

2016 熊本地震：前震-本震による応答増幅特性
に関する報告
-観測記録地震動に基づく解析的評価-

2016年5月6日報告(5/9加筆版)

埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター教授 齊藤正人

1. 概説

平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分及び 16 日 1 時 25 分、熊本県熊本地方を震源とする連続した内陸型地震が発生した。前者は震源深さ 11km、Mw6.2 の前震、後者は震源深さ 12km、Mw7.0 の本震と位置付けられている。これら一連の地震により、熊本県上益城郡益城町で最大震度 7 が 2 回観測されると同時に、甚大な被害が観測されている。

本報告は、今回の連続した 2 つの地震が構造物に如何なる影響を及ぼすのかという点に着目し、その特性について述べる。本報告では、KiK-Net（観測点 KMMH16 益城）の地震観測記録波形を用い、1) 前震（第 1 波）-本震（第 2 波）、2) 前震のみ、3) 本震のみ、の 3 つのシナリオを計算する。まず 1) と 2) の比較により、前震から本震への連続作用が構造物に及ぼす影響を評価する。次に、1) に対する、2) 3) の最大値との比較により、連続作用が応答増幅を誘発させた可能性について検証する。構造物は、繰り返しによる強度低下等の影響を入れないもの、入れたものの 2 種類を評価するため、それぞれ最大応答値（応答塑性率）と Damage Index により評価した。

本解析の結果、前震から本震への連続作用によって、前震で損傷した構造物が長周期化し、本震の 1s 近傍の卓越成分と共振した可能性が示唆された。また、連続作用による応答増幅は、繰り返し回数の影響を入れた場合に顕著に現れ、Damage Index は最大で 2 倍強の増幅が生じることが明らかとなった。このことから、独立して前震、本震を作用させたときに生じるダメージよりも、連続した作用によるダメージの方が大きい場合のあることが示唆された。

2. 解析方法

本解析では、バイリニア型骨格曲線を持つ最大点指向型の Clough モデルを用いた非弾性 1 自由度解析を行う。減衰定数は 5%とし、弾性固有周期 T を 0.1s から 1.5s、降伏震度 k_y を 0.1 から 1.5 の範囲で、それぞれ 0.01s、0.02 刻みで全ての組み合わせを解析し、各最大応答変位（応答塑性率）を求める。解析後、1 波のみの最大応答値と第 1 波-第 2 波連続入力による最大応答値の比を、各組合せに対して求める。これを弾性固有周期（横軸）と降伏震度（縦軸）のグラフ上にコンターマップとしてプロットする。同時に、最大応答点と原点を結ぶ割線剛性から等価固有周期を求め、これを同時にプロットする。繰り返しによる影響は、Park and Ang[1]の Damage Index を用いて近似的に評価する（終局変位 $\delta_u = 4\delta_y$ （降伏変位の 4 倍）とし、エネルギー項の係数 $\beta=0.05$ と仮定）。

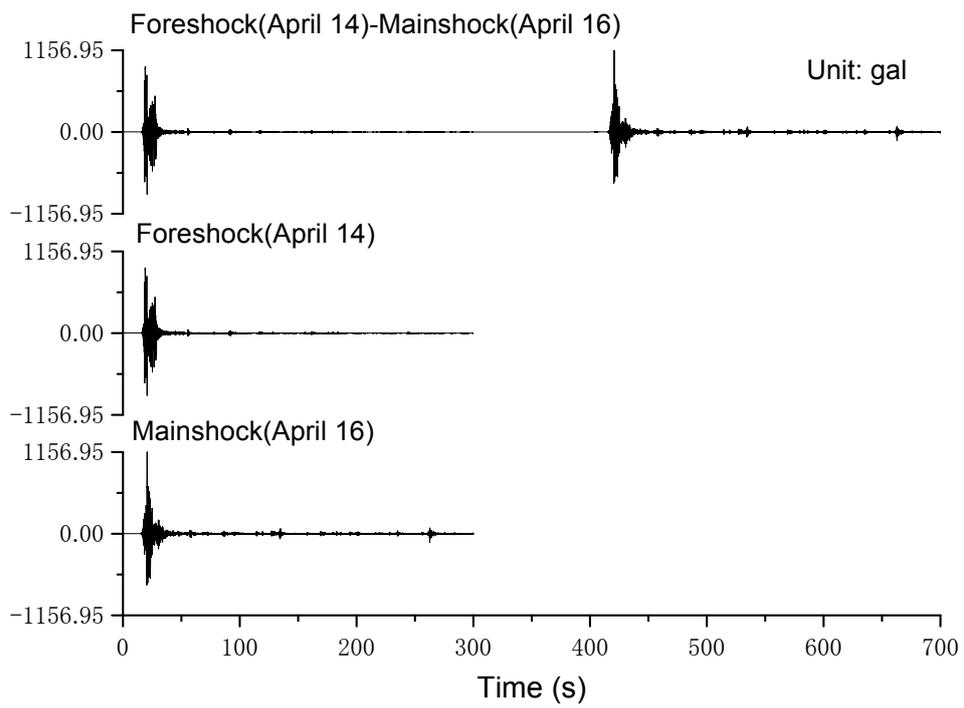


図1 本解析で用いた入力地震動 (KiK-Net 観測点 : KMMH16 益城)

3. 解析結果

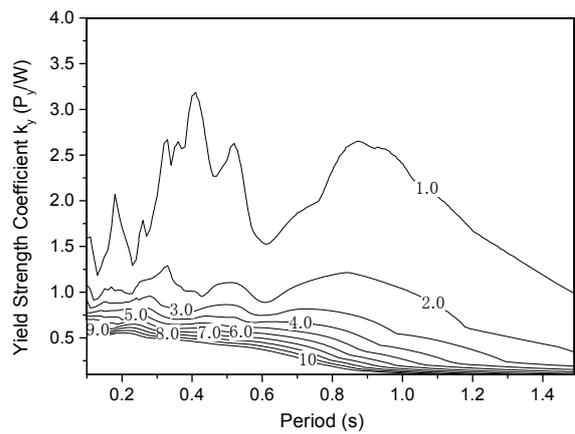
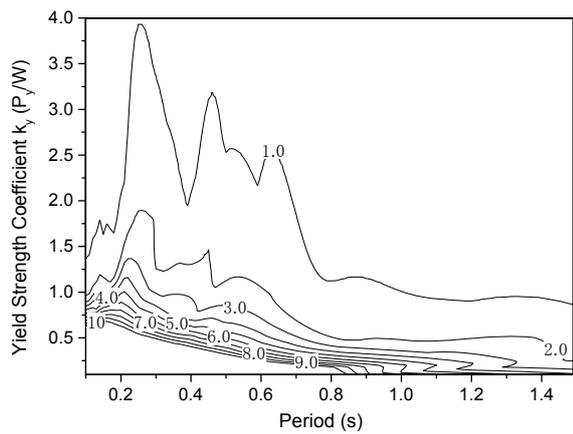
3. 1 応答塑性率

図2に示す非弾性応答スペクトルを対比すれば、概して前震は0.2sから0.7sの短周期成分が卓越しており、本震は0.2sから0.5sの短周期側の卓越に加えて、0.9sから1.1sに亘る長周期成分をピークに持つことがわかる。前震、本震を同時に作用させた非弾性応答スペクトルは、一見するとこれらを重ね合わせたような応答スペクトルを示している。

図3(a)の応答比率からは、前震に続く本震の作用によって応答が2.6倍程度に増幅する領域が確認できる。また、応答増幅倍率が大きい領域は、前震によっておよそ1s程度に長周期化した構造物に一致することがわかる。この周期は、本震の長周期側の卓越周期(0.9s-1.1s)に一致する。これにより、この領域の構造物はある種の共振現象が生じて損傷が増大したと推察されるが、下記の検討により別の領域でそうした共振現象が生じたと考えられる。

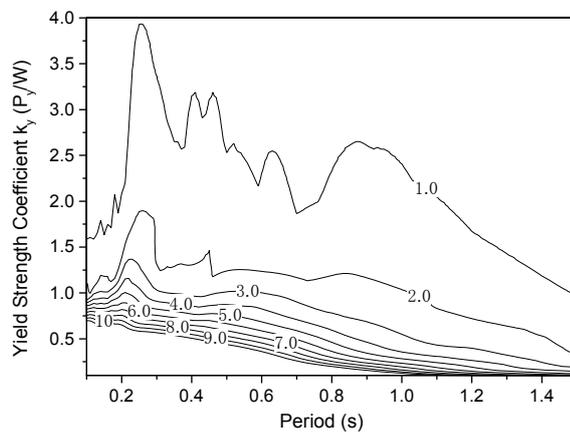
図3(b)は、前震・本震が連続して作用した際の構造物の最大応答と、前震・本震が独立して作用した際の構造物の最大応答の比率をコンターで示している。つまり、本震1波によって構造物の損傷が生じたのか否かという点について、この図から確認することができる。図3(b)によれば、連続することにより損傷が拡大したと思われる構造物は、第1波により固有周期が0.6s-0.9sに長周期化した構造物で、降伏震度が0.6から1.0と比較的高いものであると解釈できる。一方で、上述した1s程度に長周期化した構造物の領域では、応答倍率が1に近い。そのため、上記の推察に反して、この領域では本震1波による損傷の寄与が非常に高いと判断される。

図3(c)には、前震と本震を連続して作用させた場合の非弾性固有周期をコンター図上に示す。この図を見ると、連続作用によって応答増幅が生じた領域は、連続作用の非弾性固有周期が1sの領域に一致する。つまり、弾性固有周期が0.4sから0.6sだった構造物が、前震によって損傷したことにより固有周期が長周期化(0.6s-0.9s)、これに本震が作用して損傷が進展し更に長周期化(0.9s-1.1s)したと推察される。これは推測であるが、前震により損傷して固有周期が1s程度に長周期化した構造物は、主に接線剛性上の挙動であることから、入力に対して逆位相(免震状態)のモードで振動している可能性が高い。そのため、本震によって応答増幅が生じるのは、非弾性固有周期が1sよりも小さい構造物となったと思われる。



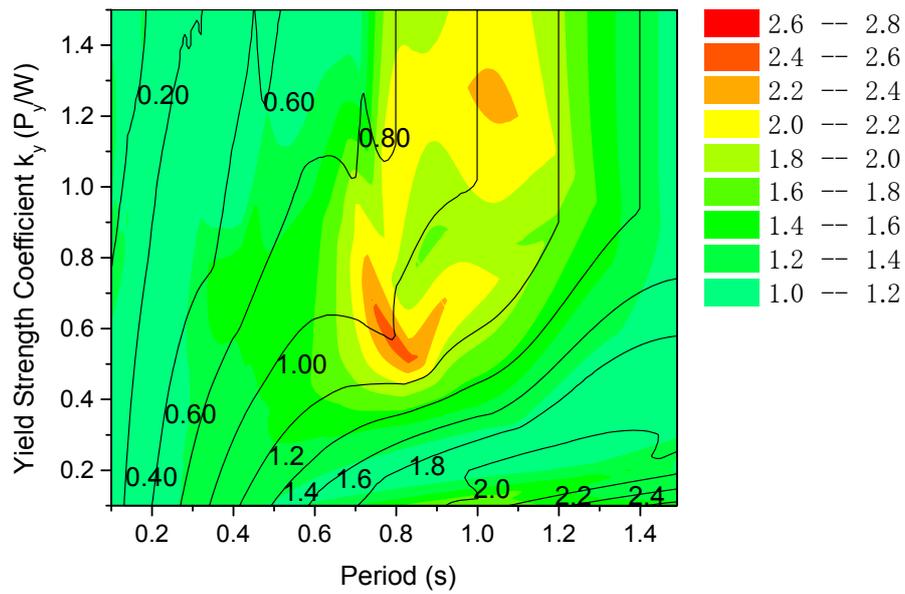
(a) 前震(4/14)による非弾性応答スペクトル

(b) 本震(4/16)による非弾性応答スペクトル

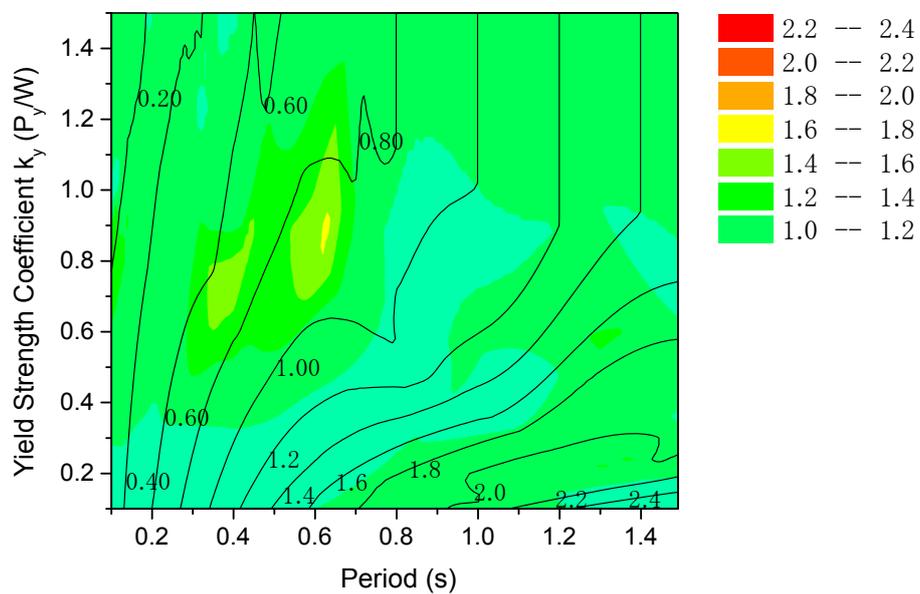


(c) 前震(4/14)と本震(4/16)を連続して作用させた非弾性応答スペクトル

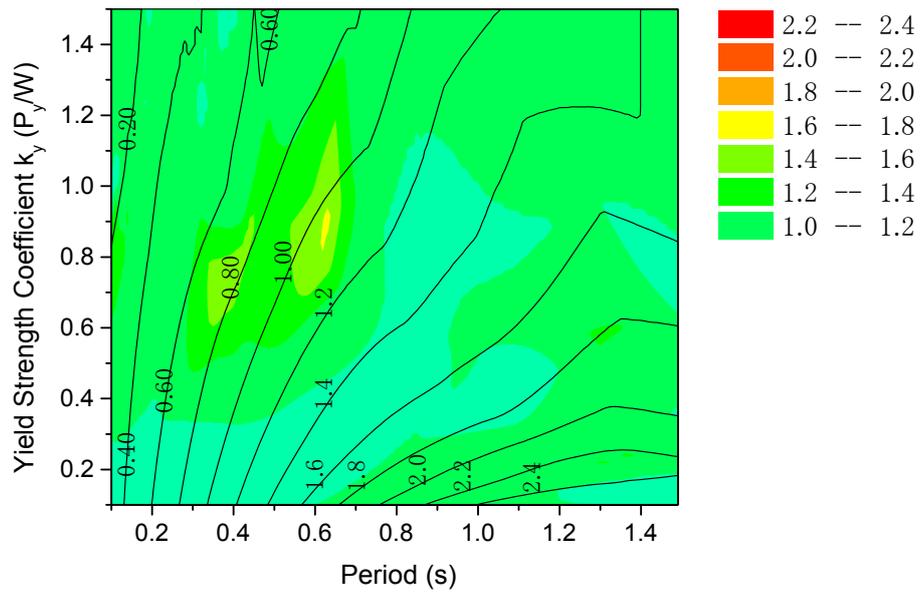
図2 非弾性応答スペクトル (図中、数値は応答塑性率)



(a) 前震(4/14)と本震(4/16)の連続作用による応答値と前震(4/14)の応答値の比のコンター図
 (図2の(c)を(a)で除した値) -前震を受けた際の非弾性等価固有周期(s)を図上にプロット



(b) 前震(4/14)と本震(4/16)の連続作用による応答値と前震(4/14)・本震(4/16)の最大応答値の比の
 コンター図 (図2の(c)を(a)(b)の最大値で除した値) -前震を受けた際の非弾性等価固有周期(s)を
 図上にプロット

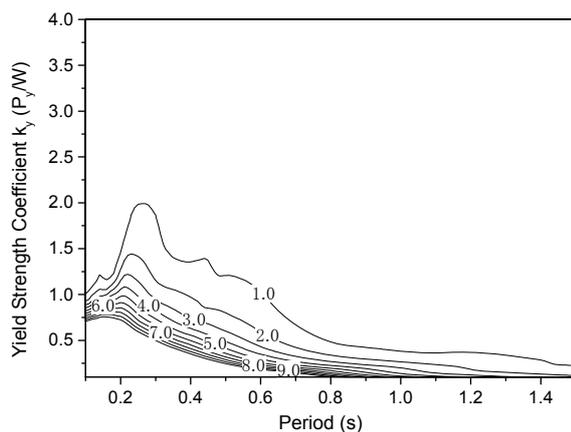


(c) 前震(4/14)と本震(4/16)の連続作用による応答値と前震(4/14)・本震(4/16)の最大応答値の比のコンター図 (図2の(c)を(a)(b)の最大値で除した値) -前震・本震を受けた非弾性等価固有周期(s)を図上にプロット

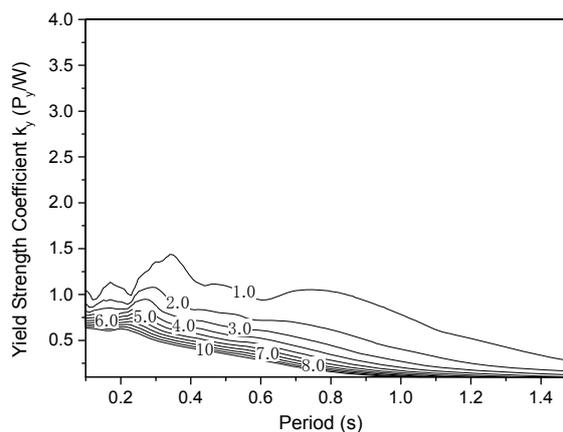
図3 非弾性応答スペクトル比 (図中、カラーコンターは応答塑性率の比、ライン上の数値は非弾性等価固有周期)

3. 2 損傷指標：Damage Index (繰り返しによる損傷程度の進行を考慮)

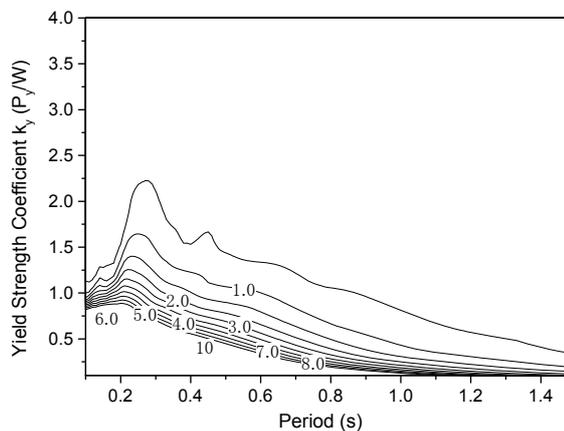
損傷指標を用いたものは、応答塑性率を用いた評価と同様の傾向を示す。また、上述した前震-本震による損傷増加の特性が低い降伏震度の領域においても明確に現れている。(ただし、この損傷増加の全てが本震による共振効果とは言い難い。なぜならば、DIは繰り返しの効果が加算されるため、作用時間の長い前震-本震のケースの方が、独立した入力作用時に比べて損傷が進展する結果となるからである。特に、降伏震度の低いものはその影響が強く出るものと思われる。(加筆 2016.05.09))



(a) 前震(4/14)による Damage Index

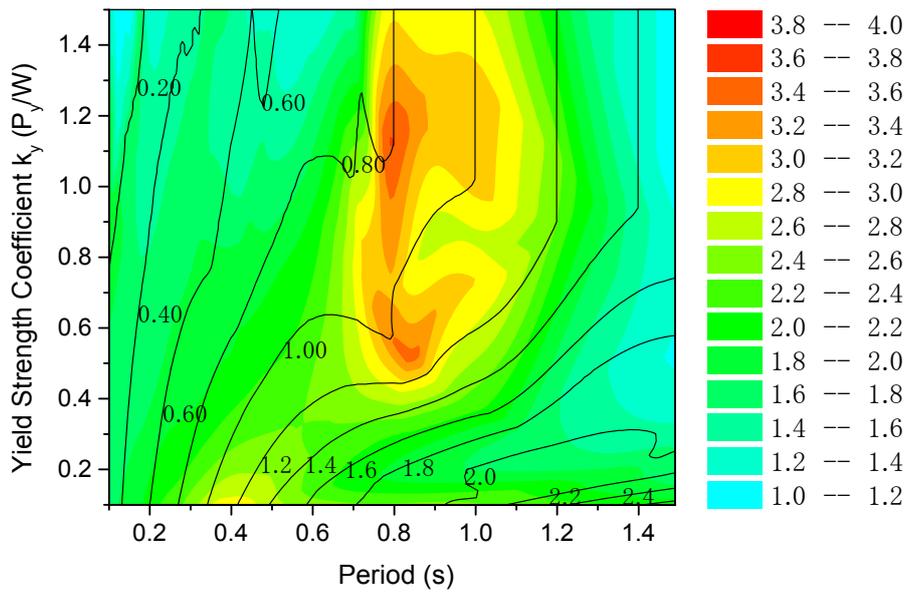


(b) 本震(4/16)による Damage Index

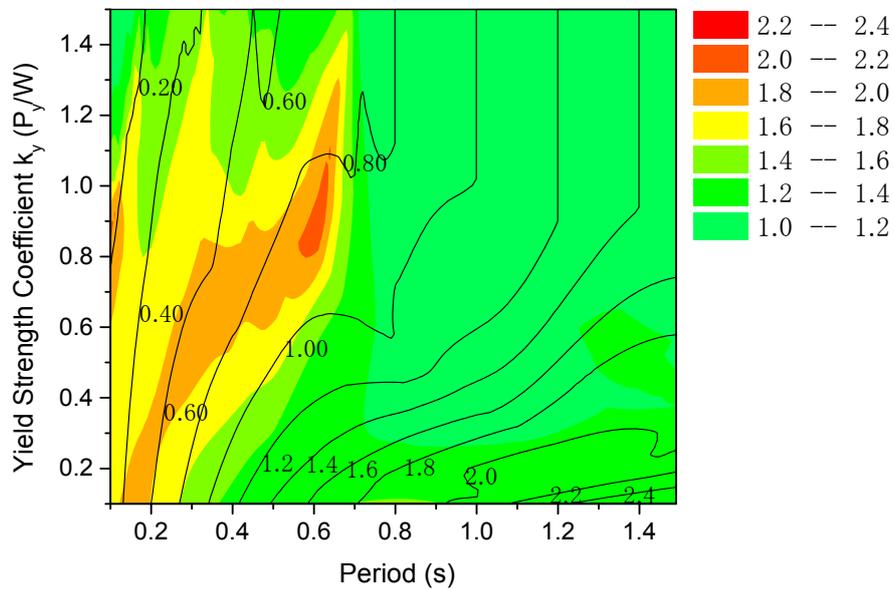


(c) 前震(4/14)と本震(4/16)を連続して作用させた Damage Index

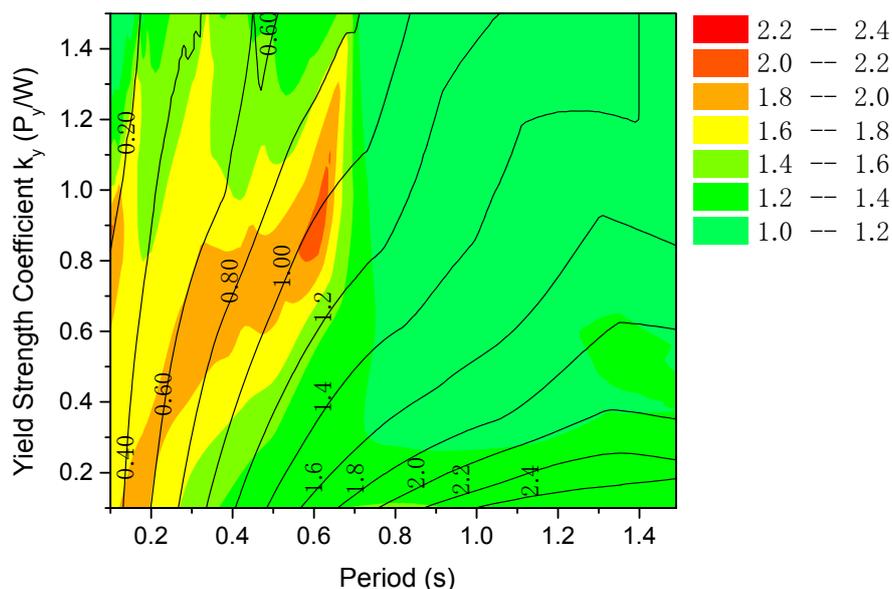
図4 損傷指標 (図中、数値は Damage Index 値)



(a) 前震(4/14)と本震(4/16)の連続作用による応答値と前震(4/14)の応答値の比のコンター図
 (図2の(c)を(a)で除した値) -前震を受けた際の非弾性等価固有周期(s)を図上にプロット



(b) 前震(4/14)と本震(4/16)の連続作用による応答値と前震(4/14)・本震(4/16)の最大応答値の比の
 コンター図 (図2の(c)を(a)(b)の最大値で除した値) -前震を受けた際の非弾性等価固有周期(s)を
 図上にプロット



(c) 前震(4/14)と本震(4/16)の連続作用による応答値と前震(4/14)・本震(4/16)の最大応答値の比のコンター図 (図2の(c)を(a)(b)の最大値で除した値) -前震・本震を受けた非弾性等価固有周期(s)を図上にプロット

図3 非弾性応答スペクトル比 (図中、カラーコンターは応答塑性率の比、ライン上の数値は非弾性等価固有周期)

4. 終わりに

本解析により、熊本地震で観測された前震と本震の2つの連続する地震動が、ある種の応答増幅を引き起こした可能性が示唆された。特に、前震で損傷し長周期化した構造物が、本震の0.9sから1.1s付近の成分によって被害が増大したことが本解析により推察された。ただし、本解析で使用した解析モデルは、構造系を単純な1自由度系非弾性モデルに置換したものであり、繰り返しによる剛性低下や強度低下等の効果は極めて近似的に取り扱っている。加えて、本地震の被害調査から明らかのように、地盤や基礎部の支持力低下が構造系全体に及ぼす影響は無視できない。今後、詳細な調査や解析が強く望まれる。

参考文献

- [1] Park Y.J., Ang A.H-S., : Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.4, April.1985,pp.740-757

NIED 防災科学技術研究所強震ネットワーク

KiK-NET のデータ等を使用させて頂いた。

埼玉大学レジリエント社会研究センター 齊藤