

3.2 既設道路橋基礎の耐震性能水準評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：構造物研究グループ（基礎）

研究担当者：中谷昌一，白戸真大

【要旨】

本研究は、将来の道路橋基礎の耐震補強プログラムの策定を念頭に置いたものである。道路橋基礎の耐震補強は、既設道路橋基礎の耐震性能水準を区分した上で、優先度を設けて段階的に実施する戦略が必要である。そこで、平成 18 年度は、被災事例の分析、設計基準及び施工技術の変遷を調査し、相対的に耐震余裕度の小さいと考えられる基礎の条件を示した。今年度は、既設道路橋基礎の耐震性能の評価を行い、その結果に基づき、基礎の建設年代、基礎形式、地盤条件等のパラメーターと基礎の脆弱度の関係を整理した、そして、以上の結果より、基礎の脆弱度判定（耐震補強の優先度の振り分け）フローを提案した。

キーワード：基礎，耐震補強，防災点検

1. はじめに

道路としての耐震性確保にあたっては個々の道路施設の耐震性が現行基準を満足するように行う必要があるが、限られた期間や予算条件のもとでそれを完了するのは難しい。そのようななかで、道路橋は一旦大被害を受けると迅速な復旧が困難であることから、平成 7 年の兵庫県南部地震以後の道路施設の耐震補強は、他の道路施設に比して特に緊急度の高い、橋梁の複断面区間、跨線橋、跨道橋が優先され、兵庫県南部地震の後に示された復旧仕様やその後改訂された道路橋示方書(以下、道示という)に基づいて補強が実施されてきた。

しかし、大地震の切迫性が指摘される昨今、個々の道路施設が道路ネットワークとして効果を発揮するよう、より緊急的な耐震補強計画が求められている。そこで、平成 17 年度から平成 19 年度にかけて国土交通省により緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラムが着実に実施されたところである¹²⁾。優先的に確保すべき経路を選定し、その区間に対しては、甚大な被害を防止し、最低限必要な交通機能を確保できるように耐震補強を実施するというものである。具体的には、高速道路上の橋梁および特定された緊急輸送道路上の橋梁に対して、兵庫県南部地震と同程度の地震動に対しても落橋等の甚大な被害を防止することを第一としている。道示が示す標準的な設計法は、被害事例のみならず、実験等の過去の研究で得られた知見を含めた総合的なものであるが、プログラムにおいて補強を実施する橋梁、補強部材、補強項目は、兵庫県南部地震など過去の地震において甚大な被

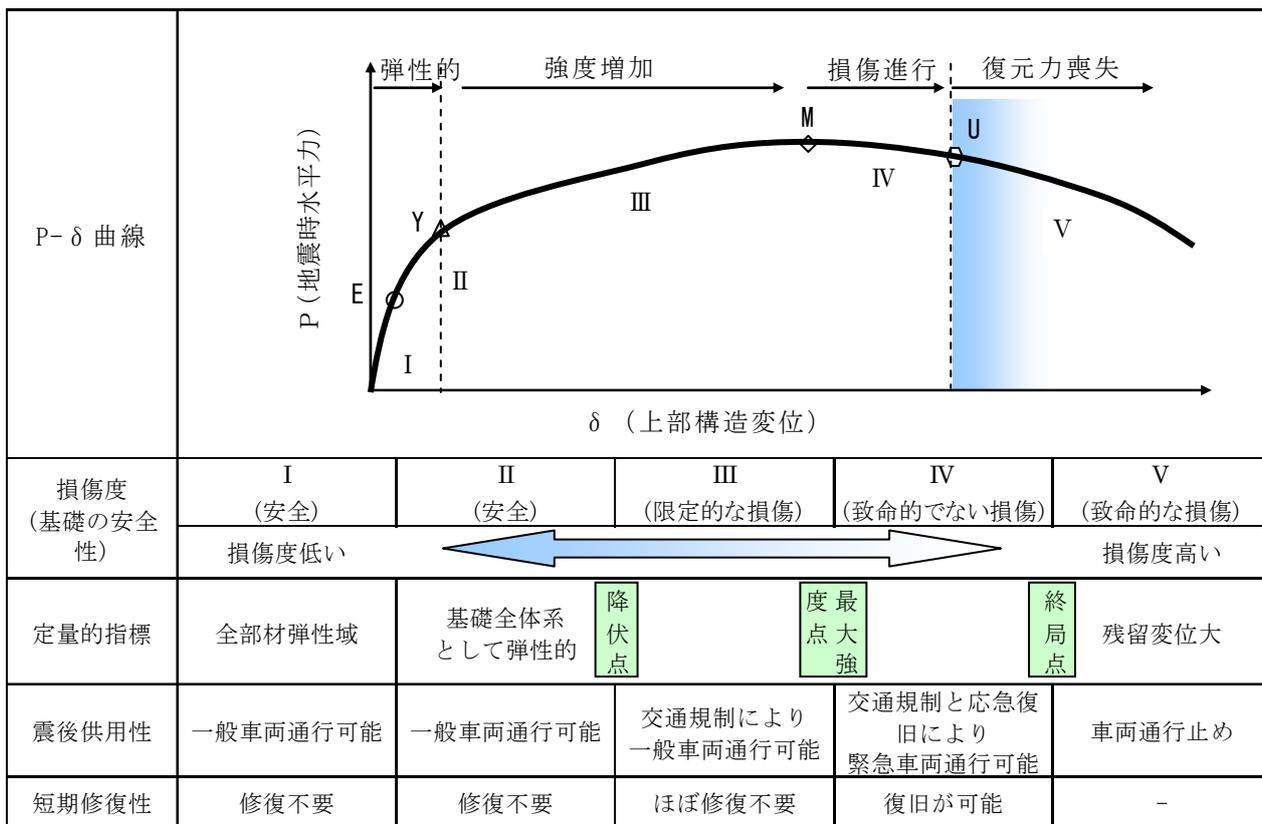
害をもたらした破壊形態に基づいた経験的なものである。たとえば、鉄筋コンクリート橋脚の段落とし部における曲げせん断破壊を防止するための巻立て、鋼製単柱橋脚の角部の溶接部の破断を防止する角補強、両端が橋台でない単純桁、ゲルバー桁、流動化の影響を受ける可能性のある連続桁における支承の破断に伴う落橋を防止するための落橋防止システムの整備などである。

次期の道路橋の耐震補強の展開は、基礎の補強も当然考慮して議論されることになる。そこで、将来の道路橋基礎の耐震補強プログラムの策定を念頭に置いた、橋梁基礎に関する耐震補強の必要性の有無や優先度を判定する手法の整備が急務である。

平成 18 年度は、過去の被災事例の分析、設計基準および施工技術の変遷を調査し、相対的に耐震余裕度の小さいと考えられる基礎の条件を抽出した。

平成 19 年度は 3 箇年計画の中間年にあたり、基礎の脆弱度判定（耐震補強の優先度の振り分け）フローを作成した。まず地震後の基礎の損傷の分類を整理した。次に各地震レベルにおける損傷度を区分し耐震補強の優先度を整理した。そして既設道路橋基礎をモデルとした静的漸増解析を行った。そこで、最後に耐震性能水準に反映させる内容を整理し、基礎の脆弱度判定フローを作成した。

表-1 既設道路橋基礎の耐震性能水準区分のイメージ



2. 既設橋の損傷度および耐震補強戦略

実際の基礎においては様々な崩壊パターンが存在するが、「基礎の安全性」、震後の特に緊急車両の通行に着目した「震後供用性」および「短期修復性」の観点から基礎の損傷度を整理する。ここに、短期修復性とは基礎の損傷に関わらず橋の供用の回復を短期で行うことができるかどうかを意味する。表-1に既設道路橋基礎の耐震性能水準区分のイメージを、図-1には崩壊パターンの一例を示す。

基礎の損傷の分類は、変形性能に富む場合の他に、変形性能が乏しい場合(部材曲げ破壊からせん断破壊移行型)、変形性能がほとんどない場合(部材せん断破壊先行型)、また、支持層の液状化に伴う過大沈下・液状化による周辺堤防土の移動に伴う基礎の過大移動の4つに分類できた。各損傷の分類における荷重変位曲線(以降、P-δ曲線)の模式図を表-1中の図および図-2から図-4に示す。後述するように、一般的傾向として、変形性能に富むと分類される基礎形式は直接基礎・鋼管杭・場所打ち杭、変形性能が乏しいと分類される基礎形式は木杭・RC杭・PC杭・PHC杭・ケーソン基礎、変形性能がほとんどないと分類される基礎形式は単列パイルベント橋脚となる。また、支持層の液状化に伴う過大沈下・液状化に

よる周辺堤防土の移動に伴う基礎の過大移動とは、基礎底面地盤で液状化が発生する場合や、堤防下地盤の液状化により堤防全体が移動する場合が想定される。それぞれの損傷分類における損傷度IからVは、以下のような状態を想定する。

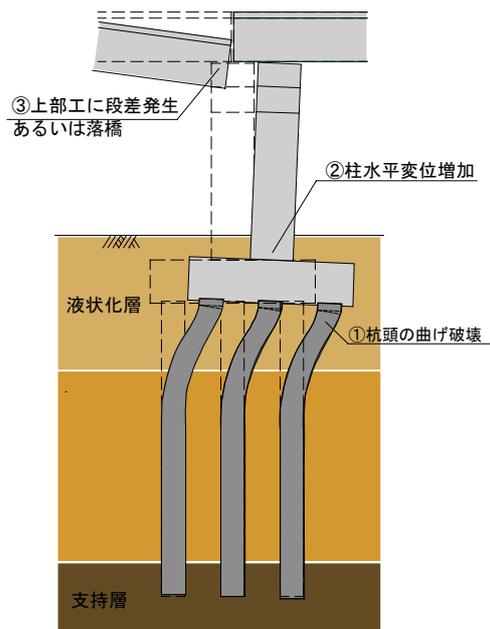


図-1 崩壊パターンの一例(杭基礎の曲げ破壊)

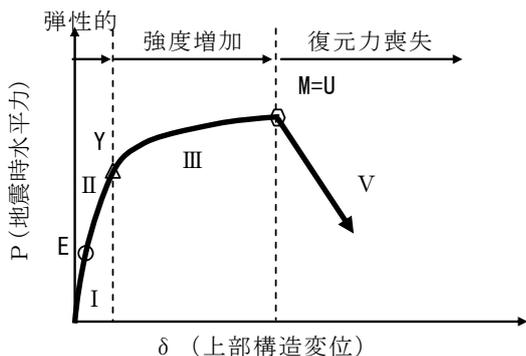


図-2 変形性能が乏しい場合

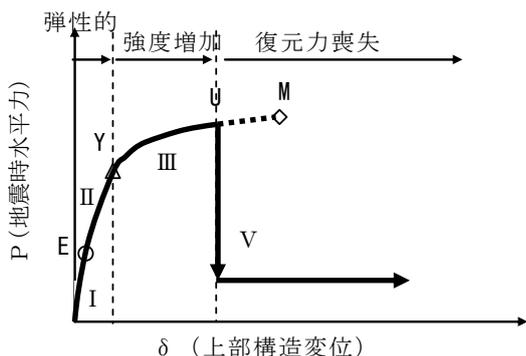


図-3 変形性能がほとんどない場合

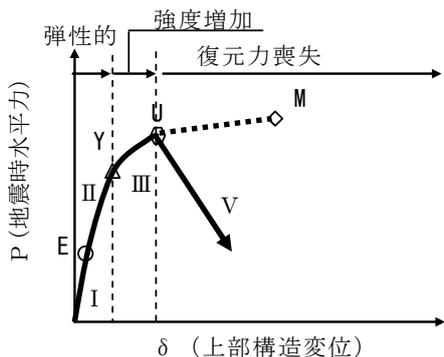


図-4 基礎底面地盤の液状化の場合(破線は変形性能に富む場合の模式図を示す)

損傷度 I：基礎およびそれを構成する部材や支持する地盤がそれぞれ弾性とみなせる限界点(E 点)を超えない状態と定義する。

損傷度 II：基礎を構成する一部の部材やそれを支持する地盤抵抗に非線形化が生じるものの、基礎全体系の P-δ 曲線で見るときには弾性とみなせる限界点(Y 点)を超えない状態と定義する。地震後に緊急車両および一般車両の通行も可能で橋の供用の観点から基礎の修復は不要と想定する。

損傷度 III：基礎としての応答塑性率が許容塑性率を超えない状態と定義する。許容塑性率を満足する場合、基礎は最大強度を発揮する点(M 点)を超えず、十分な安全性を有するとともに残存変形性能も十分に有する。した

がって、緊急車両の供用を行うための基礎の補修は不要と想定する。ただし、基礎に残留変形が生じることから、上部構造桁端部や伸縮継手部の損傷及び路面の段差を誘発する可能性があるため、それらに対して応急復旧作業が必要である。地震後は緊急車両の通行が可能であり、交通規制により一般車両の通行も可能と想定する。

損傷度 IV：基礎が終局点(U 点)に達する状態までと定義する。ここに、終局点とは最大強度付近で安定していた耐力が低下し始める点とみなす。このため、基礎の損傷、残留変形が大きく、その結果、上部構造に大きな残留変位が生じることが想定される。一般車両は通行止めで、緊急車両については応急復旧が行われ交通規制がないと通行できない状態と想定する。基礎には耐荷力に著しい影響のある損傷が生じているため、それに対する応急処置(上部構造を仮受けするベント設置など)を行った後に緊急車両を通行させることを想定する。

損傷度 V：基礎の損傷により落橋あるいは倒壊・半倒壊となる状態と定義している。すなわち、たとえ緊急車両であっても橋の再供用不能な状態を想定する。

3. 補強優先度の設定

既設道路橋基礎の耐震補強戦略も現在の耐震補強プログラムの趣旨を踏襲して立案する必要がある。緊急輸送道路における路線としての耐震性を段階的に向上させるものとし、優先度を設けた段階的な補強の実施を想定する。第一段階としては必ずしも道示V耐震設計編³⁾の耐震性能水準に達しないことがあることを認め、甚大な被害を防止することを優先する。この戦略のもとで、レベル 2 地震動に対して当該基礎がどの損傷度に達するかに応じて優先度を決定すると、図-5 のように整理できる。

損傷度	I	II	III	IV	V
L2TypeI				3	1
L2TypeII				4	2

図-5 基礎の補強優先度(数字が優先度)

これらの基礎に対して、構造的に補強することにより、損傷度Vに達すると想定される基礎を損傷度III以下に収まるように整備することを目標とする。ここで、構造的な補強では、地盤を掘削する必要があり大規模な工事となるため、周辺状況によっては実施が非常に困難な場合も考えられる。その場合には、損傷度IV以下にすることを目標とし、地盤改良などを行うことを考える。ここで、地盤改良によって基礎の耐力は増加することが見込まれ

るが、そもそも地盤改良体が必要な範囲や基礎・改良体・地盤の相互作用には不明な点が多く、今後研究が必要である。なお、例えそれが詳細に検討された場合でも、地盤改良体と基礎構造本体部材の地震後の一体性は不明であり、確保が難しいことも指摘されている⁹⁾。したがって、現時点では地盤改良を行って計算上損傷度がⅢ以下となることが想定される場合でも、損傷度Ⅳと区分しておくことが考えられる。

4. 既設橋の照査結果

実際の既設道路橋基礎が、2.で整理した既設道路橋基礎の耐震性能水準のどの区分に評価されるのか、既設道路橋基礎に対して静的荷重漸増解析を行い、P- δ 関係を求めて評価してみた。対象とする基礎は、平成7年の兵庫県南部地震より前に建設された既設道路橋基礎のうち、表-2に示す計28基を各年代及び各基礎形式で満遍なく選定した。なお、ここではフーチングは弾性体と仮定し計算を行った。

表-2 解析対象モデル

	S.46年 より前	S.46年～ S.55年	S.55年～ H.2年
直接基礎	1基	3基	1基
鋼管杭	4基	2基	1基
場所打ち杭	3基	1基	1基
RC杭	3基	—	—
PC杭	1基	—	—
ケーソン基礎	4基	1基	—
木杭	1基	—	—
単列パイルベント 橋脚	1基	—	—

(1) 直接基礎

計算の結果から、一般には直接基礎は変形性能に富む基礎に分類され、P- δ 曲線は表-1に示す曲線で示すことができる。直接基礎はレベル1地震動に対しては損傷度はⅠかⅡ、レベル2地震動に対しては損傷度Ⅲと判定された。

しかし、直接基礎の損傷度は支持地盤の挙動に大きく影響される。したがって、支持地盤が液状化の影響を受ける場合あるいは斜面地形に位置する場合には、計算結果とは異なり、基礎底面下の地盤が液状化地盤の影響を受ける場合のP- δ 曲線は、図-4に分類されると想定され、このような不完全支持が想定される場合には損傷度Ⅴに達する恐れがある。このため、支持地盤の状況を基礎の損傷度判定の指標とする。また、フーチングの損傷によ

って基礎全体の損傷度に影響があると考えられるため、今後検討が必要である。

(2) 鋼管杭

計算の結果、一般に鋼管杭基礎は変形性能に富む基礎に分類され、P- δ 曲線は表-1に示す曲線に分類される傾向が見られた。

どの年代においても鋼管杭基礎はレベル1地震動及びレベル2地震動タイプⅠに対しては概ね損傷度Ⅰと判定される。レベル2地震動タイプⅡにおいては損傷度ⅢかⅣと判定された。しかし、液状化の影響を受ける地盤を想定した場合には基礎の損傷度は大きくなり、杭頭部の地盤抵抗を全く見込めない条件においてはレベル2地震動タイプⅡで損傷度Ⅴとなるケースが多く見られた。その度合いは昭和46年以前に建設された基礎で顕著であった。以上の傾向を図-6にまとめる。

昭和46年耐震指針⁹⁾から各種補正係数や固有周期に応じた設計震度を適用する修正震度法により耐震設計が行われており、現行道示⁹⁾に示されるレベル1地震動に対する設計法と大きな相違がないことから、レベル1地震動に対する安全性を確保することにより、必然的にレベル2地震動タイプⅠの安全性も担保されていたものと考えられる。このため、昭和46年耐震指針⁹⁾適用以降の基礎については、耐震性能を高く評価できるものとする。

(3) 場所打ち杭

計算の結果、一般に場所打ち杭基礎は変形性能に富む基礎に分類され、P- δ 曲線は表-1に示す曲線に分類される傾向が見られた。

どの年代においても場所打ち杭基礎はレベル1地震動及びレベル2地震動タイプⅠでは、概ね損傷度Ⅰと判定される。レベル2地震動タイプⅡにおいては損傷度ⅢかⅣと判定される。しかし、液状化の影響を受ける地盤上にある場合には鋼管杭基礎と同様な結果であり、全体として図-6のような傾向を示した。このため、昭和46年耐震指針⁹⁾適用以降の基礎については、耐震性能を高く評価するひとつの判定基準とする。さらに、せん断耐力に着目すると、昭和55年より前の設計指針を適用した基礎では、レベル2地震動タイプⅡにおいて、杭体の曲げ降伏に対してせん断破壊が先行することがわかった。これは、昭和55年道示⁹⁾以降、コンクリートの許容せん断応力度が低減されたこと、杭の最小帯鉄筋量が規定されたことによるものと考えられる。このため、昭和55年以降の道示適用か否かを耐震性能の判断基準とする。

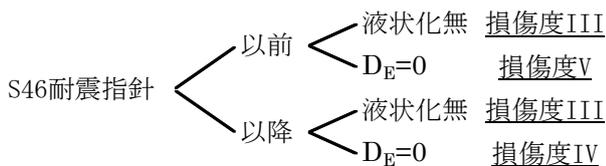


図-6 鋼管杭・場所打ち杭の適用基準の違いによる損傷度イメージ (L2-Type II)

(4) RC 杭

計算の結果、一般に RC 杭基礎は杭体の曲げ耐力が小さく変形性能が乏しい基礎に分類され、P-δ 曲線は図-2 に分類される傾向が見られた。

RC 杭基礎はレベル 1 地震動においては損傷度 I であるが、レベル 2 地震動においては損傷度 V になる基礎が複数存在する。また、液状化の影響を受ける地盤においては、レベル 2 地震動タイプ I、タイプ II ともに損傷度 V となる基礎が複数見られた。さらに、せん断耐力に着目すると、レベル 2 地震動では杭のせん断破壊が先行し脆性的な破壊となることが考えられる。

(5) PC 杭

計算の結果、一般に PC 杭基礎は杭体の曲げ耐力は比較的高いもののせん断耐力が小さく変形性能が乏しい基礎に分類され、P-δ 曲線も図-2 に分類される傾向がみられた。

PC 杭基礎はレベル 1 地震動及びレベル 2 タイプ I においては損傷度 I、レベル 2 地震動タイプ II では損傷度 III と判定された。しかし、液状化の影響を受ける地盤では、レベル 2 地震動タイプ II において損傷度 V と判定された。また、せん断耐力に着目すると、レベル 2 地震動タイプ I、タイプ II ともに杭のせん断破壊が先行し損傷度 V と判定される。

(6) ケーソン基礎

計算の結果、一般にケーソン基礎は基礎本体の曲げ耐力が小さく変形性能が乏しい基礎に分類され、P-δ 曲線も図-2 に分類される傾向が見られた。

ケーソン基礎はレベル 1 地震動においては概ね損傷度 I と評価できるが、レベル 2 地震動においては、昭和 46 年耐震指針⁹⁾を境に異なっており、昭和 46 年以前では損傷度 V が複数見られ、昭和 46 年以降では損傷度 III と評価される。なお、せん断耐力に着目すると、レベル 1 地震動においてせん断破壊が先行し損傷度 V となるケースが複数見られた。平成 8 年道示適用前のケーソン基礎は、軸方向鉄筋が極端に少なく、はりとして見た場合、ひび割れ曲げモーメント (M_c) が終局曲げモーメント (M_u) より大きい場合がある。しかし、一方でその根入れ長に

対して部材断面寸法が大きいときもあり、必ずしも現行設計基準通りにはりとして評価することは妥当でないのかもしれない。したがって、既設ケーソン基礎の耐震性能の評価のためには、そのモデル化も含めて詳細な検討が必要である。

(7) 木杭

計算の結果、一般に木杭は変形性能が乏しい基礎に分類され、P-δ 曲線は図-2 で示すような傾向が見られた。

木杭はレベル 1 地震動においては損傷度 I となるが、レベル 2 地震動においては全てのケースで損傷度 V となる。このため、木杭は明らかに耐震性に劣る基礎形式として耐震補強の優先度の高い基礎と位置づける。

(8) 単列パイルベント橋脚

計算の結果、一般に単列パイルベント橋脚は変形性能がない基礎に分類され、P-δ 曲線は図-3 で示すような傾向が見られた。

単列パイルベント橋脚は杭体を鋼管杭及び PC 杭としたケースを実施したが、何れのケースにおいてもレベル 2 地震動に対して損傷度 V となるケースが複数見られる。なお、鋼管杭ではある程度のじん性は期待できるが、その一方、変形量が大きくなり落橋に至ることが懸念される。このため、損傷度 V となる可能性が高いことから、詳細調査を実施し損傷度判定が必要な基礎とする。

表-3 各荷重レベルに対する基礎の損傷度の一般的な傾向

	L1	L2-Type I	L2-Type II	備考
直接基礎	I	III	V	
鋼管杭	I	I	III	
場所打ち杭	I	I	III	
RC 杭	I	V	V	せん断破壊
PC 杭	I	V	V	せん断破壊
ケーソン基礎	I	V	V	せん断破壊
木杭	I	V	V	
単列パイルベント橋脚	I	V	V	

5. 耐震性能水準判定手法

既設橋基礎の耐震補強の優先度を整備する上では、既設橋基礎の基数が膨大であるため、簡易な方法で耐震性の劣る基礎を抽出することが合理的であると考えられる。表-3 の結果や平成 18 年度からの検討結果に基づき、基礎の脆弱度判定フロー (案) を図-7 に提案する。まず、第一段階としては限られた資料(完成図書類・土質調査結

果)を基に、明らかに耐震性の劣る基礎を抽出する(1次判定)。ここで判別できない基礎については第二段階で詳細計算により個別に判定を行う(2次判定)。

ここに、「詳細計算が必要」とは、例えば、ケーソン基礎の軸方向鉄筋量が非常に少なく、基礎本体の曲げ性能において $M_c > M_u$ となっている場合の実際の基礎の挙動を把握する。これについては、現在、日本圧気技術協会との共同研究「既設ケーソン基礎の耐震性能に関する研究」(平成19年度～平成20年度)において、耐力および変形性能の評価方法を研究しているところである。この結果を詳細計算に反映させる。

6. まとめ

前述した既設道路橋基礎の耐震性能水準評価手法のまとめを以下に示す。

- (1) 既設道路橋基礎の損傷度を区分し、既設道路橋基礎の耐震補強の優先度を整理した。
- (2) 既設道路橋基礎の損傷度を定量的に把握するため、既設道路橋基礎をモデルとした静的荷重漸増解析を行い検証した。
- (3) 膨大な数の既設道路橋基礎に対し、基礎の脆弱度を簡易に判定する手法を立案した。
- (4) (2)の結果および過去の被災事例より既設基礎の耐震補強の優先度が高い基礎は以下のとおりである。
 - (a) 単列パイルベント橋脚、水中で突出しているケーソン基礎・・・せん断破壊が懸念される
 - (b) 明らかに耐震性に劣る基礎・・・木杭
 - (c) 液状化の影響を受ける直接基礎、ケーソン基

礎、摩擦杭・・・支持力喪失

- (d) 液状化に伴い側方移動する地盤上の既製コンクリート杭・・・部材の破壊による水平支持力の喪失

また、今後の課題と予定について以下に示す。

- (1) 基礎の脆弱度判定フロー(案)の精度検証・向上
- (2) 既設道路橋基礎の耐震補強プログラム(案)の作成
- (3) 液状化判定の簡易化
- (4) フーチングの損傷が基礎の損傷度に及ぼす影響の考慮
- (5) ケーソン・地中連続壁基礎の損傷度の判定手法

参考文献

- 1) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/06/060302_.html
- 2) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震前対策編)，平成18年9月，丸善，2006。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成14年3月，丸善，2002。
- 4) 鳥畑他：杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する研究(その1)～(その3)，土木学会全国大会第63回年次学術講演会論文集，2008.9。
- 5) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針，1971。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，昭和55年5月，丸善，1980。

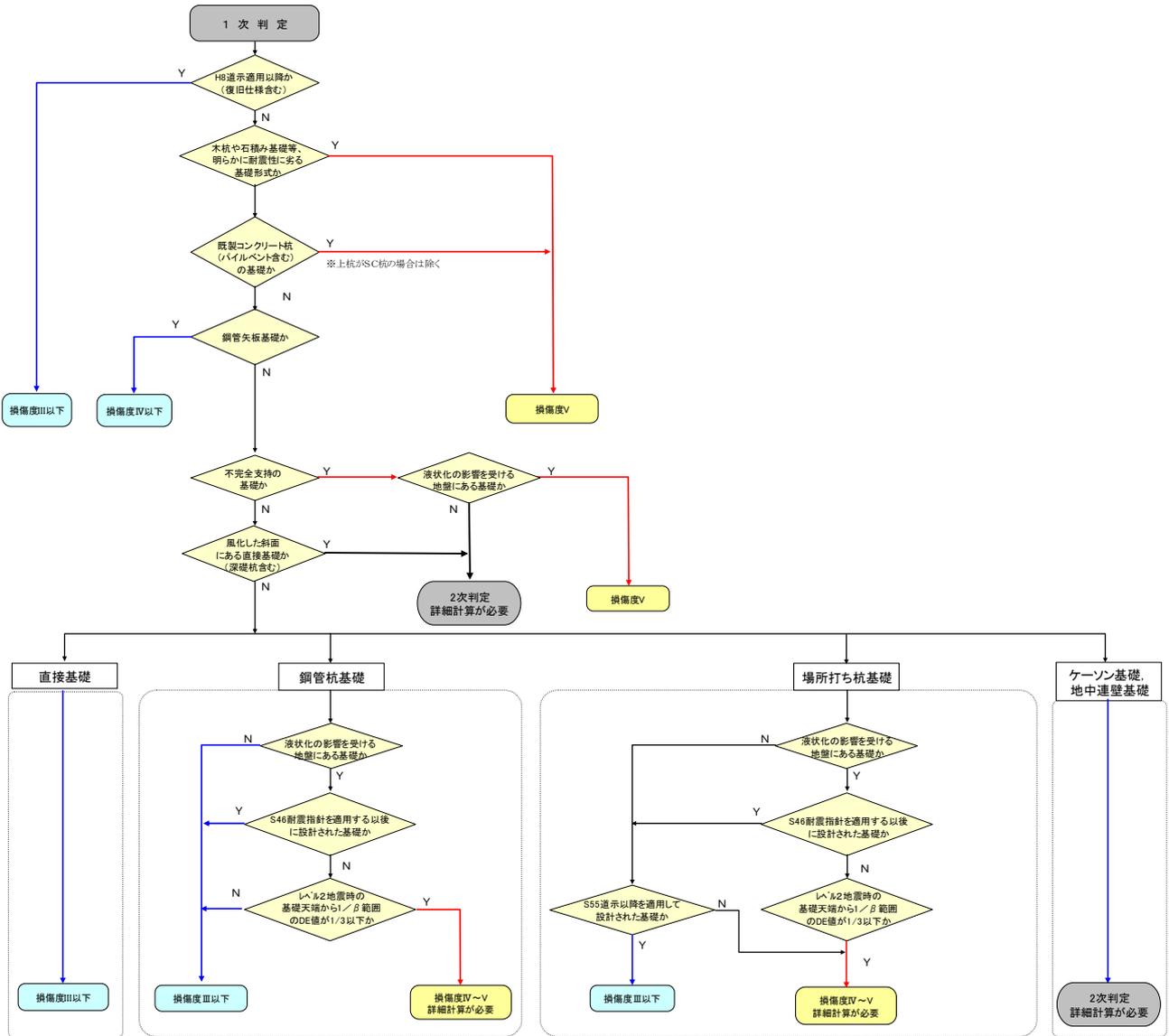


図-7 基礎の脆弱度判定フロー (案)

SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF EXISTING HIGHWAY BRIDGE FOUNDATIONS

As increase with the likelihood of severe earthquakes, public demands are extremely high for mitigating the obstruction of emergency activities after a severe earthquake. The retrofit and reinforcement of existing structures in highways is essential so that designated highways continue to work as emergency road networks after such an earthquake. However, there are literally many existing highway bridges that were not design in accordance with the latest design requirements in codes, including the seismic performance of foundations. However, no systematic decision making strategy is available to prioritize existing foundations from the viewpoint of the needs for seismic retrofitting and reinforcing, because it is unclear how much we can expect the seismic performance in the existing foundations. Therefore, the missions of this study are 1) to develop the multi-level seismic performance demands for existing foundations and 2) to guide the prioritization of the needs for seismic retrofitting and reinforcing of existing foundations.

In 2007, we have proposed a method to evaluate the vulnerability of existing foundations as a function of design year, foundation type, ground condition and so forth.