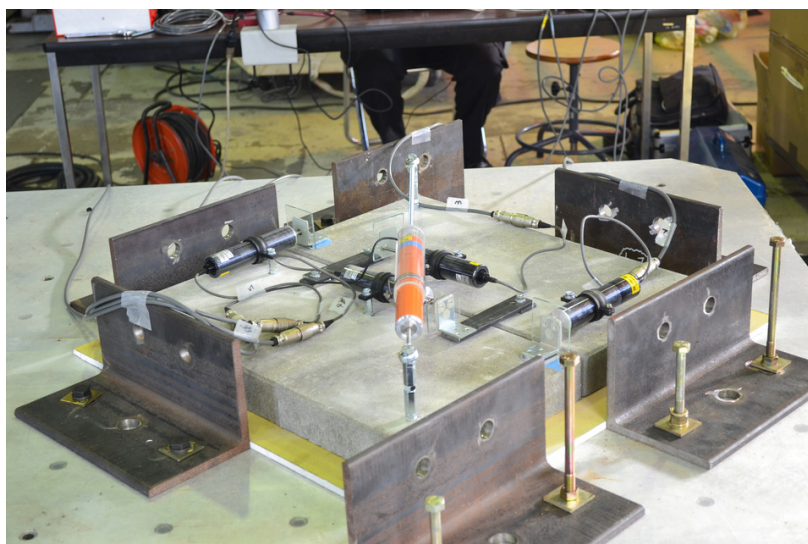
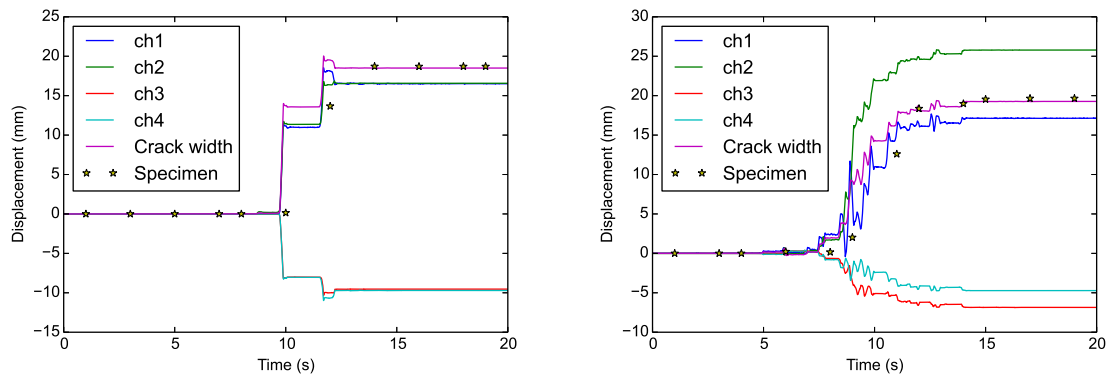


図8 振動実験写真



(a) 兵庫県南部地震 JMA 神戸 NS 波 (b) 東北地方太平洋沖地震 K-NET 日立 NS 波

図 9 振動台実験による変位計の性能確認

5 学校建物への設置シミュレーション

実際の学校建物にシステムを設置する際の問題点を明らかにするため、名古屋市の協力を得て、名古屋市内の学校建物への設置シミュレーションを行った。学校建物を選定して耐震診断図面を閲覧し、設置可能箇所について検討した。

図面閲覧した建物はいずれも耐震診断、一部は耐震補強が済んでおり、第二種構造部材は存在していなかった。補強のあるものについては、いずれの補強も強度型であり、極短柱は複数残っていた。本事業では極短柱のように損傷集中箇所が想定可能な場合が対象となっているが、検討対象とした建物については、監視対象にすることが可能な柱を複数有していた。これらの柱の中から、校内の生徒の動線を考慮して危険性の少ないものや、職員室までの配線が容易なものを選んでシステムを設置することができる。

当初の計画では、実際に短期間設置して、実際の設置及び運用に際しての問題点を検証する予定であり、最終的に、耐震補強が不要と判定された建物 1 棟と、鉄骨ブレースによる補強がなされた 1 棟を選び、設置可能性の検討に入った。しかしながら、(I) 本年度作成したシステムはサイズが当初計画よりも大幅に大きくなったため、校内での安全性に疑問が残ること、(II) かなり高額なものとなったために、実際の運用を考えるためには計画を練り直さないとならず、最終的な形状とは大きく異なるプロトタイプになってしまったことから、実際の設置実験については次の段階に譲ることとした。

6 実用化に向けて

本事業では、学校建物の震災後の利用可能性について、即時にチェックして職員室に通知するシステムの開発を行った。開発したシステムを、せん断破壊する極短柱を模擬した振動台実験によって検証した結果、正しくひび割れ幅を測定し、警報を発することができることを確認した。さら

に、学校建物を選定し、耐震診断資料に基づいて設置可能箇所について検討した。対象とし得る建物及び柱を選択することができたが、前節の最後に示した2つの理由により、実際の設置については今後の課題とした。

実用化に向けては、(I) システム、特に計測部の小型化及び (II) システムの低廉化が課題として挙げられる。今回の開発で大型かつ高額となってしまったのは、今年度は開発の初期経費を抑えるために、市販されている既存の機器を組み合わせで作製したためである。市販の機器は構造部材の破壊実験等で利用される高機能なものであり、極めて短いサンプリング間隔で、非常に高精度なデータを得ることができる。本事業の目的としては、堅牢である必要はあるが、データサンプリング間隔及び精度についてはそれほど高いものは不要である。例えば、単純なばね秤や、定められた変位増大で破断するワイヤーを使って、閾値を超えると断線して警告を発するようなシステムとすれば、計測部を小型化することができ、校内に設置した際にはより安全である。さらに、高額なAD変換器や測定器が不要となり、システム一式あたりの単価は低廉になる。また、パソコン上での出力ではなくパトランプその他のパッケージにしておけば、維持管理は大幅に省力化できる。これらの課題をクリアするには、開発事業を継続する必要がある。

当初の計画では、建物の安全性に問題が出た際、即座にインターネットを通じて自治体に通知するシステムの開発を考えており、表示部にリレーユニットを接続してインターネット回線を接続できるようにした。しかし名古屋市との協議の際、学校内にパソコンを設置してインターネット回線を接続することは、セキュリティの観点から問題があるとの指摘を受けた。4章で述べたように、情報を自治体に送信することが出来れば、自治体の情報収集のために有用と考えられるので、表示部と送信部をパッケージ化してパソコンを削除するとともに、自治体や学校に理解を求めて行く事が今後の課題である。

参考文献

- 1) 楠浩一、勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法, 日本建築学会構造系論文集 No.569, pp.119-126, 2003 年 7 月
- 2) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001 年
- 3) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説, 2001 年改訂