

# 解体工事を対象とした部材転倒作業モニタリングシステムの開発 - 小型試験体実験による計測精度に関する検討 -

○藤本 郷史\*<sup>1</sup>

キーワード：解体工事 センシング モニタリング 労働安全・公衆安全 計測精度

## 1 はじめに

多くの産業分野のなかで建設分野は最も労働災害の多いことが広く知られている<sup>1)</sup>。この労働災害死傷者数は、建設分野全体としては長期的に減少傾向にある<sup>2)</sup>が、解体工事に限れば減少傾向に無いことが指摘されている。建設労働安全衛生年鑑の「重大災害事例」によっても、解体工事に関係する災害件数は、400件(H1~H25)近くにのぼっている。すなわち、解体工事分野では、これまでの対策技術に加えて、新たな労働災害防止技術開発の必要性が高いといえる。

建設労働安全年鑑の分類によると、建設分野の労働災害では、「崩落・倒壊」に分類される事故が25%以上を占めており、作業員等の「墜落・落下」に次いで件数が多い<sup>2)</sup>。例えば、建築物外周壁の重機転倒工法の事故が複数報告されており、壁柱脚部のはつり作業中に外周壁の強度を見誤る、あるいは、重機が誤って触れてしまうなどによって、(転倒作業中の)部材が予期せず建物外部側に転倒し、災害に至っている。この種の事故は、作業に従事している作業員だけでなく、一般公衆にまで死傷者が発生する点で特に重大である。例えば、平成15年の事故事例では、6名が死傷し、国土交通省がガイドライン<sup>3)</sup>をまとめるに至っている。本報では、この例に代表される重機転倒作業の安全性に着目した。

この意図しない部材の外部への転倒を避けるために、各種の指針・文献<sup>4,5)</sup>では、引きワイヤの設置等いくつかの項目が挙げられているが、これらの予防的な施工上の配慮に加えて、危険が生じそうな箇所・時点における“警報”があれば、さらなる安全性の向上が期待できる。すなわち、「意図しない転倒の兆候」を何らかの計測を通じて検出し、作業員等へ通知できれば安全性の向上につながると考えられる。

他方で、国内外の労働安全にかかわる研究動向をみると、近年安価になってきたセンシング技術を活用して労働安全性・公衆安全性を高めようとする研究事例が数多くみられる。例えば、Chengらは重機と作業員の現在位置をセンサで計測し、可視化して管理者に提示し、重機と作業員の接触を防ぐ技術<sup>6)</sup>を提案した。また、Riazらは、閉鎖空間の酸素濃度をセンサで計測して作業員や管理者の端末に通知する技術<sup>7)</sup>を提案している。しかし

ながら、このようなセンシング技術を建設分野に応用しようとする機運の高まりにも関わらず、解体工事にセンシング技術を応用した事例は、著者らが調査した範囲では、ほとんどみられない。

以上の現状分析と研究動向を背景として、本研究は、建築解体途中の外壁等の転倒の“兆候”をセンシングによって検知する技術の開発を最終目標としている。本報では、その第一段階として以下の1)~3)を目的として、小型試験体実験を実施した。

- 1) 実際の解体工事現場を観察するとともに、解体工事の事故事例と照らし合わせながら、労働安全性・公衆安全性の向上を実現するためにシステムが想定すべき条件、あるいは仮定できる条件を整理する。
- 2) 上述1)の分析をもとに、小型試験体実験を計画・実施し、選定したセンシングシステムがもつ計測精度的な課題点を抽出し、指摘する。なお、小型実験の計画にあたっては、別途行った実際の解体工事における加速度計測結果を参考にした。
- 3) 小型試験結果を分析し、上記2)の課題点を解決するための精度確保について検討する。

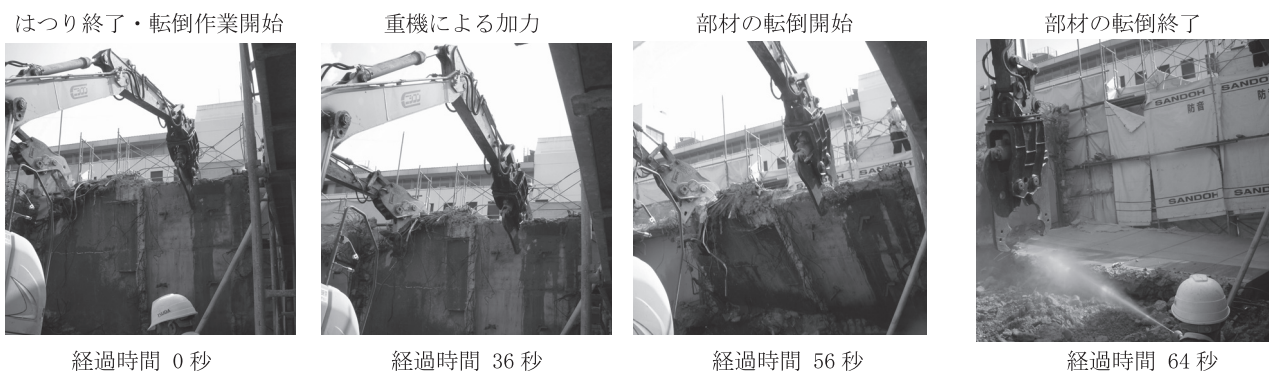
## 2 作業観察に基づくシステムの想定・仮定条件

実際の解体工事における転倒作業の実態を把握することを目的に現地調査を行った。表-1に解体対象建築物および解体工事の概要を、図-1に部材転倒作業の風景を示す。

各種指針<sup>4,5)</sup>の記載とは異なり、調査対象工事では、部材の外部転倒を防止する引きワイヤは設置されていないか

表-1 解体工事の現地調査(対象建築物の概要)

項目	概要
建築年	1975年
構造種別	鉄筋コンクリート造
階数	地上9階地下1階建て
建築面積,延床面積	716m <sup>2</sup> , 7011m <sup>2</sup>
解体工法	階上解体工法(対象部材は、重機により転倒させる)



図－1 重機による部材転倒作業の風景の例、および所要時間・転倒後の部材の状態

表－2 建設業安全衛生年鑑「重大災害発生事例」H1～25より抜粋<sup>2)</sup>

No.	年	災害の状況	災害種*
2	H12	鉄骨鉄筋コンクリート造（地上7階、地下2階）のボーリング場の解体作業中、－(中略)－被災者が、一階床上のガレキの過積載により一階スラブが崩壊（縦25m横21m）しガレキの下敷きになった。	倒壊
3	H15	ビル解体工事現場において、5階外壁解体作業中に建物南側外壁及び鉄骨梁、柱の一部が外部足場とともに約15m下の道路に崩落した。（以下略）※作業員2名死亡、信号待ちの自動車内の2名死亡、2名負傷	倒壊
5	H21	ドラグ・シャベルのバケットをフォーククラブ（掴み爪型）に付け替えたもので半地下式の駐車場の外壁部分を取り壊していた作業場所に被災者が立ち入り、倒れてきた壁の下敷きになった。	倒壊
6	H21	建物解体（RC造、一部4階建）工事現場において、3階壁部分をハンドブレイカで縁切り中、壁が倒壊し下敷きになった。	倒壊

※分類は建設業安全衛生年鑑による。

った。表－1から読み取れるように、解体建築物は比較的小規模であり、建築面積（1フロアあたり延床面積）が小さい。施工管理者への聞き取り調査によれば、このような場合、外周壁の外部への転倒を防止するための引きワイヤの反力をとることが非常に難しく、この現場に限らず、多くの解体工事現場ではワイヤが設置できないとのことであった。この情報は、表－2の文献調査結果とも整合している。このことから、現状の指針等に記載のない手段を探索することの重要性が窺える。

図－1からは、センサシステムが想定できる・もしくは仮定すべき条件が読み取れる。

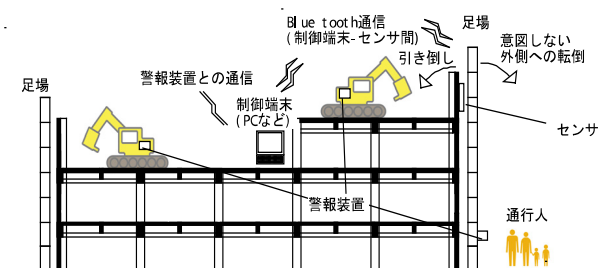
第一に、部材の転倒作業は、柱脚部のコンクリートハツリ作業を除いても1分程度を要している。目視観察を行った全ての部材で転倒速度は遅かった。これは、転倒対象となる部材は、転倒直前であっても鉄筋やコンクリートが残されているためである。指針等でも鉄筋を含む部材断面を十分に残すべきとの記載があるので、このような作業状況は多くの解体工事で共通するものと考えられる。この分析結果は、本報で提案する“意図しない転倒の兆候を検知して警報を発する”という技術の基本的な有用性を示している。すなわち、意図しない外部への転倒の可能性が生じた場合、解体工事の現場では、以下の2つの方法で事故の防止・軽減化を図ることになるが、いずれの対処を行う場合でも、最小で1分程度の時間的余裕が見込めるといえ、本報提案技術が想定する“警報”は、相応の有用性が期待できる。

- 1) 他の重機の応援によって部材を支持する。
- 2) 周囲の一般公衆へ避難を呼びかける

なお、このような対処方法は、いくつかの事故事例でも被害の軽減につながったとの報告<sup>8)</sup>がある。

第二に、転倒後の部材はいずれも壁面の破損が観察されず、平坦な面を保持していた。これは、重機によって柱脚部の断面を欠損し、転倒しようとする部材の折れる箇所を予め特定していることを考えれば自然なことであるが、「転倒しようとする部材が1体と仮定でき、概ね1軸回転運動とみなせる」ことを意味しており、部材の姿勢角を計測・推定する際の容易さという観点から重要である。以上の考察から、以降の検討では、1軸回転運動を行う小型試験体を作製して、その姿勢角（回転角）を推定するセンサシステムを設計・想定した。

以上の考察をもとに、図－2に本研究で想定したセンサシステムの概要を、図－3に本報における検討範囲を



図－2 提案センサシステムの概念図

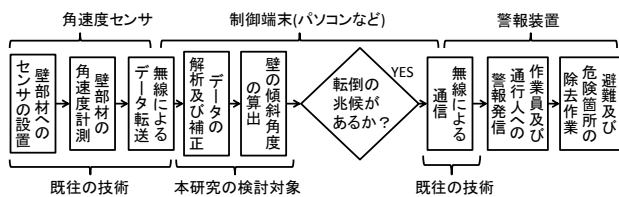


図-3 本報の検討範囲

示す。本報では、転倒しようとする部材の姿勢角（傾斜角度）を把握し、転倒部材が外部へ誤って転倒しようとする兆候、すなわち、建物外部側への傾きを検出することを想定した。傾斜角は角速度センサによって推定することとし、その推定精度を実験的に検討した。

### 3 小型試験体実験の概要

#### 3.1 実験の目的と位置づけ

本実験では表-3に示す仕様のMEMS式センサを用いた。理論的には角速度を積分すれば壁の傾斜角度は導出できる。しかし、MEMS式は安価で壊れにくいという解体工事計測に適した特性を持つ半面、ドリフトや衝撃時の誤差が大きいたことが知られている。そこで、解体時の振動状態をいくつかの試験水準によって再現して、導出された傾斜角度の精度を実験的に評価するとともに、その精度向上技術を開発・検証した。

表-3 本報で用いた複合センサの概要

項目	概要
寸法、質量	W37H46D12mm, 22g
サンプリング間隔	10ms
加速度レンジ	±16G
角速度レンジ	±2000dps

#### 3.2 試験体と試験手順の概要

試験方法の概要を図-4に示す。前章の議論に基づいて、壁面は変形しないと仮定し、実験A~Cの3水準の条件で加振した。実験Aで基礎的な傾向を把握し、補正方法を検討した上で、実験B,Cで実態に近い状態の検証を行った。利用可能な振動台の仕様上、解体工事の実測で得られた波形をそのまま利用することは不可能であったため、入力実験Bでは主に波形の影響を、実験Cでは

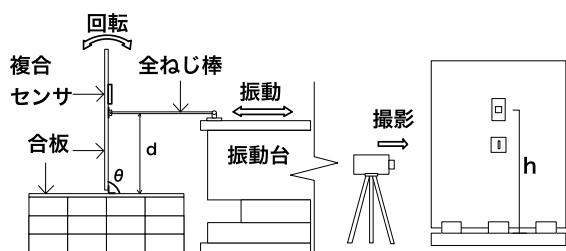


図-4 試験体と試験方法の概要

表-4 実験A~Cの概要および因子・水準

実験記号	方式	最大加速度	入力波形	実験の目的
実験A	手動	-	①静止(30min.) ②指定角への移動(±15, ±30, ±60°) ③ランダム	基礎的な傾向を把握
実験B	電磁式	1.2G	解体工事転倒時の実測波形(加速度を1/n倍に縮小) n=3(14波形) n=6(11波形) n=10(5波形) ※各80秒に切出し	波形の影響を検討
実験C	油圧式	16G	正弦波(5Hz, 10Hz) 0.1G~2.0Gまで11水準を設定 (h=30cm, 60cm)	加速度の影響を検討

注：最大加速度は振動台の設定可能な上限値

加速度絶対値の影響を検討した。なお、実験Bの振動台への入力波形は、解体工事の実測加速度データを、振動台で設定可能な最大加速度の範囲に収まるように縮小し、かつ、積分後の変位が振動台の最大変位内に収まるように調整して設定した。

#### 3.3 推定精度の評価方法

角速度センサの計測値から導出する試験体の傾斜角 $\theta_s$  [°]は以下の2種類の手法で精度を評価した。

**評価方法①** 試験体加振時に合板の傾斜角が分かる方向からビデオ撮影を行い、センサ出力と動画の時刻を同期する。CADソフトを用いて画像内における合板の傾斜角度 $\theta_c$  [°]を計測し、これを真の値とみなして、各時点 $t$ の誤差 $\theta_s(t) - \theta_c(t)$ を算定して評価した。

**評価方法②** 試験体加振時に振動台変位の経時変化を記録し、センサ出力と振動台変位の時刻を同期する。試験体寸法(図-4のd,h)から合板の傾斜角度 $\theta_v$  [°]を算出し、これを真の値とみなして各時点 $t$ の誤差 $\theta_s(t) - \theta_v(t)$ を算定して評価した。

#### 3.4 実験の結果と考察

静止状態においた角速度センサ出力を積分した結果を図-5に示す。誤差が積分で蓄積されることにより、大きな誤差(ドリフト)が発生しており、時間に対して線形であることが読み取れる。ここには示していないが、多水準の試験結果から、振動環境下でも短時間であれば図-5の近似曲線の傾きは静止時とほぼ同一であった。この事実から、ドリフト誤差は、式(2)によって補正できる。図-6にこの補正の有無による違いを示す。加振の

変位の大小にかかわらず、補正を行った場合の方が画像から算出した角度  $\theta_c$  に対する一致率が高い。したがって、式(2)の補正方法は有効と考えられる。

図-7左に示すように、合板法線方向加速度と同時刻の角度誤差にも概ね線形関係が観察された( $R^2=0.61$ )。このことから、式(3)によって加速度に起因する誤差を補正する手法を検討した。図-7に補正の有無による違いを示す。加速度がそれほど大きくない振動環境下では、式(3)による補正はある程度有効であった。他方で、図-8に示すように極めて大きな加速度環境下では誤差が線形でないことが読み取れるため、式(3)は解体工事計測には適用できないといえる。

図-9に、式(2)による補正を行った場合の合板傾斜角の真値 ( $\theta_c, \theta_d$ ) との比較を示す。比較的良好一致しており、衝撃力などを含む解体工事の特殊な波形がセンサ出力にもたらす誤差影響は小さいと判断できる。

$$\theta_s(t) = \theta_{init} + \int_0^t \omega dt \quad (1)$$

$$\theta_s^{corr}(t) = \theta_{init} + \int_0^t \omega dt - C_D t \quad (2)$$

ただし、 $\theta_s^{corr}(t)$ :時刻  $t$  におけるドリフト補正後傾斜角度、 $C_D$ :時間当たりドリフト( $^\circ$ /sec)、 $\omega$ :センサの角速度出力(dps)とする。

$$\theta_s^{corr2}(t) = \theta_{init} + \theta_s^{corr}(t) - C_A \alpha \quad (3)$$

ただし、 $\theta_s^{corr2}(t)$ :時刻  $t$  における加速度補正後傾斜角度、 $C_A$ :加速度当たり誤差( $^\circ$ /G)、 $\alpha$ :センサの加速度出力[G]とする。

### 3.5 傾斜角度推定手法の提案と解体工事への適用性

以上のような実験・分析結果を踏まえて、式(2)の補正方法をセンサシステムに組み込んだ場合の解体工作業への適用性を議論する。

第一に、角速度のみから部材の傾斜角を算定するには計測開始時の傾斜角度  $\theta_{init}$  が既知である必要がある。建築物では多くの場合、外周壁は鉛直であるので、この必要条件は容易に満足できる。

第二に、式(2)では静止状態でのドリフト  $C_D$  ( $^\circ$ /sec) が計測時にリアルタイムに既知な必要がある。実験によれば、この  $C_D$  は、同一機種であってもセンサごとに異なり、長時間が経過すると計測ごとに異なる。したがって、事前に一定値を入力して算定に用いるのは適切でない。しかしながら、解体工事での現場観察によると、部材ごとに破砕やコンクリートがら投下作業などがあるため、転倒作業前には準備作業時間帯が設定可能である。また、危険作業であるため休憩時間も比較的多い。したがって、センサ設置後に部材の静止状態で  $C_D$  を導出す

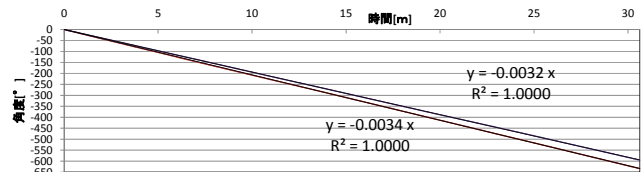


図-5 静止状態における角度(センサ出力の積分)の例 (実験 A, y 軸は式(1)で算定)

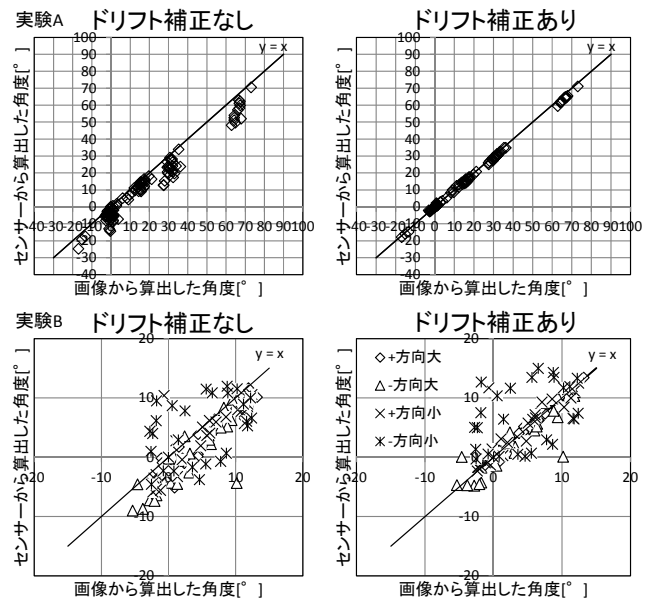


図-6 ドリフト補正前後の精度比較(上下とも実験 A) (上:変位量小, 下:変位量大の場合), y 軸は左図:式(1), 右図:式(2)で算定

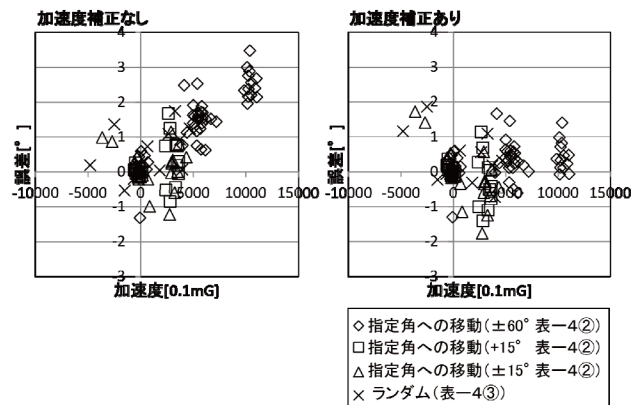


図-7 加速度補正前後の比較 (実験 A, 評価方法①) y 軸は左図:式(2), 右図 y 軸は式(3)より誤差を算定

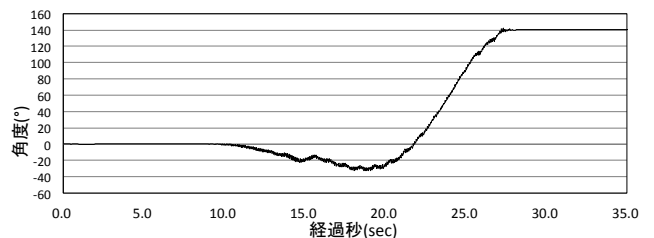


図-8 極めて大きな加速度環境下における MEMS 式角速度センサの挙動 (実験 C)

るのは容易である。また、重機による転倒作業は、センサ設置が可能なはつり作業開始直前から転倒終了まで、1部材あたり30分程度であるので、 $C_D$ が時間経過によって無視できない誤差を含むことはないと判断できる。

以上の考察から、式(2)による部材傾斜角度導出手法は、図-10に示す処理フローによって、解体工事の作業手順を阻害しない形で適用可能といえる。

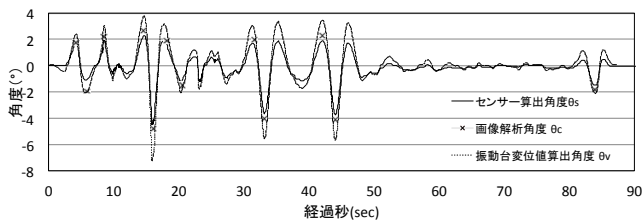


図-9 センサ算出角度と振動台変位値の算出角度及び画像解析角度の比較(実験B)

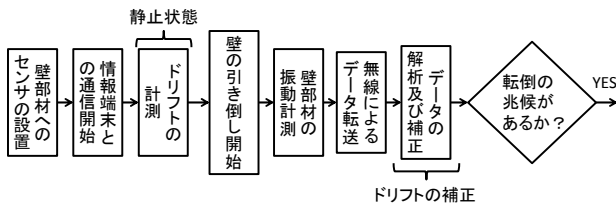


図-10 解体工事における角速度センサを用いた部材傾斜角導出手法の適用性(処理フロー)

## まとめ

本報の成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 実際の解体工事現場観察を通じて、解体工事の重機転倒作業センシングシステムが考慮しておくべき想定状況について分析した。その結果、部材は、部材の残断面の性能によってゆっくりと転倒するので警報技術が実現すれば安全性向上が期待できること、部材の転倒形状から1軸回転を仮定した傾斜角のセンシングが有用と判断できることを示した。
- 2) 上述1)の分析をもとに、小型試験体実験を計画・実施し、MEMS式センサを用いた場合、ドリフトや衝撃力による誤差発生が懸念されることを示した。
- 3) 上述2)の課題点を解決するために、解体工事の手順を変更せずに適用できるドリフト補正手法を提案し、その処理フローを示した。

なお、加速度の影響による誤差も無視できないことを報告した。この補正手法開発については今後の課題であるが、現時点までに、解体作業中の静止時間帯を利用して補正できる見込みを得ている。

## 謝辞

本研究は、全国解体工事業連合会「解体工事に係る研究助成」を受けて実施した。本報の小型試験体実験実施にあたっては、五十嵐裕介君および佐藤卓志君(いずれも研究実施当時、宇都宮大学・学部学生)の多大な協力を得た。振動実験の一部(実験C)には、栃木県産業技術センターの振動台を利用したが、当該振動台の利用にあたっては、栃木県産業技術センター機械電子技術部・長嶋一晋氏の協力を得た。また、宇都宮大学構内の振動台の利用(実験B)にあたっては、技術職員・野俣善則氏の協力を得た。小型試験体の製作にあたって、宇都宮大学・神山祐之氏に治具の一部を作製いただいた。本報の小型実験を計画するにあたっては解体工事現場での観察や部材振動性状の実測結果を参考にした。これらの観察や実測は、三同建設(株)の関係各位のご協力によって実現したものである。以上の関係各位に、この場を借りて感謝を申し上げる。

## 【参考文献】

- 1) 厚生労働省：労働災害統計
- 2) 建設業労働災害防止協会：建設業安全衛生年鑑 平成26年度版, p.103-128, 2014.9
- 3) 国土交通省：建築物の解体工事における外壁の崩落等による公衆災害防止対策に関するガイドラインについて, 平成15年7月
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針(案)・同解説, 1998.12
- 5) 国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課 監修：建築工事安全施工技術指針・同解説 第3版, 公共建築協会, 2009.3
- 6) T.Cheng, J.Teizer: Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications, Automation in Construction, vol. 34, pp.3-15, 2013
- 7) Z.Riaz, M.Arslan, A.K.Kiani, S.Azhar: CoSMoS: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces, Automation in Construction, vol. 45, pp.96-106, 2014
- 8) 建設業労働災害防止協会：建設業安全衛生年鑑 平成1年度版~26年度版

\*1 宇都宮大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)

# Accuracy improvement technique for demolition works sensing system

## - Experimental study using small size specimen-

○Satoshi FUJIMOTO\*<sup>1</sup>

Keywords: Demolition works, Sensing, Monitoring, Labor / public Safety, Accuracy

**English Summary:** Labor and public safety in construction sector is one of the most important task in the industry since casualty figure is dominant among all industries. Casualty in building demolition works is particularly high in the construction sector. Therefore, exploring the new technologies for the safety of demolition works is essential. The author is currently under development of labor and public safety enhancement system for demolition works, especially focusing on the external wall-falling works using construction machinery. In this paper, I firstly analyze the requirements and restriction in the sensing system, through observation and interview-to-workers of the real world demolition works on site. Secondary, small size specimen experiment is conducted to extract advantages and dis-advantages of MEMS type angular velocity sensing system. Vibration test simulating on-site vibration data is conducted to verify the accuracy of angular degree induced from the sensing data. Thirdly, correction algorithm and data processing flow in accordance with restriction of construction managers and workers is proposed.

---

\*1 Associate Professor, Department of Architecture, Graduate School of Eng., Utsunomiya University, Dr.Eng.