

無線加速度センサを用いた建築解体工事における 大型部材の崩落・転倒の兆候検出に関する基礎的研究

藤本郷史^{※1}

Satoshi Fujimoto

ABSTRACT

Building demolition process has been reported to mark the highest rate in industrial injury. The most major case in these accidents is un-intentional “falling-off” of building members (ex. external walls and columns). This paper newly propose a falling-off alarming system for better labor and public safety. Firstly, system requirements under various constraints in construction processes are discussed using literature survey. Secondary, vibration measurement of 1/100 scale model a column under demolition are conducted. Comparison of various models (ARIMA, FFT etc) has indicated that change in slope of members is the most effective detection index for “falling-off” for building members.

1. はじめに

建築物解体工事においては、外壁や物品の崩落・落下に起因する事故が懸念される状況にある。特に、都市部における中高層建築物は、外周部が外側に張り出していて重心が外側にかかっているケースや、構造的に自立しないカーテンウォール等が用いられるケースが多いことから、崩落や落下の潜在的危険性が高いと指摘されており、万全の対策が求められる。各種の指針・文献¹⁻⁵⁾では、防護網の設置、先行撤去、サポートの設置など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。

以上のような考えをもとに、本研究は、建築解体途中の外壁やカーテンウォールなどの転倒の”兆候”を検知する基礎技術の開発を

最終目標としている。

RC 建造物の解体工事の労働安全を目的とした転倒検出研究の既往研究例はほとんど皆無と言ってよい。これにはいくつかの社会的な理由も想起されるが、転倒の兆候検出が技術的に困難であることに加えて、「RC 建造物の解体工事」という対象・環境の特殊性によって、さらにその困難さが増していることに一つの原因がある。本研究では、このような困難さを背景として、転倒検出手法自体の確立を目指すのではなく、その前段階として、「転倒前後の振動特性の変化検出の可能性を模索する」ことを目的（申請書本文より引用）としていた。具体的には、解体途中の鉄筋コンクリート部材を模擬した小型試験体を作成し、無線加速度センサを用いて転倒前後の振動特性の変化検出の可能性を模索することを本研究の主目的とした。

※1 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門 助教・博士（工学）

2. 開発システムの技術的要件の分析

本研究では、まず、RC 部材転倒に伴う労働災害や公衆災害を防止する観点から、どのようなシステムが適当であるかについて文献調査等に基づく技術要件分析を行った。

2.1 最終目標システムの想定

図 1 に本研究で最終目標としたシステムの解体工事における運用想定概要を示す。本研究では、RC 建築物の地上躯体の解体工事における外壁転倒工法を対象とし、特に外周部の柱・外壁が転倒することによる労働災害・公衆災害の防止を目指すこととした。そのため的手段として、

- 1) 転倒を予定する RC 部材（引き倒しを開始した部材ではなくその前段階として縁切りや柱断面の減少を行いつつある部材）に無線型加速度センサを設置し、
- 2) 無線加速度センサで測定される振動を制御端末で分析し、警報の発信の必要性を自動的に判断し、
- 3) 予期しない部材の転倒が発生しそうな場合には、無線通信によって、各作業員への警報発信を行って、労働安全および公衆安全（作業員への通知によって外周部外壁の外部への転倒予防措置を講じる予備時間を確保する）の増進を図る、

というシステムを想定した。

図 2 に本申請研究で想定する最終目標システムの処理フローを示す。本申請研究に先立って、著者らは加速度計測定システムを構築・保有している。それらを設置することを想定して、PC 制御端末側で、振動特性の転倒を検出するための分析技術を模索した。実際にシステムを運用するには、これらの開発に加えて、環境に適した「警報」の開発が必要であるが、本申請研究では、今後の課題とした。なお、図中の「危険個所の除去」については以下の 2 作業を想定した。

- 1) 作業員の危険地区からの退避（内側転

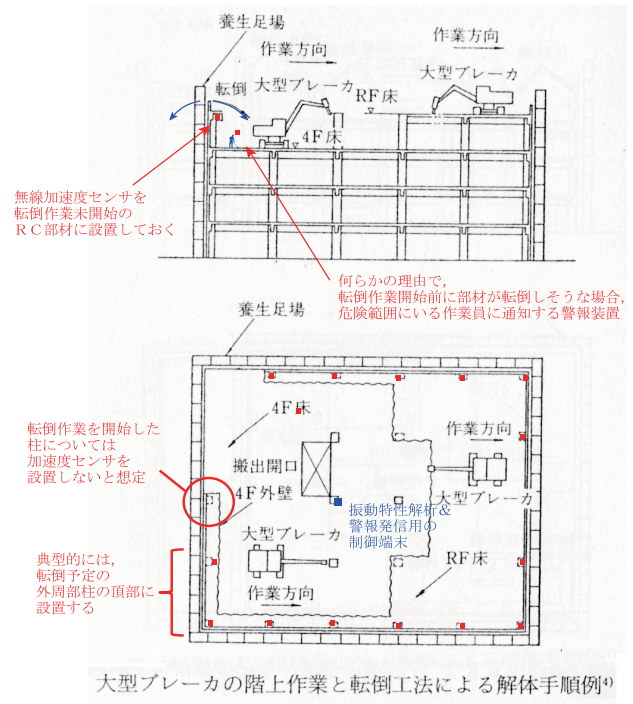


図 1 最終目標とするシステムの構成
(文献 1 解説図 4.6.3 に加筆して作図)

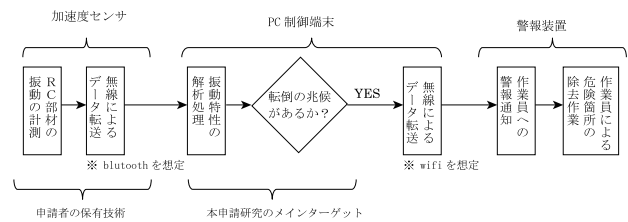


図 2 目標システムの想定処理フローと
本研究の検討範囲

倒の場合)

- 2) 作業員による「逆転防止ワイヤ」等の再点検・設置、建設機械（圧砕機）による部材支持などによる外部転倒の防止作業（主として外部転倒の場合）

2.2 RC 解体工事の特殊性からみた転倒兆候検出技術の要件（まとめ）

“転倒の検出”技術は、解体工事における労働安全を対象にしたものは皆無に近いが、他分野では、“転倒の検出”の観点から見て類似する手法も存在する。そこで、他分野の既往研究における解析手法を分析して、その RC

解体工事における大型部材転倒の兆候検出への適用性を検討した。詳細は省略するが、例えば、以下の分野について調査を行った。

- ・ 建築設備の耐震設計分野⁶⁾
- ・ 構工法分野(家具等の転倒予測)⁷⁾
- ・ 構造ヘルスマニタリング分野^{例えば 8)}

分析の結果概略をまとめて表 1 に示す。本研究開発で最終目標とする技術は、少なくとも、要求性能 R-1~R-4 を満たす必要があるといえる。

3. 実験の方法

3.1 本実験で想定した解体工事事故

本研究では、文献 2 に示された外壁転倒事故例参考図(p.90 参考-1, 著作権を考慮して掲載せず)を参考に実験計画を立案した。実際の事故は多様な原因によって発生するものと思われ、その詳細な原因は必ずしも明らかでない(少なくとも、各種の公開報告書には明示されていない) 図中の説明においても、詳細は記載されていないが、本申請では以下の仮定を設けて、試験条件を設定した。

- ・ 各種の指針・文献^{1,3)}では、「柱一本のみの転倒作業は不安定であり避けるべきである」とされている。しかし、掲載図を見る限り、柱 1 本の部材とした後に転倒を

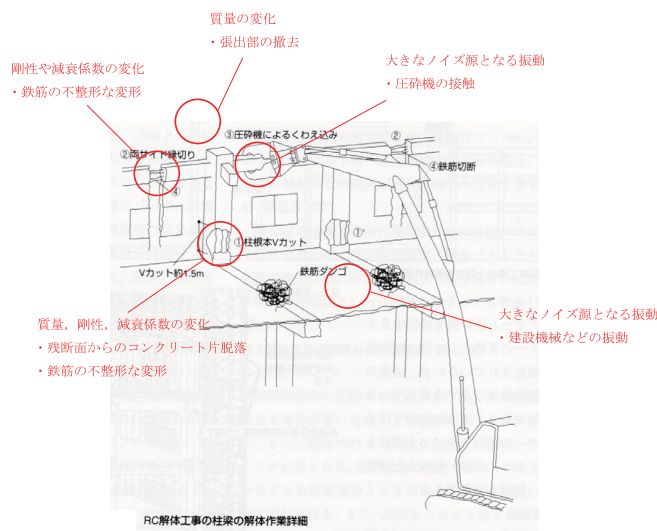


図 3 システム (解体対象の RC 部材) の物理パラメータに影響を与える各種の解体工事の作業 (文献 3, p153 図 7 に著者が加筆)

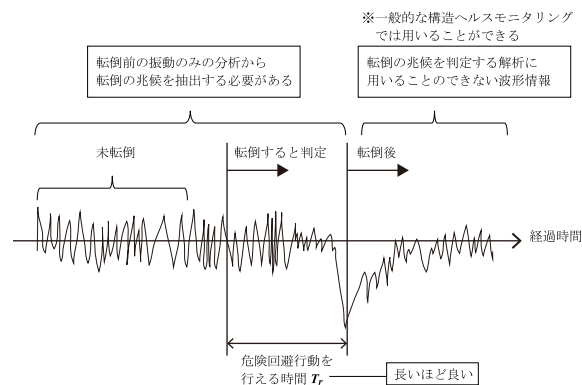


図 4 判定の即時性(R-3)がもたらす困難さ

表 1 RC 解体工事における部材転倒検出における技術的な制約と要求性能

記号	制約条件と要求性能の分類	概要
R-1	システムの逐次的な変化	転倒 (を予定する) 部材を一つのシステム (系) として、システム同定を行おうとすると、以下のような変化が生じることによってシステム自体が変化することになり、同定が難しい。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 剛性 (断面の残存コンクリヤ鉄筋断面や塑性化の有無, 両サイドの鉄筋物性) ・ 減衰係数 (断面の残存コンクリヤ鉄筋断面や塑性化の有無, 両サイドの鉄筋物性) ・ 質量 (部材コンクリートを小割したり, 脱落したりすることによる質量変化) したがって、このようなパラメータの経時的変化にロバストである必要がある。
R-2	大きく不確定でモデル化されていないノイズ源の存在	前述の建築構造分野では、特性がある程度既知な入力振動に対して解析を行う。しかし、RC解体工事では現地で発生する入力振動 (ex.建設機械の振動) は、十分に調査・モデル化されている現状にない。また、仮に十分に調査しても、建設機械の接触や他の隣接する部材の解体作業に伴う振動など、法則化しにくい入力振動が予想される。したがって、このようなノイズに対してロバストである必要がある。
R-3	判定の即時性	本申請研究の最終目標とするシステムは、建設作業への警報の発信を意図している。したがって、「転倒の兆候」は、振動の測定後、即時に行われる必要がある。システム同定の手法のいくつかは、中規模の行列計算を要求することになり、結果として、この即時性が失われる。
R-4	事故性の判別	本申請研究は「事故」の防止を目的としているが、技術自体は「部材の転倒の検出」を開発目標としている。ところが、解体工事自体が進捗すれば転倒は必ず行われるわけであり、「予期しない転倒」と「計画された転倒」を区別する必要がある。

開始している。そこで、本研究でも、「柱一本」となった解体部材を模擬した

- ・文献2には「切込みを行ったところであると思われる」との記載がある。本研究では、「部材下部からの入力振動によって誤って倒れた」との仮説のもとに実験計画を立案した。これは、実際の部材の転倒を考えると必ずしも十分に合理的ではない（建設機械の接触による可能性も検討すべき）であるが、実験計画上、接触を模擬することが難しいことを考慮したものである。
- ・文献2 図中には、逆転防止ワイヤ（トラロープ）等の記載がない。また、外部側への転倒事故である。各種指針では、これらの設置を必須とする記載があり、工事の実態としては、これらの設置が普及しているものと推察される。本申請研究では、若干実態とかい離するが、設置の不備などを含む予防的措置を対象とした研究であることを考慮して、逆転防止ロープを設置しない状態を想定した実験計画を立案した。

3.2 試験体の概要

図5に試験体の概要を示す。事故報告に示された寸法をもとに、1/100に縮尺して実験を実施した。実際のRC部材では残存鉄筋によるじん性が期待できるものと思われるが、本実験では、振動台の設置上の都合で、無筋コンクリートとした。

試験体の下部（柱脚部に当たる箇所）には、解体工事がある程度進捗していることを模擬して、転倒支点となる切欠きを設けた。これは、事故事例における説明（作業途中で転倒）にも合致する仮定である。実験にあたっては、建設機械等の入力振動によって、誤って残存断面が破壊して転倒することを想定し、振動台によって試験体底面から振動を入力した。すなわち、前章に述べた想定のうち、下部からの振動のみを考慮して、建設機械の接触など、部材上部からの転倒をひきおこす荷重は想定しなかった。

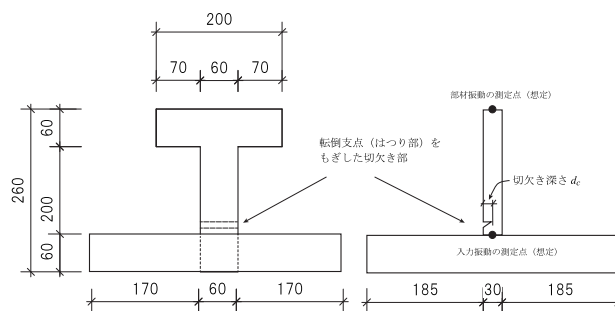


図5 試験体の寸法と振動の測定位置
(前章の仮定条件にそって、柱1本を模擬)

3.3 本実験で用いた加速度センサシステム

本研究で用いた加速度センサ測定システムの概要を図6、表2に示す。解体工事では、配線も難しいことが容易に予想できる。無線型のセンサであれば、このような困難を避けることができる。Bluetooth通信では、おおむね20m以内（仕様上は100m程度）まで通信可能である。部材から警報を発する労働者やシステム制御PCまでの距離（同一階または見通しのきく一つ下のフロアを想定）を考えると、現状技術でも通信距離・速度の面では警報を発するのに問題ないと考える。

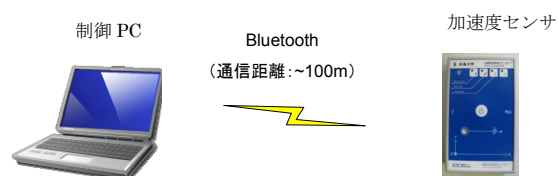


図6 用いた加速度センサシステムの構成
表2 加速度センサの主な仕様

項目	SPEC
外形寸法	W61×L100×H18.5mm
測定可能範囲	±2000gal, ±6000gal切り替え可能
感度切り替え	×1, ×2, ×4, ×8, ×48
sampling周波数	100sps, 1ksps
分解能	100sps時: 13bit, 1ksps時: 9bit
検出軸	3軸, 同時AD変換, AC/Dcsampling
電源	単四2本, 又はUSBアダプタ
記録容量	2GB micro SDカード使用で 120秒データを約6000件保存
無線通信	Bluetooth Class1, 小電力無線
振動トリガ	可
時間同期	可

3.4 用いた振動台の概要

前述のように、本研究では、建設機械等による部材底部からの入力振動に起因する転倒を想定した。そこで、図5に示す試験体を振動台に設置して加振した。振動台には、サーボ型アクチュエータ（コントローラによる波形制御可能、位置設定分解能 16bit、振幅設定分解能 12bit、波形データ最大点数 64000点）を用いた。

表 3 振動台の各種仕様

項目	
加振力	200kgf
最大ストローク	±125mm
テーブルメカストローク	±150mm

3.5 実験の因子と水準

本研究では、計 186 水準の実験を実施した。以下に試験水準の考え方と設定値に関する概要を示す。

文献調査に基づく入力振動の試験水準

建設工事に伴う振動については、主に振動騒音防止の観点から基準が整備されている。例えば、土木研究所には測定要領の規定⁹⁾があり、周波数特性を含めて報告することが規定されている。東京都では、実測データが報告¹⁰⁾されている。これらの文献調査から、建設工事に伴う振動は、おおむね 2-10Hz の周波数成分が支配的であるとの結果を得た。この結果をもとに、表 4 に示す試験水準を設定した。なお、本研究では試験体寸法が実大ではないので、振動特性が実際の部材と異なる。このような違いがもたらす影響についても、今後の実地測定等で検討の必要がある。

表 4 入力振動に関する試験水準

入力振動の波形	試験の水準
正弦波	2Hz, 10Hz, 20Hz
White noise	最大振幅 ^{※1} 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 mm

※1 転倒させる観点から設定。

試験体の形状に関する試験水準

表 5 に試験体形状に関する試験水準とその考え方を示す。解体工事の進捗にともなう部材形状の変化(表 1 R-1)を、複数の形状、接着方法の比較によって模擬することを試みた。

表 5 試験体形状に関する試験水準

試験因子	水準	模擬しようとする解体工事作業・工程
切欠き深さ d_c	1cm, 2cm	・転倒前の断面はつり作業の進捗と作業にともなう剛性等の変化
切欠き部の破断の有無	破断前	・残存断面が部材を自立させる強度
	破断後	を持っているか（作業の進捗や休憩中の思わぬ荷重発生による残存断面の破壊進行を模擬）
切欠き部の再接着	再接着 & カット	・再試験のために一部の試験体では切欠き部を再接着した。また、接着後に切欠きサイズの変更も試みた。

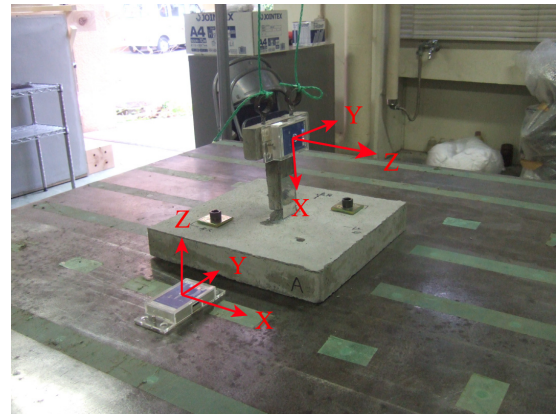


図 7 試験体の設置状況

(矢印は加速度センサの測定向きを表す)

4. 実験の結果と考察

4.1 転倒自体の検出に関する考察

まず、最も簡単な場合として、転倒の兆候ではなく、“転倒”自体について振動側手データから判定可能であるか検討した。図 8 に部材側センサによる加速度データの一例を示す。部材の転倒に伴って大きな加速度の変化が容易に読み取れる。センサ設置向きは明らかであるので、部材の転倒方向についても容易に判別できる。すなわち、加速度センサの設置によって、“転倒”自体の検出については特に解析を行わなくとも、閾値設定によって判定が可能であるといえる。

4.2 転倒兆候を予測するための予備的な検討（転倒現象の不確実性）

同一の試験体（破断済みをアルミテープで固定した場合）について、正弦波の最大振幅（すなわち入力加速度）を増やしながら入力した場合の、転倒の有無を図9に示す。最大振幅1mmのような小さな加速度で転倒しても、最大振幅4mmまで転倒しないなど、転倒現象それ自体に大きな不確実性が伴うことが明らかとなった。これは、破断部分のかみ合わせやアルミテープの接着具合といった人為的な要因を含む。しかしながら、実際の解体現場でも同様の人為的要因で部材の形状（はつり形状や鉄筋の破断本数、破断後の形状）が変わってくるわけであり、実験室においてのみ発生する違いとはいえない。実際の解体工事においても柱脚部のはつりのちょっとした差異によって、転倒するかどうか大きく異なることが予想される。したがって、転倒の兆候を検出しようとする場合、警報の安全率の見込み方が重要になる。すなわち、転倒しない場合の警報発生（誤報率）がゼロにならないことを前提に、解体現場の実情を把握しながらシステム設計を行う必要がある。

4.3 作業の進捗に伴う振動特性の変化を利用した転倒兆候の検出の試行

図10に切欠き深さが異なる場合における振動特性の違いの比較を示す。ピーク（1次固有周期）に明確な差異は認められなかった。入力振動が未知であるという本研究の仮定条件（R-2）を考慮すると、部材側の固有周期の変化（剛性の変化）検出に基づく部材転倒兆候の検知は、（申請時の期待に反して）本報の範囲では難しいと判断した。

4.4 部材の傾きを利用した転倒兆候検出

図11に破壊が徐々に進行して転倒した場合の試験結果を示す。このように目視である程度、転倒への予兆が観察できる場合であっても、部材側センサの振動特性（固有周期等）の変化による検出は難しかった。図12に

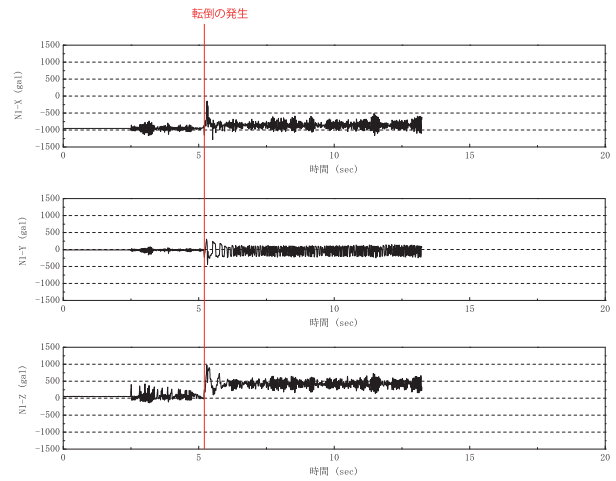


図8 測定データの例（部材側センサ）

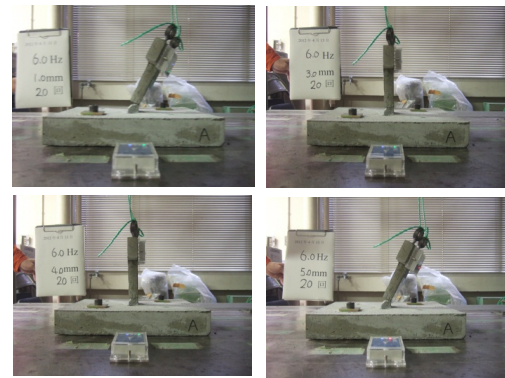


図9 入力加速度異なる振動試験の結果（加速度の小さい水準でのみ転倒した例）

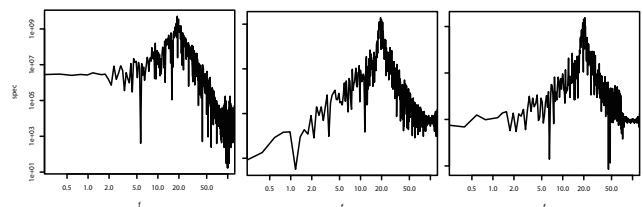


図10 切欠き深さdcの異なる場合の
パワースペクトル分布の比較
（左から、カット前、カット1回目、2回目）
（試験条件：接着あり、元の切欠き1cm、入力振動：ホワイトノイズ、最大振幅5mm）

破壊が徐々に進捗して転倒した場合の転倒前後の加速度波形を示す。転倒が近づくにつれて、（部材が傾くために）加速度が一定の方向にずれていく傾向が観察できる。図12赤線に示したように、入力の波形に関わらず、移動平均をとることで、このような部材の傾きを検出することができる。このように、部材

の傾き検出に基づく転倒兆候の判定に可能性を見出した。なお、本手法以外にも ARIMA 等の他手法についても検討したが、記載を割愛した。

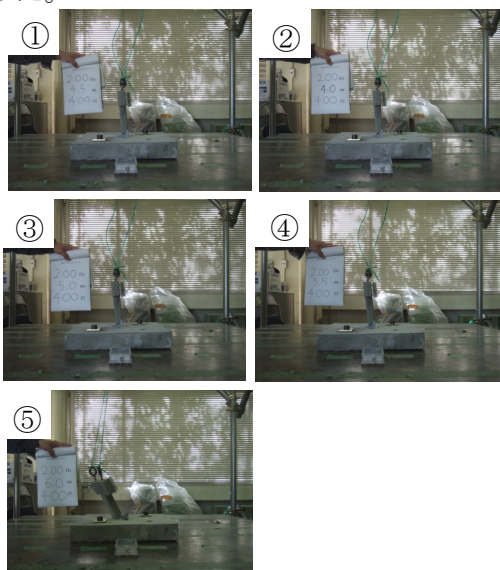


図 11 徐々に破壊が進行した場合
(部材の傾斜が進行している)

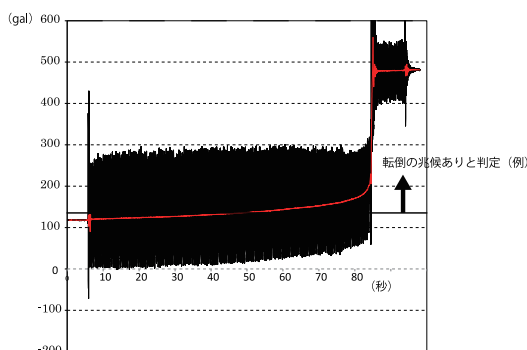


図 12 加速度の移動平均による
転倒の兆候判定 (成功例)

5. まとめと今後の課題

本研究の成果は以下のようにまとめられる。

- ・文献調査をもとに、労働安全・公衆安全を確保するための“警報システム”の構成、技術的な制約と要求条件を整理した。
- ・文献調査にもとづく事例から部材転倒模擬試験を計画・実施し、小型模擬部材における振動特性データを整備した。
- ・FFT, ARIMA などいくつかの手法を網羅的に検討して、転倒兆候の検出を試みた。その結果、部材の破壊進行によって生じる

傾きを検出する方法(加速度データの移動平均)が有効であると示唆された。

本研究には、課題が山積している。例えば、仮定や試験体モデル化の妥当性が十分に検証されていないが、これは、本質的には、RC 解体工事における知見やデータ自体が不足しているためである。これらの課題を解決するために、今後の実地試験の実施を希望している。また、重心位置や傾きによる判定が有効であるとの知見を参考に、角速度センサの検討を予定している。

謝辞

本研究の実施にあたっては、研究助成をいただきました(社)全国解体工事業団体連合会の関係各位には改めて感謝申し上げます。実験の実施にあたっては、広島大学建築材料学研究室大学院生の李亮君、高瀬勇紀君、米井亨君、平原悠生君、原龍徳君、蘇振東君および学部 4 年生の諸君にご協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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,p146, 解説図 4.6.3, 日本建築学会, 1998
- 2) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修:建築物解体工事共通仕様書・同解説 平成18年度版, p.90, 社団法人 公共建築協会, 2006
- 3) まるごと「解体工事」NOW, pp107-190, 建築技術, 2011
- 4) 解体工法研究会:新・解体工法と積算, 2003
- 5) 建設業労働災害防止協会:コンクリート工作物解体工事の作業指針, 2010
- 6) 建築研究所(監修):建築設備耐震設計・施工指針, 2005
- 7) 日本建築学会:非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領,2003
- 8) 桐田 史生, 金澤 健司, 森清 宣貴, 北村 春幸:建築物の地震損傷検知のための適応回帰型システム同定, 日本建築学会構造系論文集 (619), 65-72, 2007.09
- 9) (独)土木研究所:建設工事の振動測定要領(案)平成19年度, http://www.pwri.go.jp/team/advanced/download_page.html
- 10) 門屋真希子, 末岡伸一:建設作業振動の実態調査結果(その2), pp41-47, 東京都環境科学研究所年報, 2009