

#### 4-4 鳥取県の橋梁と所要降伏水平震度スペクトル

所要降伏水平震度スペクトル上に、鳥取県の RC 橋脚の降伏水平耐力（降伏水平震度）をプロットすると、その地震動によって RC 橋脚に生じる非線形応答とそれが許容できる損傷レベルにあるかどうかを推定することができる。例えば、許容できる損傷のレベルが応答塑性率 4 であれば、応答塑性率 4 の所要降伏水平震度スペクトル上に、実際の RC 橋脚の固有周期と降伏水平震度をプロットする。このプロットした位置が、所要降伏水平震度スペクトルよりも下側にあれば、その RC 橋脚の降伏水平耐力が足りないため応答塑性率が 4 以上となることがわかる。逆にプロットされた位置が所要降伏水平震度スペクトルよりも上側にあれば、その RC 橋脚の降伏水平耐力は十分あり、応答塑性率は 4 よりも小さくなることがわかる。

そこで、鳥取県西部地震の I 種地盤上で観測された地震動の中から橋梁構造物に与える影響が大きい新見記録 EW 成分と江府記録 NS 成分、釧路沖地震の釧路気象台記録 EW 成分と兵庫県南部地震神戸海洋気象台 NS 成分の所要降伏水平震度スペクトルと、鳥取県の I 種地盤上に建設されている橋梁を支持する RC 橋脚の降伏水平耐力を比較した。図 4-8(1)(a)は、RC 橋脚が損傷を受けずに弾性応答（＝応答塑性率 1）に留まるために必要な降伏水平耐力（所要降伏水平震度）を示したものである。この図には、鳥取県の RC 橋脚の耐震補強前後の固有周期と降伏水平耐力をあわせて示してある。耐震補強前の RC 橋脚は震度法のみで耐震設計されているため、どの程度の塑性変形が生じるか、また、どの程度の損傷ならば耐震設計上許容できるかが設計作業の中で何もチェックされていないため、弾性応答に留めるために必要な所要降伏水平震度スペクトルと比較する。耐震補強前の RC 橋脚は、新見記録 EW 成分が作用すると、2 基の橋脚の降伏水平耐力が所要降伏水平震度スペクトルよりも小さく、何らかの損傷を受けることがわかる。江府記録 NS 成分が作用した場合にはさらに損傷を受ける RC 橋脚の数やその損傷程度が増えることがわかる。また、釧路沖地震の釧路気象台記録 EW 成分や兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録 NS 成分の所要降伏水平震度スペクトルは、ほとんどの固有周期帯で鳥取県西部地震で観測された地震動の所要降伏水平震度スペクトルよりも大きくなっており、これらの地震によって生じる地震動が鳥取県に存在する耐震補強前の RC 橋脚に作用すると、損傷が生じる可能性が高いと予想される。

図 4-8(1)(b)は、RC 橋脚に生じる非線形応答を応答塑性率 2 に留めるために必要な降伏水平耐力（所要降伏水平震度スペクトル）と、鳥取県の RC 橋脚の耐震補強後の降伏水平耐力をあわせて示したものである。耐震補強後の RC 橋脚は、道路橋示方書 V 耐震設計編に規定される地震時保有水平耐力法に基づいて耐震補強が行われているため、十分な変形性能を有し、ある程度の損傷を許すことができるため、応答塑性率 2 となる所要降伏水平震度スペクトルと比較した。1 基の RC 橋脚を除いて、新見記録 EW 成分と江府記録 NS 成分の所要降伏水平震度スペクトルよりも上側に RC 橋脚の降伏水平耐力があるため、これらの RC 橋脚の損傷は応答塑性率 2 以下となる。しかし、仮にこれらの RC 橋脚に釧路沖地震の釧路気象台記録 EW 成分が作用した場合には、

半分の RC 橋脚に応答塑性率 2 よりも大きな損傷が生じ、さらに兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録 NS 成分が作用した場合には、1 基を除く全ての RC 橋脚に応答塑性率 2 よりも大きな損傷が生じることになる。実際には、兵庫県南部地震の直後に用いられた復旧仕様や平成 8 年道路橋示方書 V 耐震設計編に基づいて耐震補強や耐震設計された RC 橋脚は、その許容塑性率が 3~6 程度となることが多い。下図は、正負交番繰返し載荷実験結果に基づいて定められた RC 橋脚に生じる損傷状態と耐震設計上の許容できる損傷レベルの関係を表したものである。道路橋示方書 V 耐震設計編では、耐震設計上の終局状態を RC 橋脚の正負交番載荷実験において、かぶりコンクリートがはく落しはじめ、水平耐力が低下しはじめる点と定義している。すなわち、耐震設計上の終局状態  $\delta_u^{\text{II}}$  を最大水平耐力が生じるときとしている。さらに、これに地震動の特性（タイプ I 地震動とタイプ II 地震動）に応じた安全率を考え許容できる損傷レベル  $\delta_a^{\text{I}}$ 、 $\delta_a^{\text{II}}$  を降伏水平変位  $\delta_y$  で除したものを許容塑性率としている。

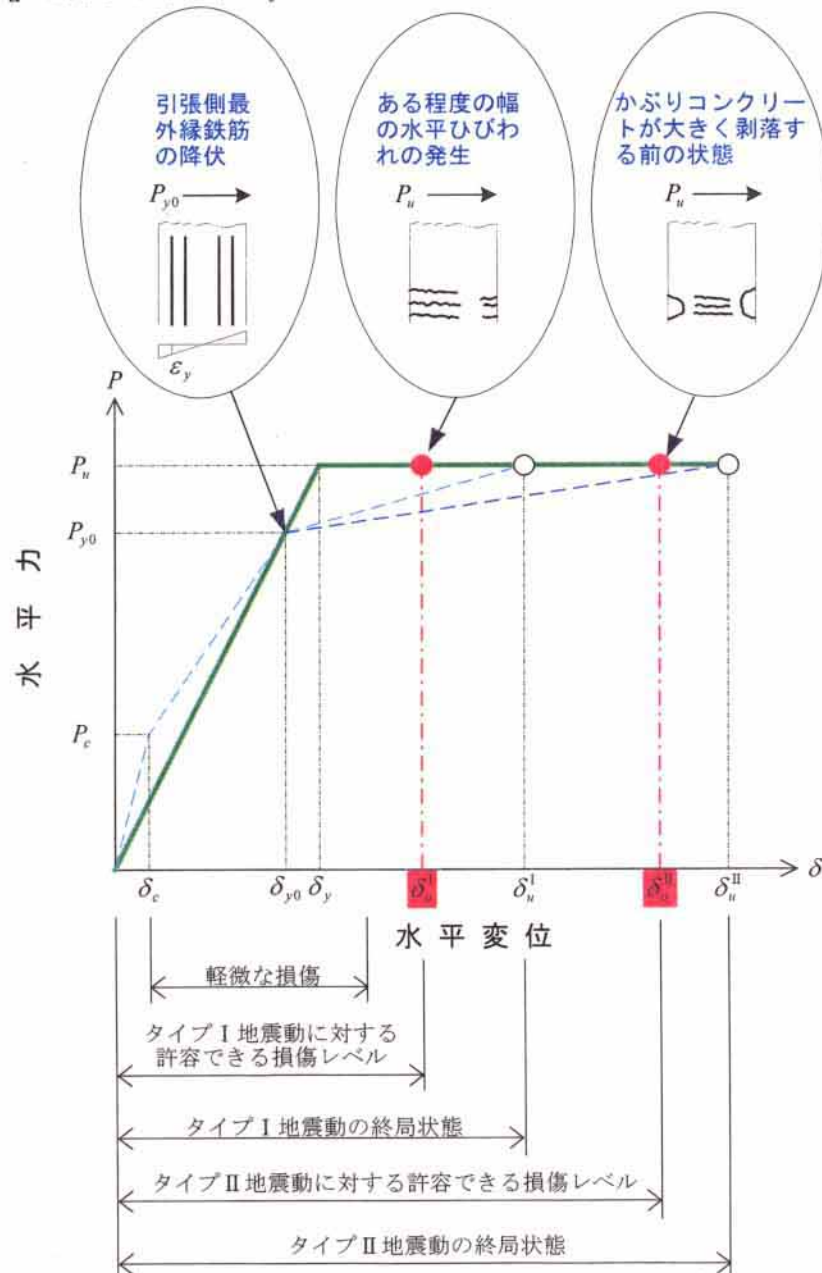


図4-8(1)(c),(d)は、それぞれ応答塑性率4.6となる所要降伏水平震度スペクトルと鳥取県の耐震補強後のRC橋脚の降伏水平耐力を示したものである。この図と上述した道路橋示方書V耐震設計編におけるRC橋脚に許容される損傷レベルの定義より、耐震補強されたRC橋脚は、1基を除き、比較しているすべての地震動に対して、応答塑性率が6となる所要降伏水平震度スペクトルより大きな耐力を有し、耐震設計上許容できる損傷レベルもしくは、最大水平耐力以下の応答にとどまると予想されるため、十分な補強効果が得られているといえる。

同様に、II種地盤上で観測された地震動の、所要降伏水平震度スペクトルと鳥取県のRC橋脚の降伏水平耐力を比較したものが、図4-8(2)である。対象とした地震動は、鳥取県西部地震の日野記録NS成分とノースリッジ地震のSylmar駐車場記録EW成分、兵庫県南部地震のJR鷹取駅記録NS成分である。II種地盤上に建設された鳥取県のRC橋脚のデータが2基分しか収集できなかったため、全般的な傾向を述べるのは難しいが、耐震補強前に比較して耐震補強後のほうが変形性能を確保した上で降伏水平耐力が増加しているため、同図(d)より、日野記録NS成分が作用した場合にも応答塑性率が6程度となり、耐震補強の効果が得られていることがわかる。

鳥取県西部地震で観測された地震動は、過去に甚大な被害を生じさせた兵庫県南部地震や、ノースリッジ地震、被害の小さかった釧路沖地震よりも、橋梁構造物に与える影響は小さかったこと、また、鳥取県のRC橋脚は耐震補強を施すことによってその降伏水平耐力や変形性能が向上していることがわかる。

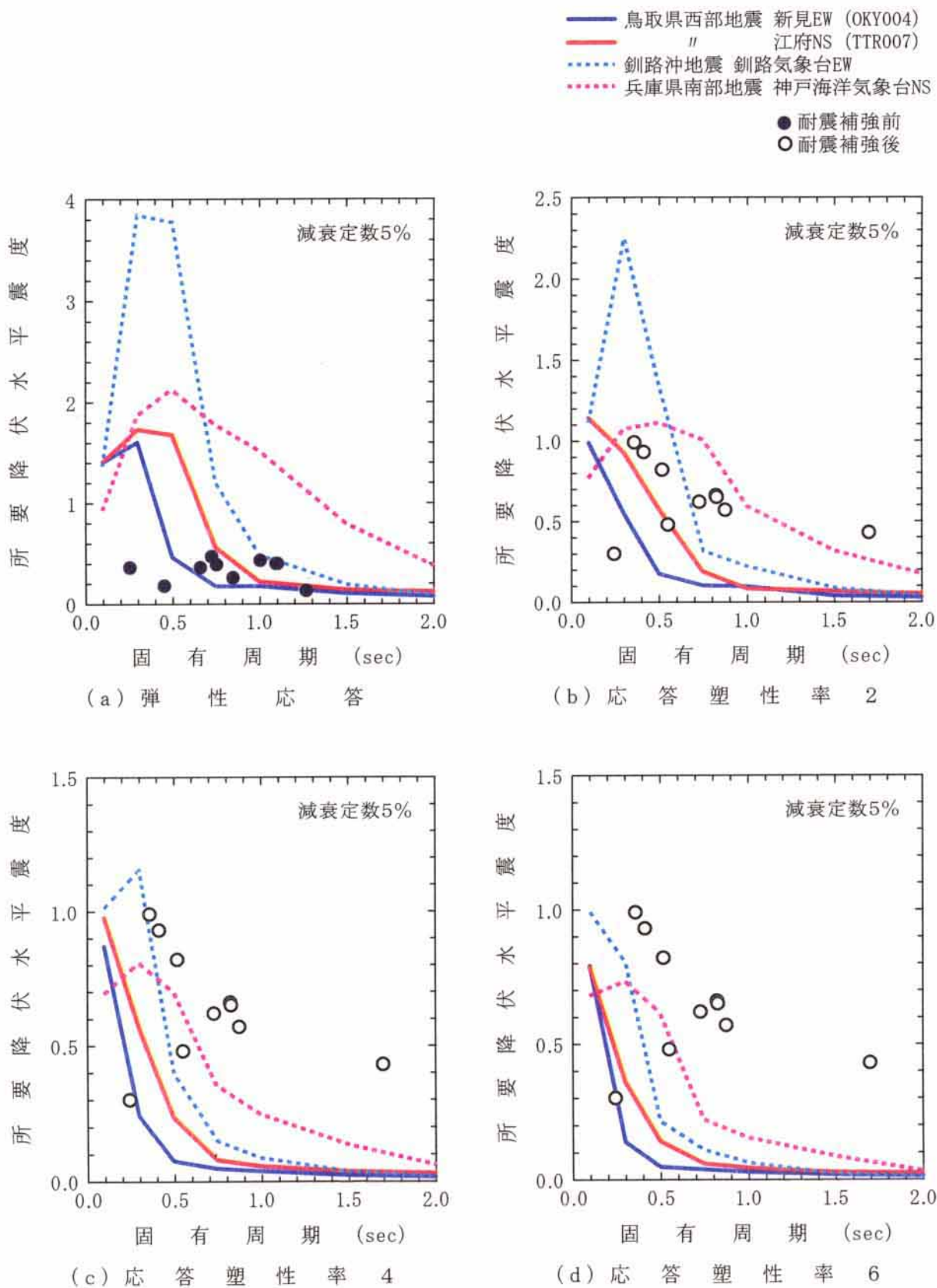


図4-8 (1) 所要降伏水平震度スペクトルと鳥取県のRC橋脚の耐力 (I種地盤)

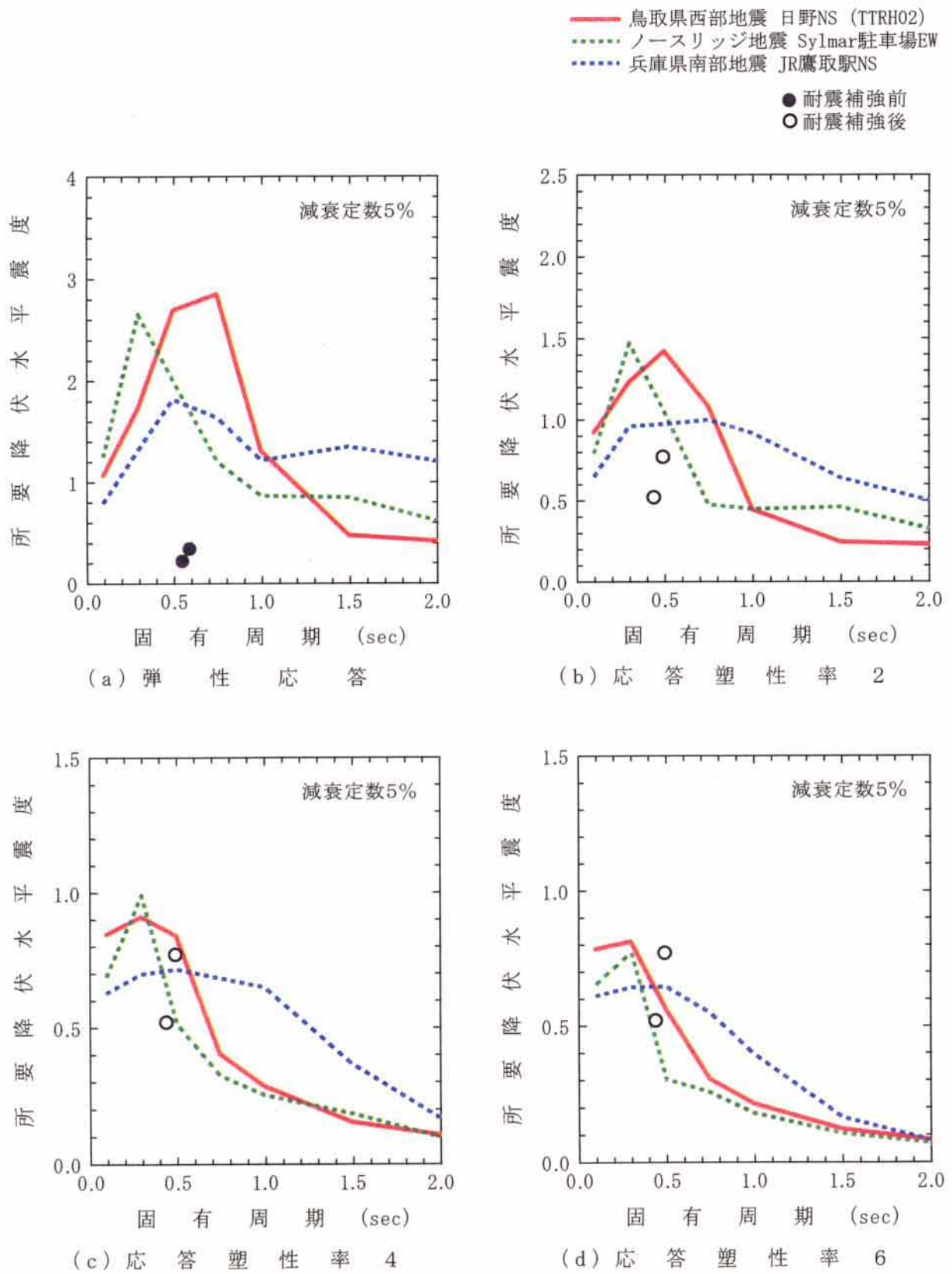


図4-8 (2) 所要降伏水平震度スペクトルと鳥取県のRC橋脚の耐力 (II種地盤)

図 4-9 は、鳥取県西部地震の震源と K-NET, KiK-net の観測地点および損傷橋梁の位置に、鳥取県の RC 橋脚の降伏水平震度や、鳥取県西部地震において固有周期が 0.5 秒と 1.0 秒の構造物の損傷がそれぞれ応答塑性率 1,2,4,6 となるために必要な降伏水平震度を示したものである。鳥取県の RC 橋脚の降伏水平震度は、鳥取県西部地震の時に未補強であったものは補強前の降伏水平震度を、補強が完了していたものは補強後の降伏水平震度を示した。前述したように損傷が確認された橋梁は、震央から半径約 20km 以内のところに分布しており、その程度は軽微であり、数も少なく、全ての橋梁に損傷が生じているわけではない。たとえば、震源に最も近い地点に架橋されているあごうじ橋と賀祥橋は、損傷が確認されていない。しかし、これに近接している白山橋は、橋座が破損している。ここでは特にこの 3 橋に着目して、RC 橋脚の降伏水平震度と近接した観測地点の伯太記録の所要降伏水平震度を比較する。図 4-9(1)より、鳥取県西部地震の時に未補強であったあごうじ橋の RC 橋脚は固有周期が 1.0 秒で、0.43 の降伏水平震度を有している。これに対して、伯太記録が作用した場合に固有周期 1.0 秒の RC 橋脚が損傷を生じないための所要降伏水平震度は 0.20 となり、あごうじ橋の RC 橋脚の降伏水平震度よりも小さい。あごうじ橋の RC 橋脚に伯太記録と同じ特性を有する地震動が作用した場合には、損傷が生じないことになり、実際の被災状況と一致することがわかる。同様に、地震時には補強が完了していた賀祥橋は固有周期が 0.4 秒で 0.93 の降伏水平震度を有しており、伯太記録が作用した場合に固有周期 0.5 秒の RC 橋脚に損傷を生じないために必要な所要降伏水平震度は 0.79 であり、賀祥橋の RC 橋脚の降伏水平耐力の方が上回っているため、実際の被災状況である損傷を生じていないことが再現できているといえる。地震時に未補強の白山橋については、RC 橋脚の固有周期が 0.8 秒で降伏水平震度が 0.26 である。図中には示していないが伯太記録の固有周期 0.75 秒の所要降伏水平震度は 0.31 であり、白山橋の RC 橋脚の降伏水平震度はその値を若干下回っているため、RC 橋脚に損傷が生じることになる。実際には、白山橋に生じた損傷は橋座の破損であり、橋脚よりも変形性能が期待できない部位に損傷が生じている。RC 橋脚の降伏水平震度と近接の観測地点の記録から求めた所要降伏水平震度を比較することにより、実際に橋梁構造物に生じた損傷の有無を概ね表すことができている。

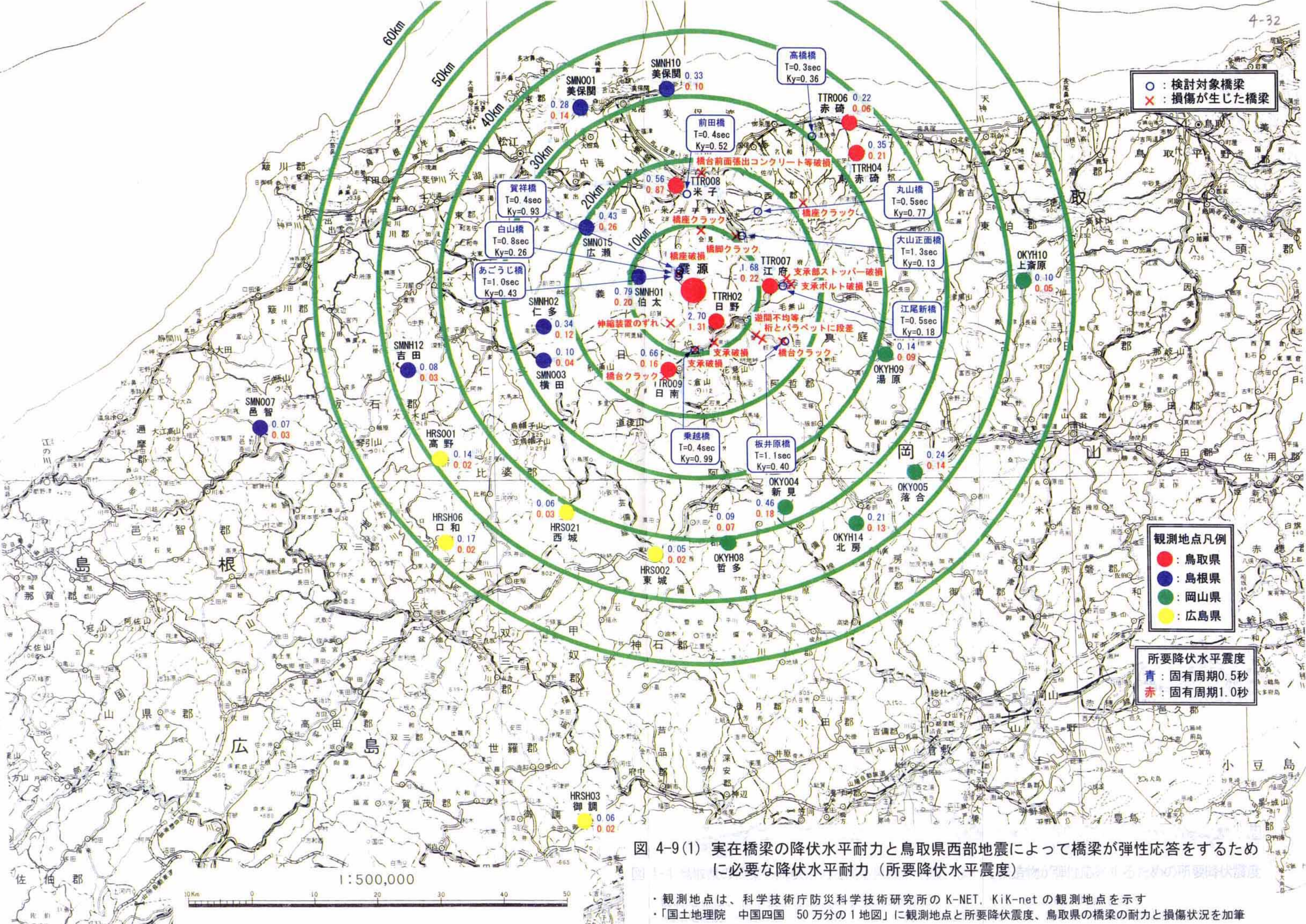


図 4-9(1) 実在橋梁の降伏水平耐力と鳥取県西部地震によって橋梁が弾性応答をするために必要な降伏水平耐力 (所要降伏水平震度)

・観測地点は、科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測地点を示す  
 ・「国土地理院 中国四国 50 万分の 1 地図」に観測地点と所要降伏震度、鳥取県の橋梁の耐力と損傷状況を加筆

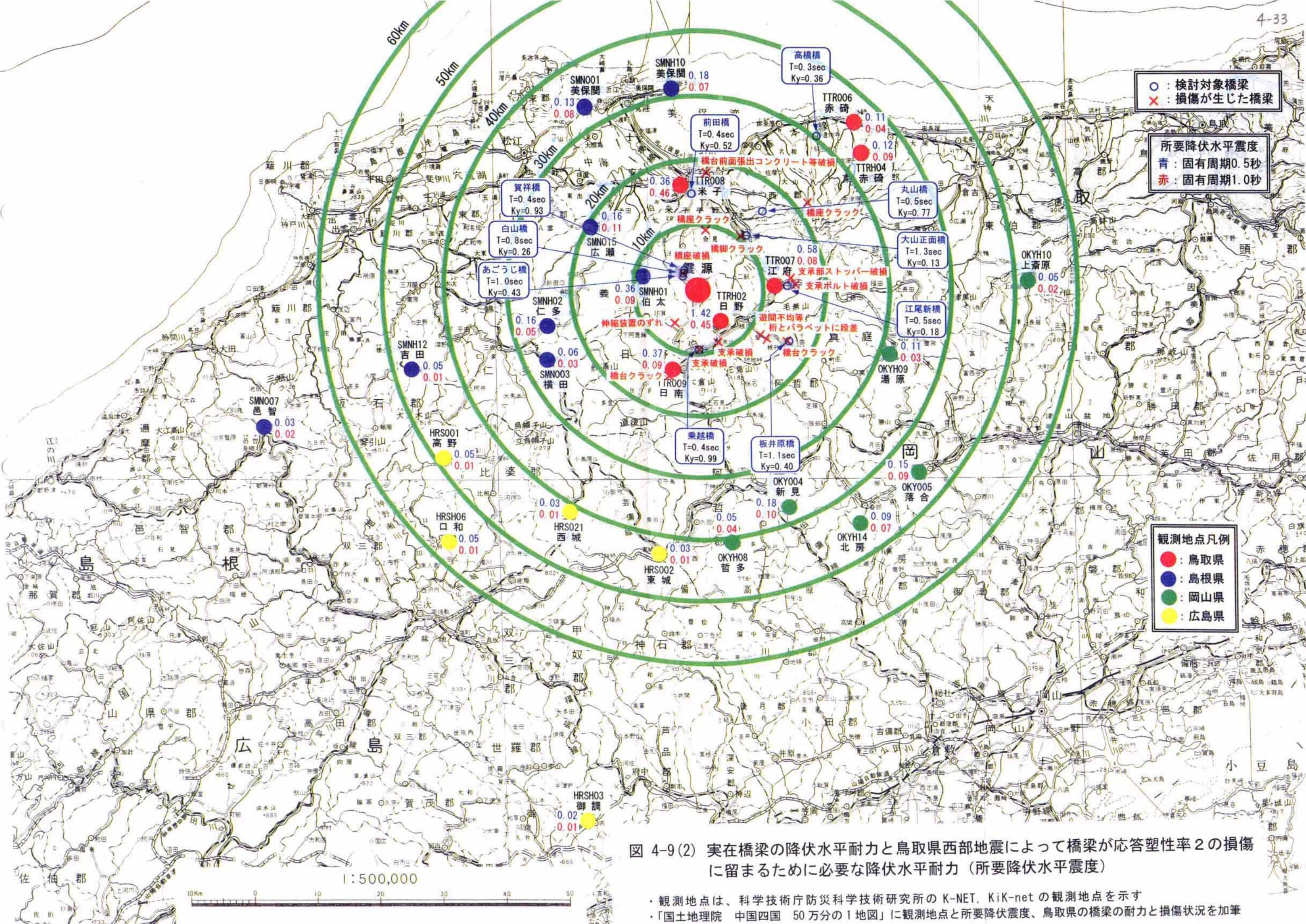


図 4-9(2) 実在橋梁の降伏水平耐力と鳥取県西部地震によって橋梁が応答塑性率2の損傷に留まるために必要な降伏水平耐力(所要降伏水平震度)

・観測地点は、科学技術庁防災科学技術研究所のK-NET, KIK-netの観測地点を示す  
 ・「国土地理院 中国四国 50万分の1地図」に観測地点と所要降伏震度、鳥取県の橋梁の耐力と損傷状況を加筆





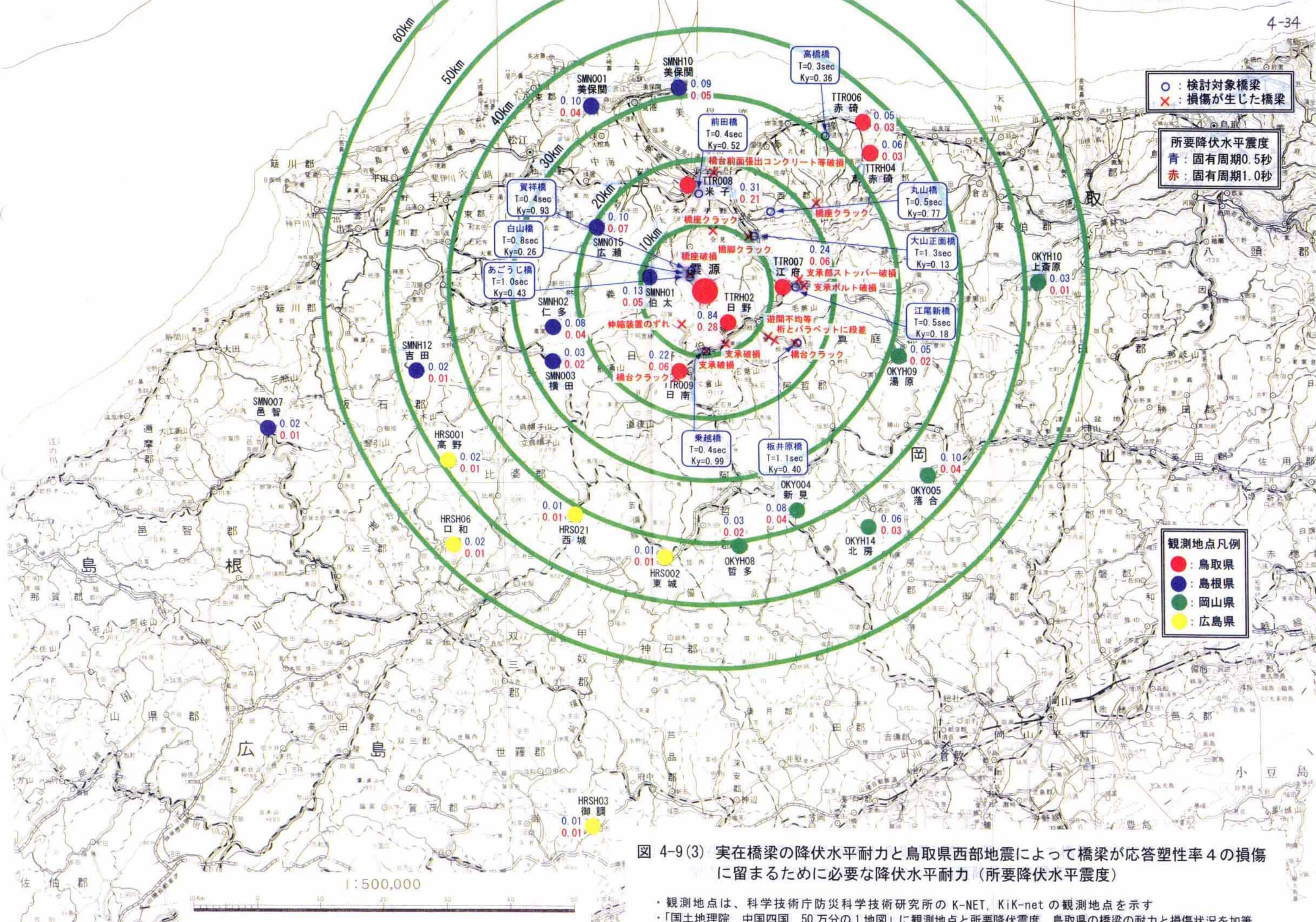


図 4-9 (3) 実在橋梁の降伏水平耐力と鳥取県西部地震によって橋梁が応答塑性率4の損傷に留まるために必要な降伏水平耐力(所要降伏水平震度)

・ 観測地点は、科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測地点を示す  
 ・ 「国土地理院 中国四国 50 万分の 1 地図」に観測地点と所要降伏震度、鳥取県の橋梁の耐力と損傷状況を加筆

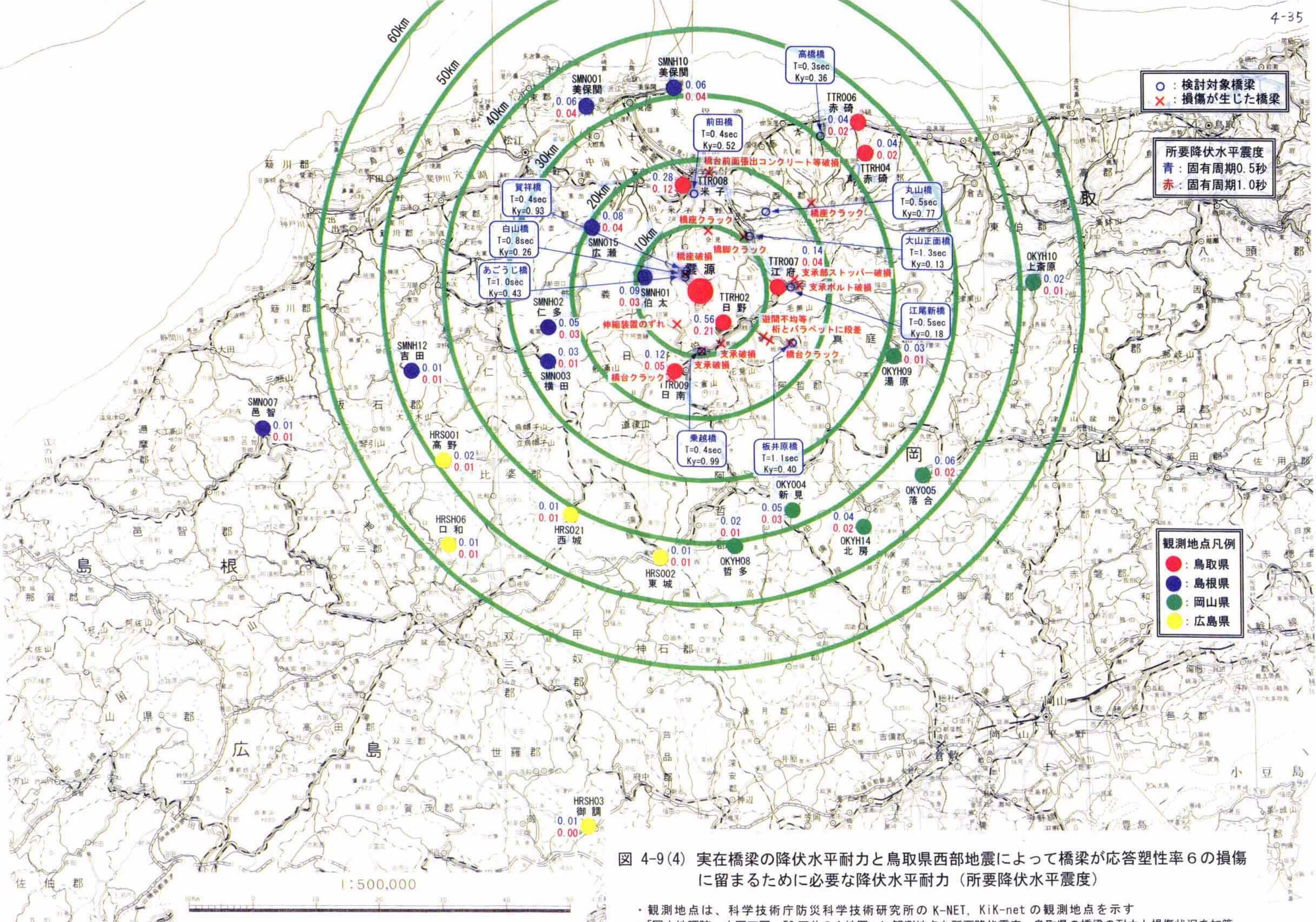


図 4-9(4) 実在橋梁の降伏水平耐力と鳥取県西部地震によって橋梁が応答塑性率6の損傷に留まるために必要な降伏水平耐力（所要降伏水平震度）

・観測地点は、科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測地点を示す  
 ・「国土地理院 中国四国 50 万分の 1 地図」に観測地点と所要降伏震度、鳥取県の橋梁の耐力と損傷状況を加筆