

3.6 記憶型検知センサーを用いた地震被災度の推定手法に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 15～19

担当チーム：耐震研究グループ（耐震）

研究担当者：運上茂樹，堺淳一

【要旨】

大規模地震後の建造物の被災程度，継続使用の可能性などの判断は，専門家による外観からの目視判定に頼らざるを得ないのが現状であり，専門家でなくても建造物の損傷を迅速かつ精度よく検知・判定できる技術の開発が必要とされている。これまでに，曲げ破壊する RC 柱を対象に加速度センサーを用いた被災度判定センサーを開発し，地震による被害を判定する手法を構築してきたが，今年度は近年の大規模な地震で比較的良好に見られる被災に対して本センサーの適用性を実証するために，モデル橋梁を用いた実証実験を行った。対象としたのは，軸方向鉄筋の途中定着部で曲げ破壊する RC 柱であり，これとともに曲げ破壊後に修復された RC 柱に対する適用性もあわせて検討した。これより，こうした建造物でも損傷の進展に伴い，固有周期が増加するために本手法に基づく被災度判定が可能であることを示した。

キーワード：地震被害，被災診断，鉄筋コンクリート柱，振動台加震実験，軸方向鉄筋の段落し

1. はじめに

大規模な地震が発生した場合，道路橋などのライフラインの建造物の被災状況の把握とそれに基づく災害時ネットワークの確保は，地震直後の救急救命活動，被災者の避難，救援物資輸送等の震後対応において極めて重要である。現状では，大規模地震時の建造物の被災程度，継続使用の可能性などの判断は，専門家による外観からの目視判定に頼らざるを得ないのが現状であり，被災度の定量的な判定基準がないこと，土中・水中，夜間時等の目視が困難なケースが少なくないこと，限られた人員による状況把握には多大な時間を要することなどの問題点がある。こうした背景から，専門家でなくても建造物の損傷を迅速かつ精度よく検知・判定できる技術の開発が必要とされている。

本研究は建造物の地震被災度を客観的かつ精度よく判定するための技術の開発を目標とし，建造物の損傷度合いを検知可能な被災度判定センサーの開発およびセンシングデータに基づく被災度の推定手法の構築をするものである。

これまでに，曲げ破壊する鉄筋コンクリート（RC）柱に対する振動台加震実験に基づき，被災度判定手法を構築してきた^{1,2)}が，今年度は，近年の大規模な地震で比較的良好に見られる被災に対して本センサーの適用性を実証するために，モデル橋梁を用いた実証実験を行った。対象としたのは，軸方向鉄筋の途中定着部で曲げ破壊する RC 柱であり，これとともに曲げ破壊後に修復された RC

柱，柱基部で曲げ破壊する RC 柱と曲げ破壊後に修復された RC 柱という 3 ケースに対する適用性もあわせて検討した。

2. 被災度判定手法の概要^{1),2)}

2.1 被災度判定システム

図-1 に本研究で提案する被災度判定システムを示す。本システムは，道路管理者が大規模地震発生の際の緊急点検パトロールに利用するために開発したものである。

本システムの特徴は以下に示すとおりである。

- ・ 即時の地震被災度判定が可能である。
- ・ センサーの製作および設置が安価である。
- ・ センサーが小型で設置，取り扱いが容易である。
- ・ 停電に対して非常用のバッテリーを備えている。

本システムは，2.2，2.3 に示す被災度判定手法から橋脚の損傷度をセンサーにより検知する子機（被災度判定センサー），子機で得られた橋脚の損傷度を表示する親機，無線により子機から親機にデータを転送するための中継器から構成される。子機は，損傷を検知するために橋脚天端上に，中継器は子機と親機からの無線通信の電波に障害のない場所として照明柱等に，親機は点検パトロールの車中に設置する。

本システムを利用することにより，大規模地震後の緊急点検パトロール中に道路管理者は走行する車中で橋梁

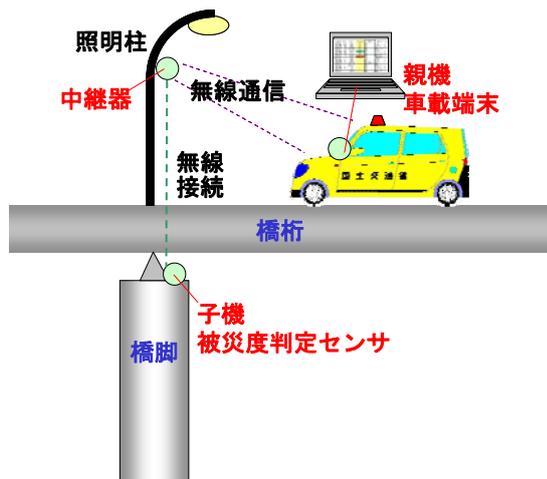


図-1 被災度判定システムの概要

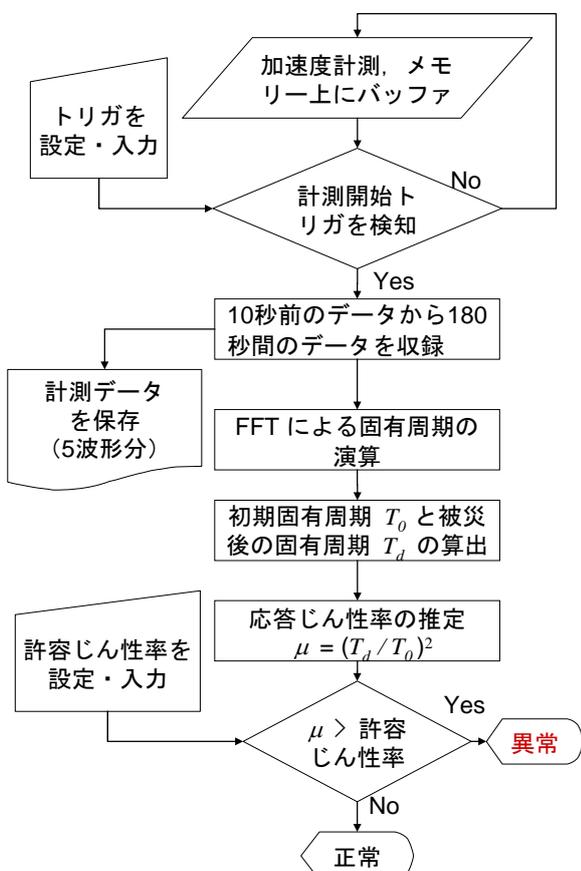


図-2 被災度判定フロー

の地震被災度に関する情報を収集することが出来る。

2.2 被災度判定フロー

被災度を判定するフローを図-2に示す。センサーは常時、応答加速度を計測し、メモリ上にバッファしている。ユーザーが設定した計測開始トリガを検知すれば、そこからある所定の時間（ここでは、これを遅延時間とよび、10秒とした）だけさかのぼった点をデータ収録開始点として、それから180秒間のデータ（応答加速度）を収録

する。これまでの研究により、図-3に示すように基部で曲げ破壊するタイプのRC橋脚ではある一定時間（ここでは、これをFFT演算時間とよび、10秒とした）の応答加速度データに対する高速フーリエ解析（FFT）の演算により卓越振動数を検出することで、地震損傷によるRC橋脚の固有周期の変化を評価できることが明らかになっており、本手法ではこの特性を用いて、被災度を判定することとしている。

被災度判定センサーでは、計測完了後、FFTの演算を行い、被災前の健全な状態の初期固有周期 T_0 と地震後の被災した状態の固有周期 T_d から後述する式(5)に基づいて応答じん性率を推定し、これに基づき橋脚の被災度を判定する。

ここで、被災前の健全な状態と被災後の固有周期 T_0 、 T_d をどのように定義するかが重要であるが、本研究ではこれらを図-3のようにして定めることとした。まず、初期固有周期 T_0 はセンサーの設置時などに常時微動や交通振動による橋脚の常時振動をあらかじめ計測した結果に基づき定める。計測開始トリガから遅延時間だけさかのぼった時点は、地震応答が始まる前を想定しているため、この時点の固有周期は初期固有周期 T_0 に一致する。被災後の固有周期 T_d については、地震終了判定トリガを最後に下回った後、地震応答収束時間（ここでは20秒とした）を経過した段階の固有周期 T_{d-end} を用いる場合と最大応答加速度が生じた時刻の固有周期 $T_{d-a-max}$ を用いる場合、これらの大きい方を用いる場合の3ケースを考慮することとした。

計測開始トリガと地震終了判定トリガについては、実橋梁において常時の交通振動に対する計測を行った結果をもとに設定した。計測の結果、交通振動による橋脚天端の水平加速度は最大でも両振幅で20gal (0.2 m/sec²)程度であったことから、ここでは計測開始トリガ、地震終了判定トリガをともに片振幅で50gal (0.5 m/sec²)とすることとした。

2.3 被災度判定手法

本研究で提案する被災度判定手法は、構造物を1質点系の振動モデルに簡略化し、こうした振動モデルの固有周期の変化に基づき構造物の最大応答変位を推定し、これにより被災度を判定する手法である。

構造物の慣性質量、剛性をそれぞれ M 、 K とすると、振動モデルの固有周期 T は次式のようになる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (1)$$

ここで、地震前の健全な状態の固有周期、剛性をそれ

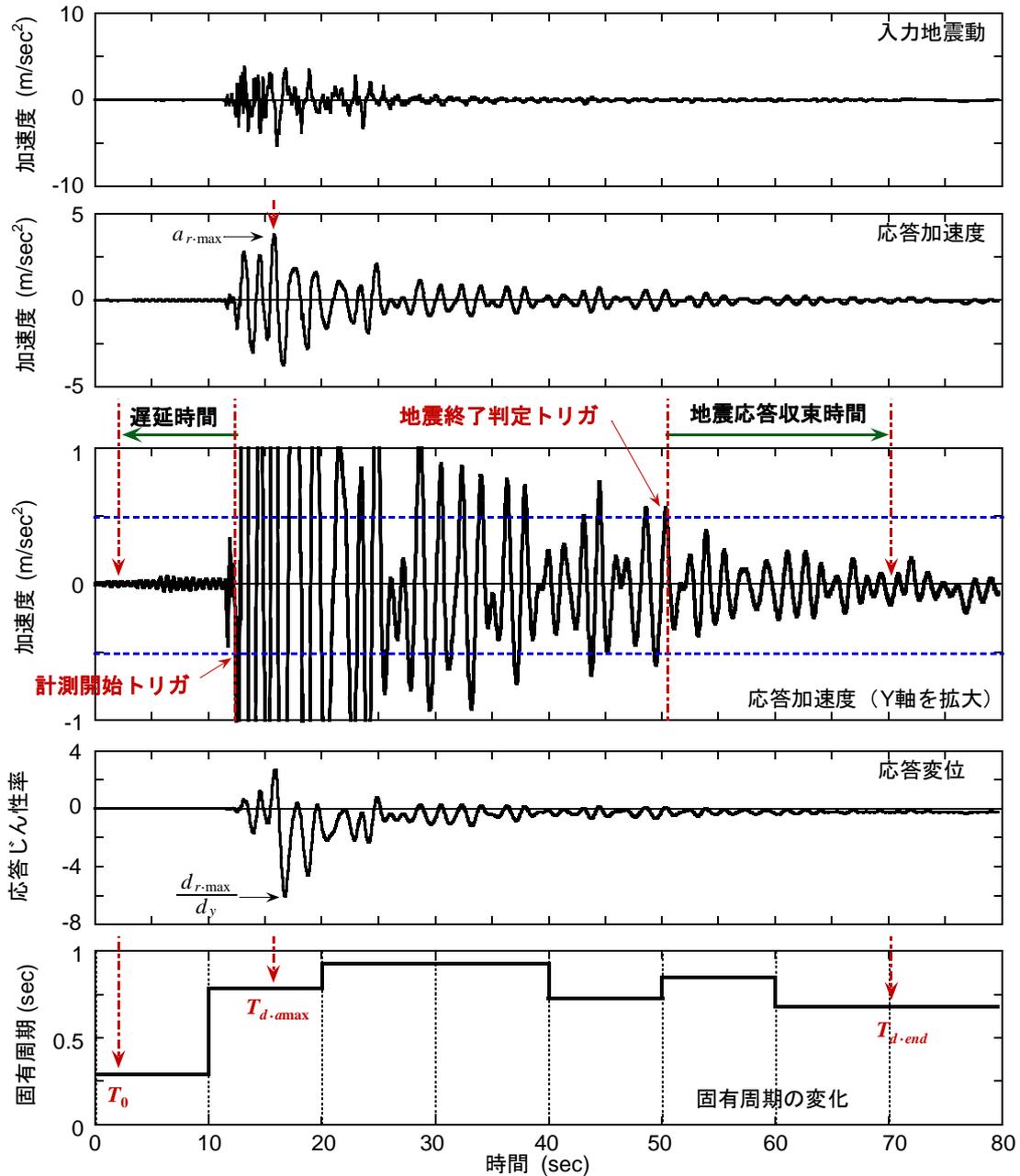


図-3 地震応答，固有周期の変化と計測開始トリガ，地震終了判定トリガ

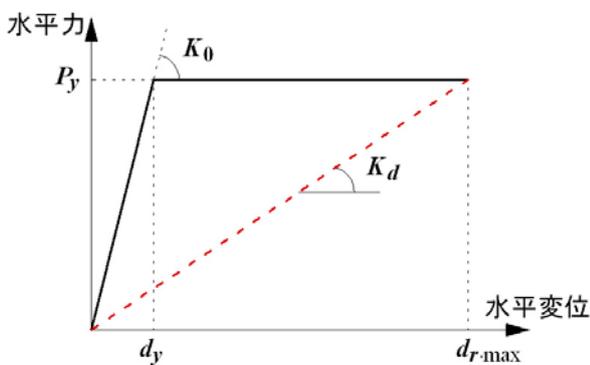


図-4 損傷前後の剛性

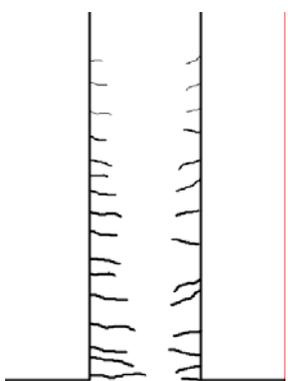
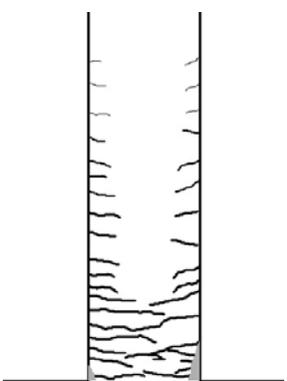
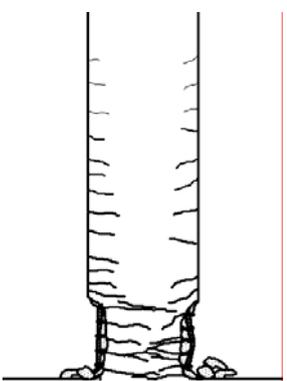
ぞれ T_0 ， K_0 とし，地震後の被災した状態の固有周期，剛性をそれぞれ T_d ， K_d とすると，被災前後の固有周期の変化は次式で与えられる。

$$\frac{T_d}{T_0} = \sqrt{\frac{K_0}{K_d}} \quad (2)$$

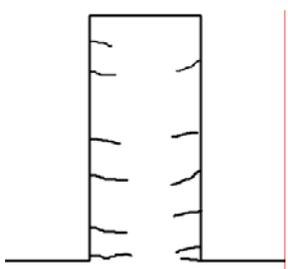
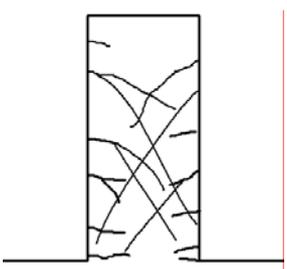
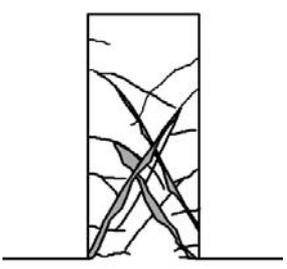
ここで，構造物が図-4 に示すような弾完全塑性型の骨格曲線を有すると仮定すると，被災前の健全な状態の剛性 K_0 は，降伏荷重 P_y ，降伏変位 d_y を用いて次式で与えられる。

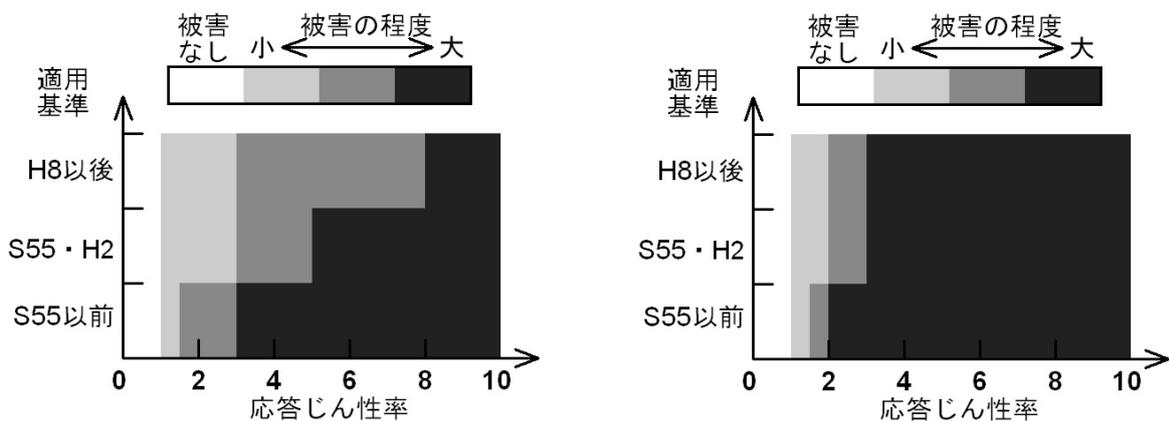
表-1 RC柱の損傷と応答じん性率の関係

(a) 基部で曲げ破壊し、変形性能が期待できる場合（せん断支間比の目安 ≥ 3 ）

被害の程度	小	中程度	大
応答じん性率	3以下	3~6程度	6程度以上
損傷のイメージ	 曲げひび割れの発生	 かぶりコンクリートの浮き・軽微な剥落	 かぶりコンクリートの剥落 軸方向鉄筋の座屈 帯鉄筋のゆるみ

(b) せん断破壊する場合（せん断支間比の目安 < 3 ）

被害の程度	小	中程度	大
応答じん性率	1以下	1~3程度	3程度以上
損傷のイメージ	 曲げひび割れのみ	 斜めひび割れの発生 ひび割れ幅小	 斜めひび割れの進展 ひび割れ幅大



(a) 基部で曲げ破壊する場合

(b) せん断破壊する場合および
軸方向鉄筋の途中定着部で損傷する場合

図-5 適用基準に応じた被災度の判定法（暫定提案）

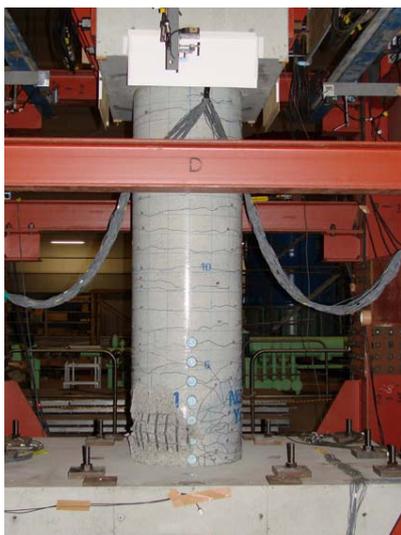


図-6 基部で曲げ破壊するタイプの損傷例

$$K_0 = \frac{P_y}{d_y} \quad (3)$$

被災した後の剛性 K_d は、構造物の履歴特性に依存するが、これを仮に最大応答変位 $d_{r,max}$ に対する割線剛性で与えると次式で表される。

$$K_d = \frac{P_y}{d_r} \quad (4)$$

式(3)、(4)を式(2)に代入し、応答変位に関して整理すると次式が得られる。

$$\mu = \frac{d_{r,max}}{d_y} = \left(\frac{T_d}{T_0} \right)^2 \quad (5)$$

応答じん性率 μ は、構造物の損傷度合いに密接な関係があるため、これにより構造物の被災度を推定する。

表-1 に柱基部で曲げ破壊するタイプの RC 柱とせん断破壊するタイプの RC 柱を例に損傷の程度と応答じん性率の関係を示している。これまでの研究によれば、昭和 55 年以降の基準により設計された柱基部で曲げ破壊するタイプの RC 柱では、応答じん性率が 3 程度までは曲げひび割れ程度の損傷が生じ、応答じん性率が 5~8 程度になるとかぶりコンクリートの浮きや軽微な剥落が見られるようになり、これ以上の変形によりかぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈、帯鉄筋のゆるみ等の損傷が生じることが明らかになっている。一方、昭和 55 年以前の基準による RC 柱は、これより小さい応答じん性率で損傷が生じる。曲げ損傷からせん断破壊するタイプで

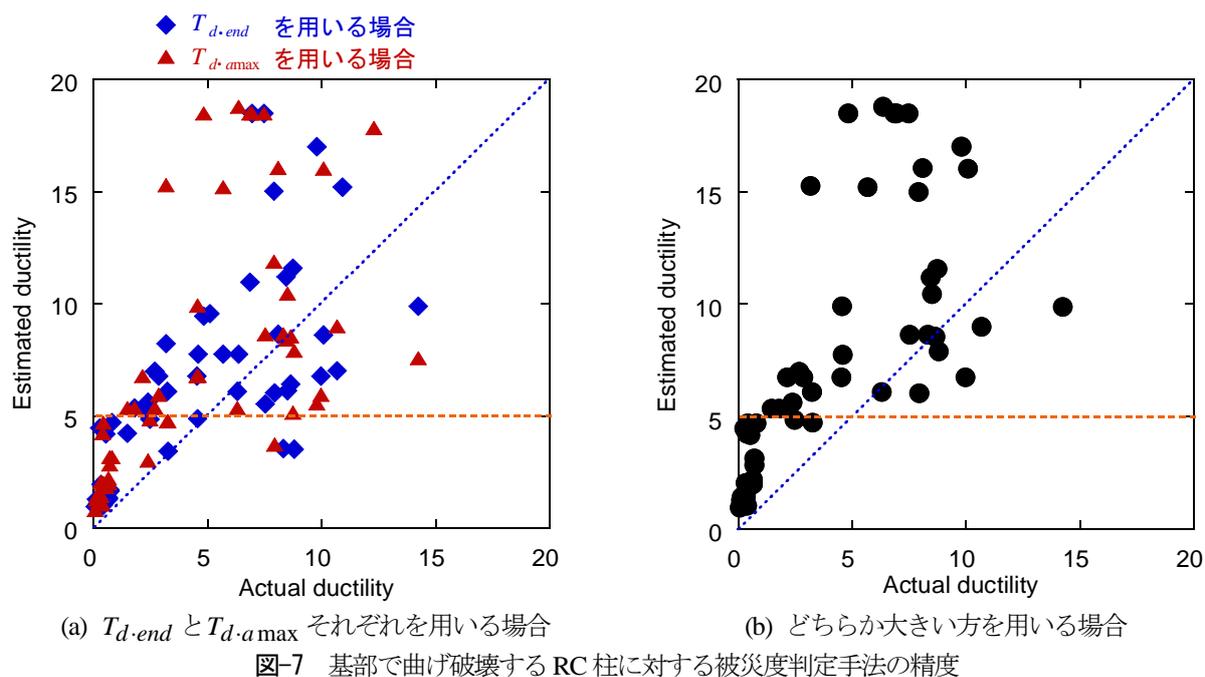
は、曲げにより軸方向鉄筋が降伏し、水平ひび割れが発生した後、じん性率の増加に伴い、斜めひび割れの発生・進展と損傷が進み、最終的に脆性的に破壊する。

これまでの実験データに基づき、被災度判定において被害の程度を「大」と判定する応答じん性率としては、適用基準、破壊形態、構造形式によって図-5 のように設定することとした。せん断破壊等、実験データやパラメータが十分ではない点もあることから、ここでは暫定提案とした。今後、実被害とのキャリブレーション等を行うことにより、調整する必要がある値である。柱基部で曲げ破壊するタイプの RC 柱では、応答じん性率は、昭和 55 年以前、昭和 55・平成 2 年、平成 8 年以降の基準による RC 柱に対して、それぞれ 3, 5, 8 とした。せん断破壊するタイプでは、昭和 55 年以前と以後の基準による RC 柱に対してそれぞれ 2, 3 とした。また、軸方向鉄筋の途中定着部に損傷が生じる RC 柱では、3 章に示すように破壊形態が曲げ破壊であっても変形性能は期待できず、こうした損傷からせん断破壊が生じる可能性もあることから、破壊形態にかかわらずせん断破壊するタイプと同じ判定を用いることとした。なお、一般の RC 柱ではせん断支間比が 3 程度以上となると曲げ破壊タイプとなり、これ以下の場合にはせん断破壊タイプとなると言われており、これを破壊形態判定の際の目安とすることができる。

2.4 柱基部で曲げ破壊タイプの RC 柱に対する被災度判定手法の精度

本手法の精度は、これまでの研究により図-6 に示すような柱基部で曲げ破壊するタイプの RC 柱に対する振動台実験結果をもとに評価した。図-7 は RC 柱模型 12 体に対する 62 ケースの実験を用いて、応答じん性率の推定精度を評価した結果である。なお、ここで、実験で用いた時間軸の相似率にあわせて、FFT 演算時間、遅延時間、地震応答収束時間を 2.2 に示した値からそれぞれ変化させている。また、RC 柱の固有周期を検出するために、基本的には 0.5 Hz, 10 Hz (0.1 秒, 2 秒) を上下の遮断振動数としたバンドパスフィルターを用いている。

図-7 によれば、用いる被災後の固有周期によって推定精度にはばらつきがあり、地震応答収束時間を経過した段階の固有周期 $T_{d,end}$ を用いる場合よりも、最大応答加速度が生じた時刻の固有周期 $T_{d,a,max}$ を用いる方が、応答じん性率を大きめに評価する傾向にあることが分かる。また、 $T_{d,end}$ と $T_{d,a,max}$ のどちらか大きい方を用いるとする場合、応答じん性率が 7 程度以下であれば、本手法による推定応答じん性率は、変位計の計測に基づく実際の応答じん性率の同程度以上の評価となっており、本手法によって RC 柱の被災度を大きめに推定できている。



実際の応答じん性率が 7 を超えるケースでは、応答じん性率を小さめに推定する場合もあるが、表-1、図-5 に示したように、じん性率 7 を超える範囲はほぼ大被害となっており、注意が必要な被災と判定することができる。

3. 軸方向鉄筋段落し部で曲げ破壊する RC 柱とこれを修復した柱に対する適用性

ここでは、近年の大規模な地震において比較的良好に見られる被害に対する適用性を実証するために、軸方向鉄筋が途中定着されており、その箇所付近で曲げ破壊するタイプの RC 柱を対象とすることとした。また、本手法の適用範囲の拡大を目的として、これを修復した柱もあわせて対象とした。これらをそれぞれ段落し部損傷実験、段落し部修復実験と呼ぶ。

図-8 は加震振幅 70% の実験を例に、固有周期の変化を示した結果である。ここで、遅延時間、地震応答収束時間は相似則を考慮してそれぞれ 5 秒、5 秒、10 秒とした。また、RC 柱の固有周期を検出するために、基本的には 0.5 Hz、10 Hz (0.1 秒、2 秒) を上下の遮断振動数としたバンドパスフィルターを用いている。これによれば、主要動が入力されて RC 柱が大きく応答するときに固有周期は最大となり、応答が減衰するにつれて低下する傾向にあることが分かる。ただし、X (橋軸直角) 方向については振動の初期部分の固有周期が、Y (橋軸) 方向については 25 秒過ぎの固有周期が、それぞれよく検出できていないが、これらには振動台自体の固有振動特性の影響が含まれた可能性がある。これを除けば、本手法により段落し部損傷実験、修復実験のいずれのケースに対しても

固有周期の変化をとらえることができています。

被災度判定手法を用いて柱天端の応答加速度により応答変位を推定した結果を図-9 に示す。ここで、推定じん性率は式(5)により求めている。なお、RC 柱の降伏変位は 18 mm とし、これを実際の応答じん性率の算定に用いた。被災前の健全な状態の固有周期 T_0 にはいずれの加震においても 10% 加震の前の無損傷の状態の周期を用いている。これによれば、被災度判定手法による応答じん性率は実際に生じた応答じん性率よりも大きめに評価されること、地震応答収束時間を経過した段階の固有周期 $T_{d\cdot end}$ を用いる場合には実際よりも小さめに評価される場合もあるが、 $T_{d\cdot end}$ と $T_{d\cdot amax}$ のどちらか大きい方を用いれば、本手法による推定応答じん性率は、変位計の計測に基づく実際の応答じん性率の同程度以上の評価となっており、本手法によって RC 柱の被災度を大きめに推定している。以上より、本手法により軸方向鉄筋の途中定着部で曲げ破壊するタイプの RC 柱およびこれを修復した柱の応答じん性率をおおむね推定できる。

4. 柱基部で曲げ破壊する RC 柱とこれを修復した柱に対する適用性

ここでは、本手法の適用範囲の拡大を目的として、柱基部で曲げ破壊するタイプの RC 柱およびこれを修復した柱を対象として、提案する手法の適用性を評価することとした。これらをそれぞれ柱基部損傷実験、柱基部修復実験と呼ぶ。

図-10 は加震振幅 120% の実験を例に、固有周期の変化を示した結果である。また、被災度判定手法を用いて柱

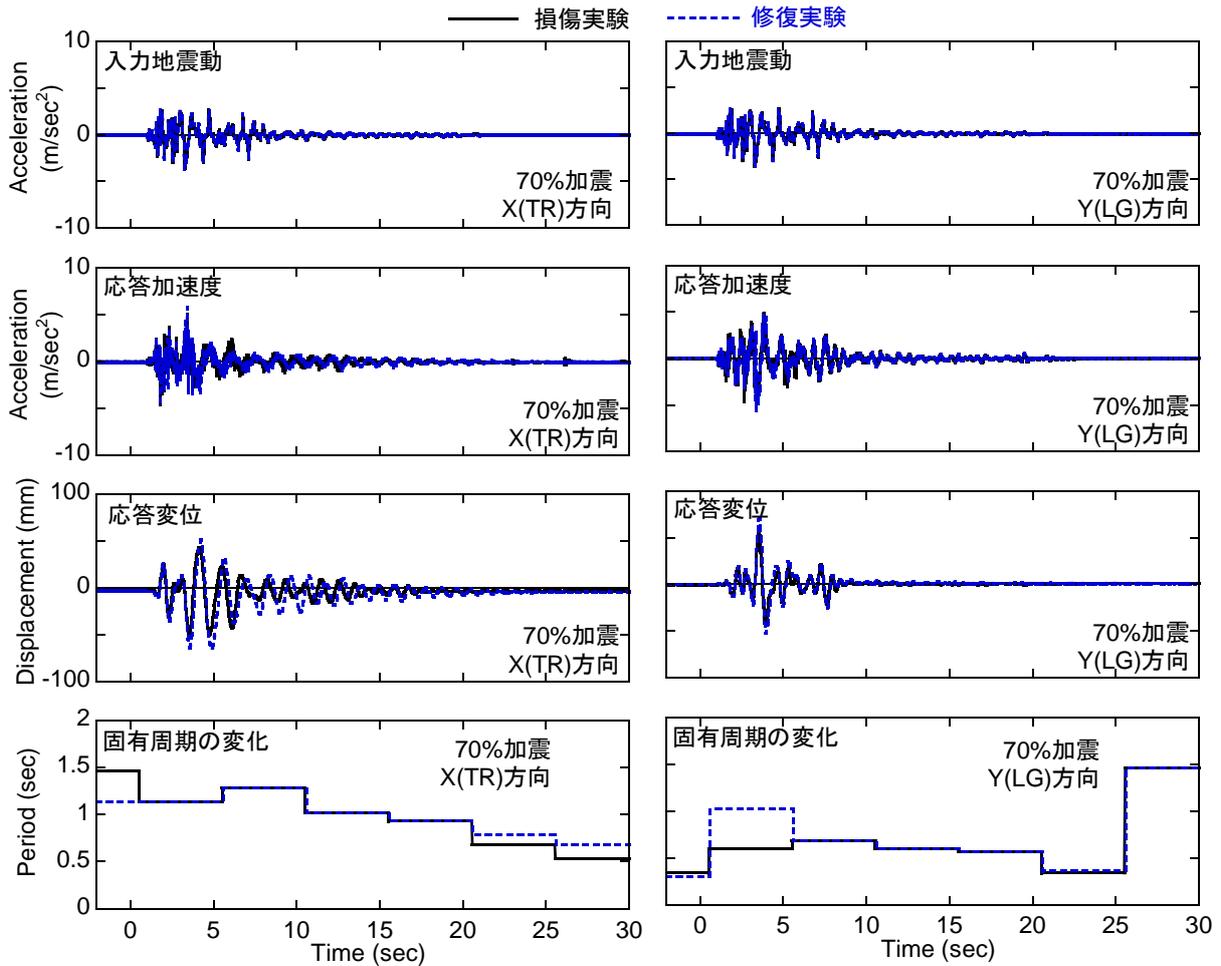


図-8 段落し部損傷実験と修復実験の地震応答と固有周期の変化

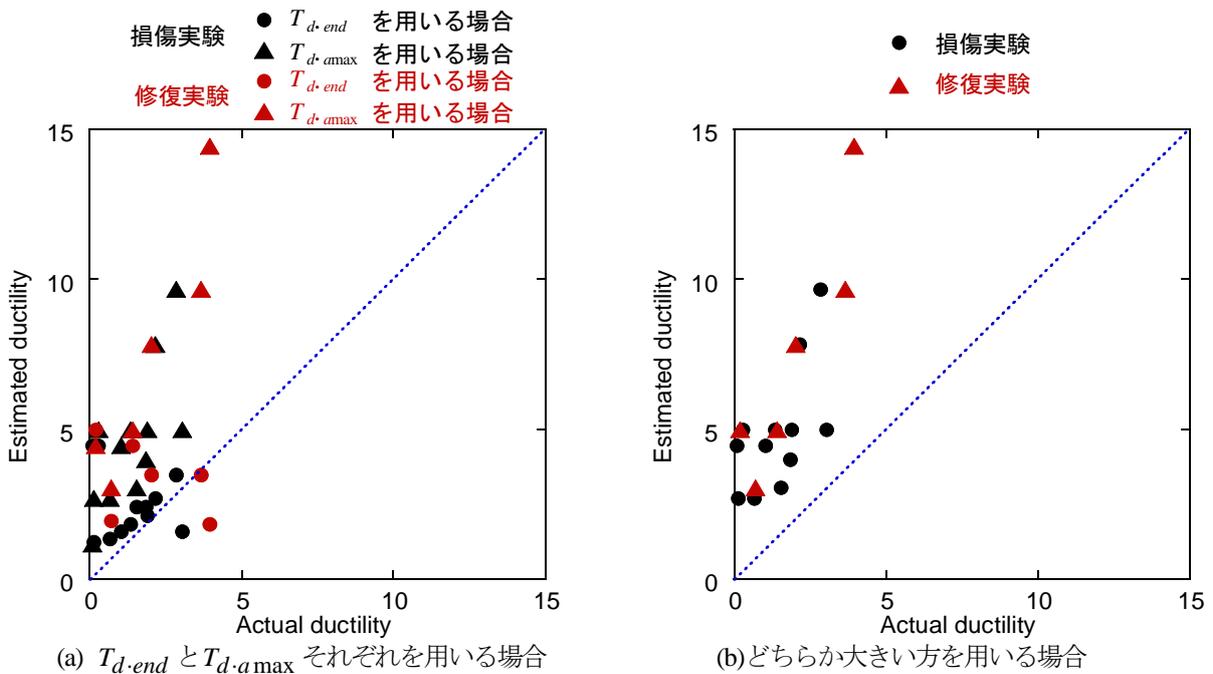


図-9 段落し部損傷実験と修復実験に対する被災度判定手法の精度

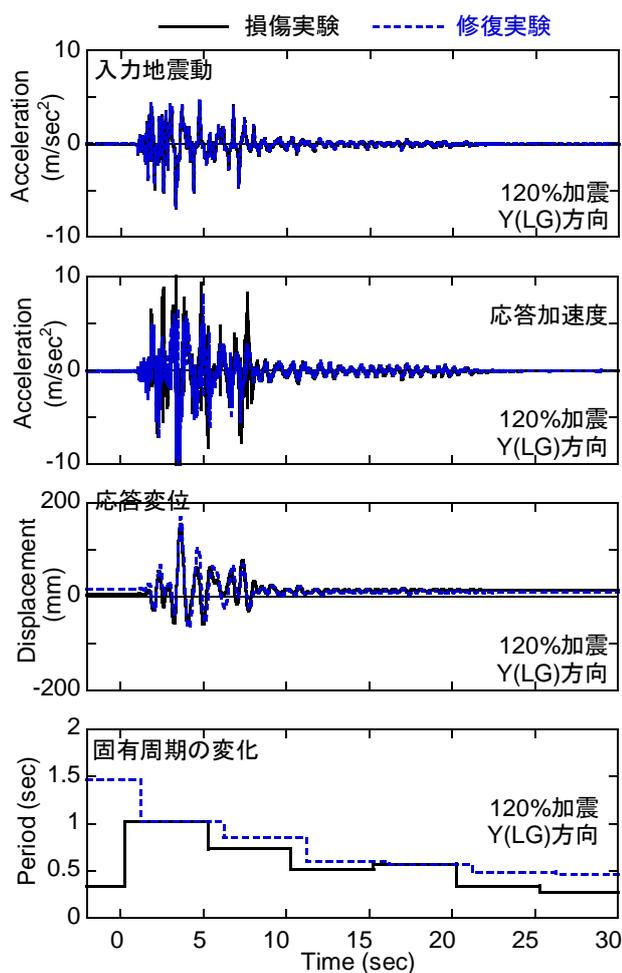
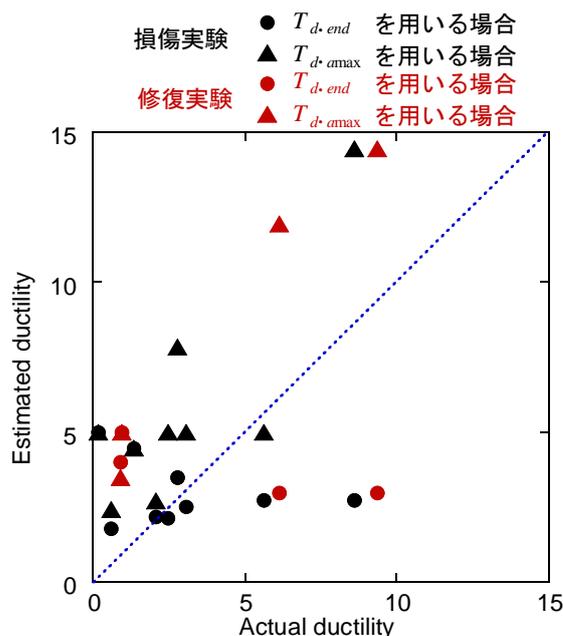


図-10 基部損傷実験と修復実験の地震応答と固有周期の変化

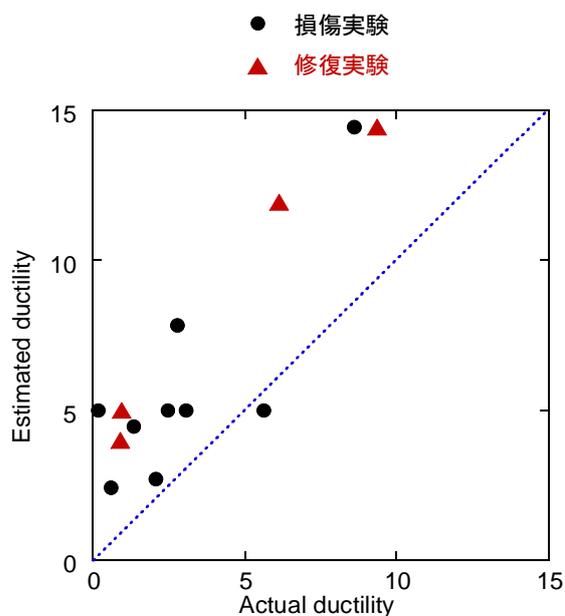
天端の応答加速度により応答変位を推定した結果を図-11に示す。被災前の健全な状態の固有周期 T_0 にはいずれの加震においても3章に示した実験の10%加震の前の無損傷の状態の周期を用いている。なお、RC柱の降伏変位=18mmを用いて実際の応答じん性率を算定した。

ここでも、地震応答収束時間を経過した段階の固有周期 T_{d-end} を用いる場合には実際よりも小さめに評価される場合もあるが、 T_{d-end} と $T_{d-a max}$ のどちらか大きい方を用いれば、本手法による推定応答じん性率は、変位計の計測に基づく実際の応答じん性率の同程度以上の評価となっており、本手法によってRC柱の被災度を大きめに推定できている。

以上より、本手法により柱基部で曲げ破壊するタイプのRC柱およびこれを修復した柱の応答じん性率をおおむね推定できる。



(a) T_{d-end} と $T_{d-a max}$ それぞれを用いる場合



(b) どちらか大きい方を用いる場合

図-11 柱基部損傷実験と修復実験に対する被災度判定手法の精度

5. まとめ

大規模な地震で比較的良好に見られる被災に対して、曲げ破壊する鉄筋コンクリート構造物の地震被災度を迅速に検知・判定するために開発した手法の適用性を実証するために、また、本手法の適用範囲の拡大のためにモデル橋梁を用いた実証実験を行った。対象としたのは、軸方向鉄筋の途中定着部で曲げ破壊するRC柱と曲げ破壊後に修復されたRC柱および柱基部で曲げ破壊するRC柱

と曲げ破壊後に修復された RC 柱の 4 ケースである。

これより、本研究で対象としたいずれのケースに対しても地震応答収束時間を経過した段階の固有周期 T_{d-end} を用いる場合には実際よりも小さめに評価される場合もあるが、 T_{d-end} と $T_{d-a\max}$ のどちらか大きい方を用いれば、本手法による推定応答じん性率は、変位計の計測に基づく実際の応答じん性率の同程度以上の評価となっており、本手法によって RC 柱の被災度を大きめに推定できることを示した。

参考文献

- 1) 小林寛, 運上茂樹, 加納匠: 加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発, 土木学会地震工学論文集 Vol. 28, CD-ROM No. 023, 2005.
- 2) Sakai, J. Kobayashi H. and Unjoh, S.: Quick Earthquake Damage Detection Method for Bridge Structures, Proc. of World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, Chongqing, China, 2007.

DEVELOPMENT OF ESTIMATION METHOD FOR SEISMIC DAMAGE USING ADVANCED SENSOR

The objective of this study is to develop sensing technology to estimate the seismic damage of structures using advanced sensors. The method that evaluates seismic damage of reinforced concrete columns that fail in flexure had been developed in the past study. In FY 2007, to evaluate the applicability of the method to other type of structures, a series of shake table tests was conducted for reinforced concrete columns that fail in flexure at early termination point of longitudinal reinforcement, and that were repaired after seismic damage.

Keywords: seismic damage, damage detection, reinforced concrete column, shake table test