

既設道路橋基礎の耐震性能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：CAESAR 橋梁構造研究グループ

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を進めるためには、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、本研究では、1)地震による基礎の損傷パターンの分類整理、2)各地震動レベルにおける損傷度による耐震補強の優先度の整理、3)過去の被災事例の分析、4)設計基準および施工技術の変遷調査、5)既設道路橋基礎の構造特性を反映した静的荷重漸増解析モデルの提案と計算結果の解釈、6)耐震性能判定フローの作成、7)液状化の簡易判定法の整備を行った。

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、耐震水準をネットワークとして、段階的に向上させるための第一段として、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¹⁾²⁾。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。道路橋示方書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、地盤の流動化の影響を受ける可能性のある連続桁橋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。

本研究では、1)地震による基礎の損傷パターンの分類整理、2)各地震動レベルにおける損傷度による耐震補強の優先度の整理、3)過去の被災事例の分析、4)設計基準および施工技術の変遷調査、5)既設道路橋基礎の構造特性を反映した静的荷重漸増解析モデルの提案と計算結果の解釈、6)耐震性能判定フローの作成、7)液状化の簡易判定法の整備を行った。

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。図-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-2 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-曲線)の模式図を図-1 に加えて図-3 から図-5 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 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。木杭については、直接基礎または杭基礎と見なせる場合があり、杭と見なした場合には変形性能がほとんどない基礎形式となる。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、次のような状態を想定する。

損傷度 I：基礎およびそれを構成する部材や基礎を支

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基礎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-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。

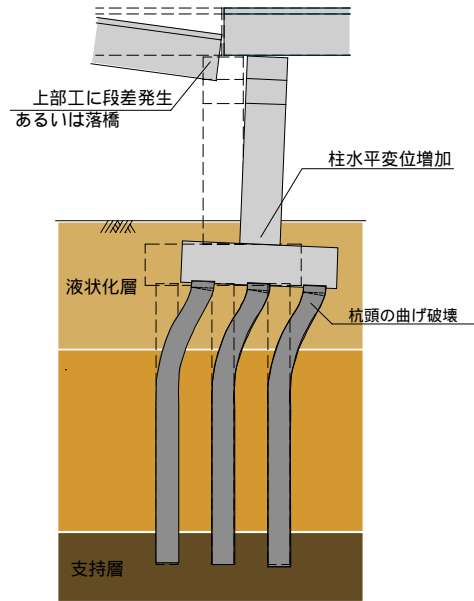


図-2 崩壊パターンの一例(杭基礎の曲げ破壊)

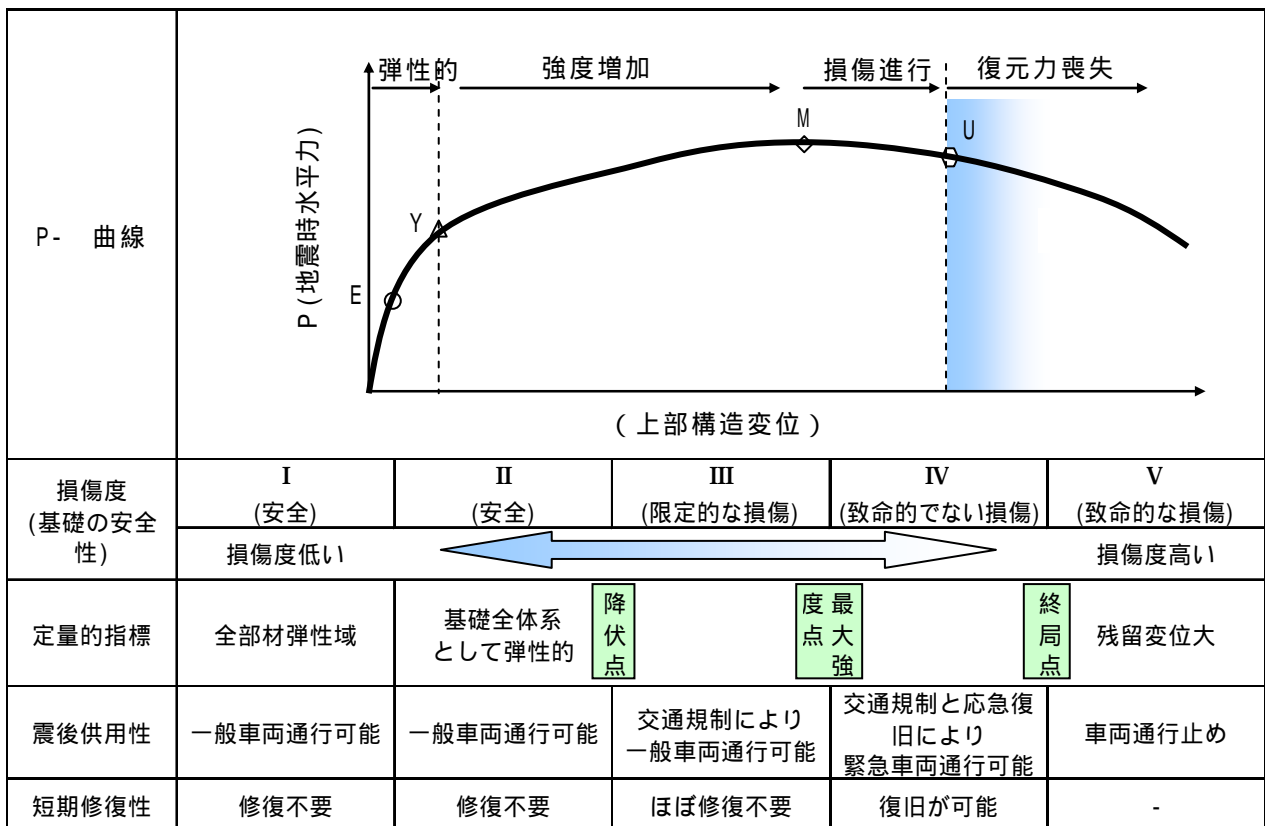


図-1 既設道路橋基礎の耐震性能水準区分のイメージ

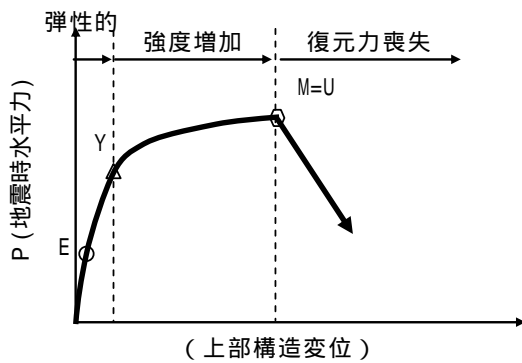


図-3 変形性能が乏しい場合

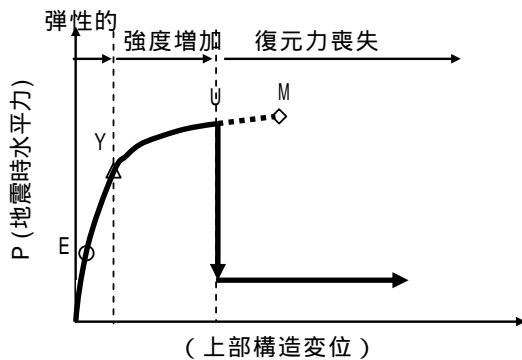


図-4 変形性能がほとんどない場合

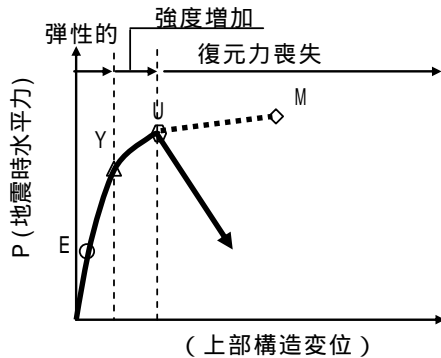


図-5 基礎底面地盤の液状化の場合(破線は変形性能に富む場合の模式図を示す)

損傷度：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、十分な安全性と残存変形性能を有する。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：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が不能な状態と想定する。

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。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路橋示方書 V 耐震設計編⁹⁾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、損傷度 V に達すると想定される基礎を損傷度 以下に収まるように整備することを目標とする。

4. 被災事例と基礎の設計基準および施工技術の変遷との関係

1923年の関東地震、1948年の福井地震では、基礎の支持力不足、それに伴う下部構造の移動、傾斜が原因と考えられる落橋が生じた事例もあった。

昭和 20 年代までは、掘削、杭打ち等の作業は人力主体であり、杭長も 10~15m 程度以下であったようで、本格的な機械施工で長尺杭が施工出来るようになったのは昭和 30 年代に入ってからのものである³⁾。また、日本道路協会より下部構造設計指針、くい基礎の設計篇⁴⁾が出版され、原則として支持杭を用いることが明文化されたのが昭和 39 年である。したがって、1950 年代後半あるいは 1960 年代の前半までは、杭基礎では、施工能力の制約から良質な支持層に達していない杭や、今日的な観点から見たときに適切でない条件下で摩擦杭が選定された例もあるものと思われる。

次に、1964 年の新潟地震では、パイルベント橋脚や不完全支持された杭基礎を有する橋梁において、地震動による大きな振幅の発生、地盤の液状化・流動化発生により、落橋を伴う大きな被害が生じた。その後、昭和 46 年(1971 年)には、道路橋耐震設計指針⁵⁾が発刊され、

液状化に対する設計法が整備されている。その後も設計・施工技術は向上し、1995年の兵庫県南部地震では、著しい被害を生じたものは橋脚や支承部の損傷を伴っており、基礎については地震時の安定性に影響のある沈下や鉄筋の破断、コンクリートの剥離等の構造的な被害は生じておらず、水際線等で液状化に伴う地盤流動が生じた箇所でも残留変位を生じた基礎があるが、損傷は曲げひび割れ程度で、これが主要因となり落橋を生じたものはない⁶⁾。

兵庫県南部地震の被災においては、場所打ち杭の損傷に関する詳細調査が行われたが、上述したように甚大な被害は報告されていない⁶⁾。これは、常時、レベル1地震時の設計がきちんとなされ、安全余裕があったこと、また適切な構造細目が与えられてきたことによると思われる。例えば、杭頭部には構造細目によって結果として十分な横拘束鉄筋が配置されており、じん性およびせん断耐力に富むような構造にされていたことも要因である⁷⁾と考える。一方で、平成8年道路橋示方書には、既製コンクリート杭の地震時に杭体が塑性化するおそれのある範囲には、スパイラル鉄筋を中心間隔100mm以下で配置することが規定された⁷⁾が、過去には横拘束鉄筋量が少なく、既往の地震被害においても、建築基礎で杭体のせん断破壊やそれを原因とする建物の傾斜が多数認められている⁸⁾。

以上のことから、基礎の支持力不足、橋脚形式、地盤条件は耐震性判定の重要な要因であり、次のような条件を満たす基礎は、大地震に対する安全余裕度が相対的に小さいと考えられる。

(a) 良質な支持層に根入れされていないなど、常時・レベル1地震時の安定計算を満足しないような基礎。これは過去の基礎の施工能力に依存していると思われる。

(b) 過去の既製コンクリート杭などに見られるように、横拘束鉄筋の量が少なく、部材のじん性およびせん断耐力が劣るもの。これは、構造細目の変遷に依存しているものと思われる。

また、兵庫県南部地震においても、臨海部にある杭基礎では地盤の流動化の影響や護岸の損傷の影響を受け、基礎にも過大な残留変位が生じた事例もある。したがって、次のような条件を満たす基礎についても、耐震補強の優先順位は高くなるであろう。

(c) 地震の影響により不安定になり、過大な残留変位が生じるような地盤にある基礎。例えば斜面上にあり、地震時に斜面が安定しないことが想定される場合、水際線近傍にあり、液状化に伴う地盤の側方流動の影響を受

ける場合など。

5. 既設橋基礎の耐震性評価

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のどの区分に評価されるのか、既設道路橋基礎に対して現行の基準にしたがっ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-1に示す28基を各年代および各基礎形式で任意に選定した。

表-1 既設道路橋基礎の解析対象モデル

	S.46年 より前	S.46年 耐震指針	S.55年 道示
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	-	-

さらに、場所打ち杭については設計年代および詳細に区分した液状化の程度と耐震性能との関係を把握するために、当時の設計基準に従って復元設計を行い、現行の基準にしたがった静的荷重漸増解析の結果から耐震性能区分を評価して上記の試算結果を補完した。このときの解析対象モデル数を表-2に示す。設計年代は、1) 液状化に対する設計が行われていなかった昭和46年の耐震設計指針が適用される前のもの、2) 液状化に対する設計が取り入れられた昭和46年の耐震設計指針が適用されたもの、3) コンクリートの許容せん断応力度が低減され、杭頭部の最小帯鉄筋量が規定された昭和55年の道路橋示方書が適用されたものの3通りとした。また、液状化の程度は、液状化による土質定数の低減係数 D_E の値の大きさによって区分し、 $D_E=0, 1/6, 1/3, 2/3$ の4通りとした。

表-2 液状化の程度をパラメータとした解析対象モデル数

土質定数の低減係数	地盤種別	S46年より前	S46年耐震指針	S55年道示
$D_E=0$	種	1	2	1
	種	-	1	1
$D_E=1/6$	種	2	-	-
	種	2	-	-
$D_E=1/3$	種	3	-	2
	種	2	-	1
$D_E=2/3$	種	2	-	-
	種	2	-	-

(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-曲線は図-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が μ 2 と判定された。また、文献¹¹⁾にあるように密に配置され、かつフーチングに結合されていないと見なせる木杭基礎は、直接基礎と同様な判断が可能と思われる。

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の影響を受ける場合のP-曲線は、図-5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 μ 4 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。

(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-曲線は図-1に示す曲線に分類される傾向が見られた。ここで、平成2年の道示以降、杭頭部には局部座屈を防止する目的で中詰めコンクリートを充填する規定となり、鋼管杭の変形性能が向上している。しかし、検討対象とした鋼管杭基礎は、平成2年の道示以前であるため、杭頭部に中詰めコンクリートの無い鋼管杭と設定する。中詰めコンクリートが無い場合の許容塑性率を決定するためのデータは十分でないが、文献¹²⁾を参考に損傷度区分に用いる塑性率を中詰めコンクリートがある場合の1/2程度と設定することで、安全側の仮定であると考えた。したがって、損傷度 μ 2 に対応する許容塑性率に $\mu=2$ を、損傷度 μ 4 に対応する許容塑性率に $\mu=4$ を用いた。

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 μ 2 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($D_E=0$)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。その割合は昭和46年以前に建設された基礎で顕著であった。

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

計算において、鉄筋やコンクリート強度の基準強度を想定するだけでなく、実際の材料強度を考慮し、耐震性能の向上を想定したケースも設定した。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-曲線は図-1に示す曲線に分類される傾向が見られた。ここで、設計年代に応じて杭頭部の帯鉄筋量に関する規定が異なるため、現行の基準と構造細目が同じ昭和55年の道示を基準に各年代の応答塑性率の上限値を設定した。その関係を表-3に示す。

表-3 損傷度区分に対応する塑性率の上限値

	損傷度 μ 2	損傷度 μ 4
S46より前	μ 2	μ 4
S46耐震指針	μ 3	μ 6
S55道示	μ 4	μ 8

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IIに対して、概ね損傷度 μ 2 と判定される。レベル2地震動タイプIに対しては損傷度 μ 2 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¹⁰⁾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。

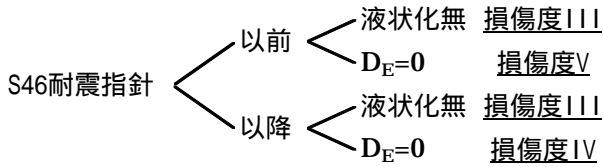


図-6 鋼管杭・場所打ち杭の適用基準の違いによる損傷度イメージ (L2-Type)

1) 昭和 46 年の耐震設計指針が適用される前の基礎

曲げ降伏に先行してせん断破壊が生じないとして解析を行った結果、 $D_E=0$ および $1/6$ の場合、損傷度_Ⅴ に区分され、 $D_E=1/3$ および $2/3$ の場合では損傷度_Ⅳ 以下に区分された。一方、いずれの D_E 値においても解析では曲げ降伏に先行してせん断破壊が生ずるため、ほとんどが損傷度_Ⅳ に区分された。

この時代の基礎は、液状化に対する設計は行われていないものの、曲げ降伏に先行してせん断破壊が生ずる可能性を無視すれば、 D_E 値が $1/3$ 以上あれば損傷度が_Ⅳ 以下となる。これは、この当時の安定計算は慣用法によって行われており、慣用法では現在用いられている変位法よりも断面力が大きく算定されることによると考えられる。

2) 昭和 46 年の耐震設計指針が適用された基礎

曲げ降伏に先行してせん断破壊が生じないとして解析を行った結果、 $D_E=0$ および $2/3$ のいずれの場合でも損傷度_Ⅳ 以下に区分された。一方、いずれの D_E 値においても解析では曲げ降伏に先行してせん断破壊が生ずるため、損傷度_Ⅳ に区分された。

この時代の基礎は、液状化に対する設計が行われているため、曲げ降伏に先行してせん断破壊が生ずる可能性を無視すれば、 D_E 値に関わらず損傷度が_Ⅳ 以下となる。

3) 昭和 55 年の道路橋示方書が適用された基礎

曲げ降伏に先行してせん断破壊が生じないとして解析を行った結果、 $D_E=0$ および $1/3$ とともに損傷度_Ⅳ 以下に区分された。なお、解析では曲げ降伏に先行してせん断破壊が生じない結果であった。

昭和 55 年の道路橋示方書では、コンクリートの許容せん断応力度が低減されたこと、杭頭部の最小帯鉄筋量の規定が設けられたことに加え、極限支持力の推定式における先端支持力度が低減されたために必要な杭断面

(杭本数もしくは杭径)がこれ以前に比べて増加している可能性が高いことによるものと考えられる。

以上のことから、昭和 46 年の耐震設計指針が適用される前の場所打ち杭基礎のうち、杭頭部付近において液状化による土質定数の低減係数 D_E 値が $1/6$ 以下となるような地盤中にあるものは変形性能に乏しい基礎として損傷度_Ⅳ に区分する。

なお、昭和 55 年の道路橋示方書が適用される以前の基礎では、曲げ降伏に先行してせん断破壊が生じ、損傷度_Ⅳ に区分されるものもあった。しかし、これまで杭頭部にせん断破壊が生じた被災事例が見受けられないことから、全体評価として損傷度_Ⅳ 以下と扱うことにする。

以上の計算結果をまとめると表 4 のようになる。

表 4 場所打ち杭の設計年代と液状化の程度による損傷度の傾向

土質定数の低減係数	S46 年より前	S46 年耐震指針	S55 年道示
$D_E=0$	以下	以下	以下
$D_E=1/6$			
$D_E=1/3$			
$D_E=2/3$			

(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- 曲線は図-3 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- 曲線も図-3 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_Ⅳ、レベル 2 地震動タイプⅡでは損傷度_Ⅳ 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-曲線も図-3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、液状化に対する設計が取り入れられた昭和46年耐震指針⁵⁾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I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。このような脆性的な曲げ破壊先行型を示す既設ケーソン基礎を対象にした実験は、ほとんどなく、鈴木等¹³⁾がケーソンの部分模型を作成し、気中にて低鉄筋RC部材の終局挙動に着目した実験を行った結果が報告されている程度である。また、土木研究所では「橋梁基礎の耐震補強技術に関する試験調査」の研究課題があり、気中ではなく地盤内にケーソン供試体を設置して載荷実験を行っている。いずれの実験においても、ケーソン本体の軸方向鉄筋が少ないため、周面に貫通するクラックが生じる破壊形態を示した。しかし、地中実験では、側壁周方向の貫通したクラックにより、基礎が上下に分断され、上方のケーソン躯体が直接基礎のように浮上りと着地、クラック部で鉄筋が伸び出しを繰返す抵抗機構の変化が見られた。これが、既設ケーソン基礎の一般的な曲げ破壊形態考えられる。しかし、破壊後の挙動は気中と地中では異なり、気中では貫通クラックの発生後に部材の強度低下が見られたが、地中では周辺地盤からの受働抵抗により、基礎全体系として見た場合の強度低下は小さく、地震中に安定を保ち、かつ、地震後においても鉛直荷重を問題なく支持することが可能であった。以上の結果から、曲げ破壊先行型のケーソン基礎は耐震性能として損傷度I以下に位置づけることにした。

なお、せん断破壊が想定される直角方向の耐震性能評価についても、未だ知見は十分でない。鈴木等は気中実験により、ケーソン基礎のような低鉄筋大断面部材でも、ディープビーム的なせん断破壊的な挙動が期待できると

の報告をしているが、断面形状の違いや軸力の大きさを考慮した場合、鈴木等による実験結果が代表的なせん断破壊形態を示すものであるかを判断するには、十分な知見がない。このため、未解明な点が多いせん断破壊型の既設ケーソン基礎は2次判定へ移行させるものとした。しかし、耐震性能を判定するための手法が十分整備されていないため、今後も載荷実験等を実施し、耐震性能を評価する手法の整備を進める必要がある。

(7) 木杭

木杭基礎を他の杭基礎形式と同様に考えた場合、一般に木杭は変形性能が乏しい基礎に分類され、P-曲線は図-3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、杭形式とした場合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。

前述の通り、密な杭間隔で配置され、かつフーチングに結合されていない木杭基礎は直接基礎としての判断が可能である。

(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-曲線は図-4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、設計年代からその多くは、杭頭部に中詰めコンクリートの無い鋼管杭であるため、前述の(2)鋼管杭と同様、文献¹²⁾を参考に損傷度区分に用いる許容塑性率に中詰めコンクリートがある場合の1/2程度と設定することで、安全側の仮定であると考えた。したがって、損傷度Iに対応する許容塑性率に $\mu=2$ を、損傷度IIに対応する許容塑性率に $\mu=4$ を用いた。計算の結果、鋼製単列パイルベント橋脚も損傷度IIに区分する。

6. 耐震性能判定手法

これまでの検討結果に基づき、基礎の耐震性能判定フローを図-7に提案する。まず、第1段階としては限られた資料(既往のデータベース、完成図書類)を基に、耐震性能が劣る可能性が高いもの、耐震性能が十分である可能性が高いものを簡易に抽出する(1次判定)。ここで判定できない基礎については、第2段階で詳細計算によ

って個別に判定を行う(2次判定)。なお、2次判定に用いる詳細計算手法は、今後追ってまとめる予定である。

7. 液状化簡易判定手法の検討

鋼管杭及び場所打ち杭基礎は、設計年代及び液状化の程度(D_E 値)が耐震性能に影響を及ぼすことが分かった。しかし、特に古い年代に建設された橋梁では、液状化の判定に必要な土質調査資料が残っていないことも想定される。また、膨大な数の既設道路橋基礎に対して耐震補強を行う優先順位を決定する上では、判定手法は簡易であることも望まれる。そこで、簡易な方法によって液状化判定を行うための検討を行った。

道路橋示方書においては、土質定数の低減係数(D_E 値)は、動的せん断強度比 R と液状化に対する抵抗率 F_L によって決定され、これらの値は、標準貫入試験の N 値、深度および地盤面における設計水平震度 k_{hg} の影響を大きく受ける。地盤面における設計水平震度 k_{hg} は、地震動の種類(タイプ or タイプ), 地盤種別(種)および耐震設計上の地域(A,B,C)によって区分されている。

そこで、平成8年度以降に設計された全国の道路橋80橋の土質調査資料から、深度、標準貫入試験の N 値および液状化低減係数 D_E 値の関係を整理したところ、地域区分(A,B,C)、深度および N 値によっておおよその D_E 値が予測可能であることが分かった。図-8は、例としてA地域に対する整理結果を示したものであり、タイプ及びタイプで得られた回帰線に対し+2の幅を持たせ、安全側に評価するように D_E 値を区分する境界線を描いた。

このような液状化判定の簡易ノモグラムを整備することにより、土質調査資料が残っていても耐震性能の判定が可能となる。

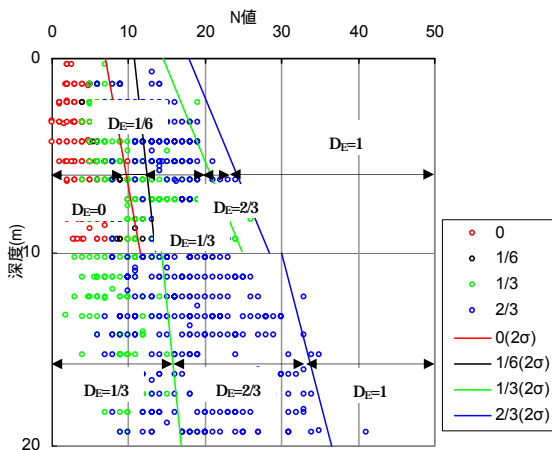


図-8 液状化簡易判定ノモグラム(A地域の例)

8. まとめ

本研究での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) 地震による基礎の損傷パターンを分類整理した。
- (2) 各地震動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。
- (3) 過去の被災事例の原因分析と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。
- (4) 既設道路橋基礎をモデルとした静的荷重漸増解析を実施し、設計年代別の損傷度を区分した。
- (5) 詳細に区分した液状化の程度と場所打ち杭基礎の耐震性能との関係を整理した。
- (6) 簡易に液状化判定を行うことのできるノモグラムを作成した。
- (7) 以上の結果を踏まえ、耐震性能判定フローを作成した。

また、今後の課題と予定について以下に示す。

- (1) 道路橋基礎の耐震性判定マニュアルの整備
- (2) フーチングの補強方法の検討
- (3) 基礎の補強方法の選定手法の検討
- (4) ケーソン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) 多田宏行編著：橋梁技術の変遷，鹿島出版会，2000。
- 4) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇，1964。
- 5) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針，1971。
- 6) 建設省土木研究所：平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告，1996。
- 7) 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。
- 8) 既設道路橋基礎の補強に関する参考資料，丸善，2000。
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，平成14年3月，丸善，2002。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，昭和55年5月，丸善，1980。
- 11) 羽矢洋，西岡英俊，西田尚史，木村礼夫：木杭基礎橋脚に対する大変位載荷実験，第40回地盤工学研究発表会，2005.7

12) 地盤工学会関西支部：杭基礎に関する最近の動向 講習会資料，平成8年9月

13) 鈴木直人，井上晋，青島行男，村上弘：低鉄筋比RC部材の終局挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，2000.

注記
 1. 各判定結果の損傷度は、レベル2地震動に対するものである。
 2. 1印の判定項目は、土質柱状図が記載された完成図書等が必要である。
 3. 2印の判定項目は、H8防災点検データベースにおける「液状化の発生の可能性」を適用し、「可能性が高い」を「Y」としてもよい。
 4. 3印の判定項目は、H8防災点検データベースにおける「液状化の発生の可能性」を適用し、「可能性が高い」および「場合によっては可能性あり」を「Y」としてもよい。

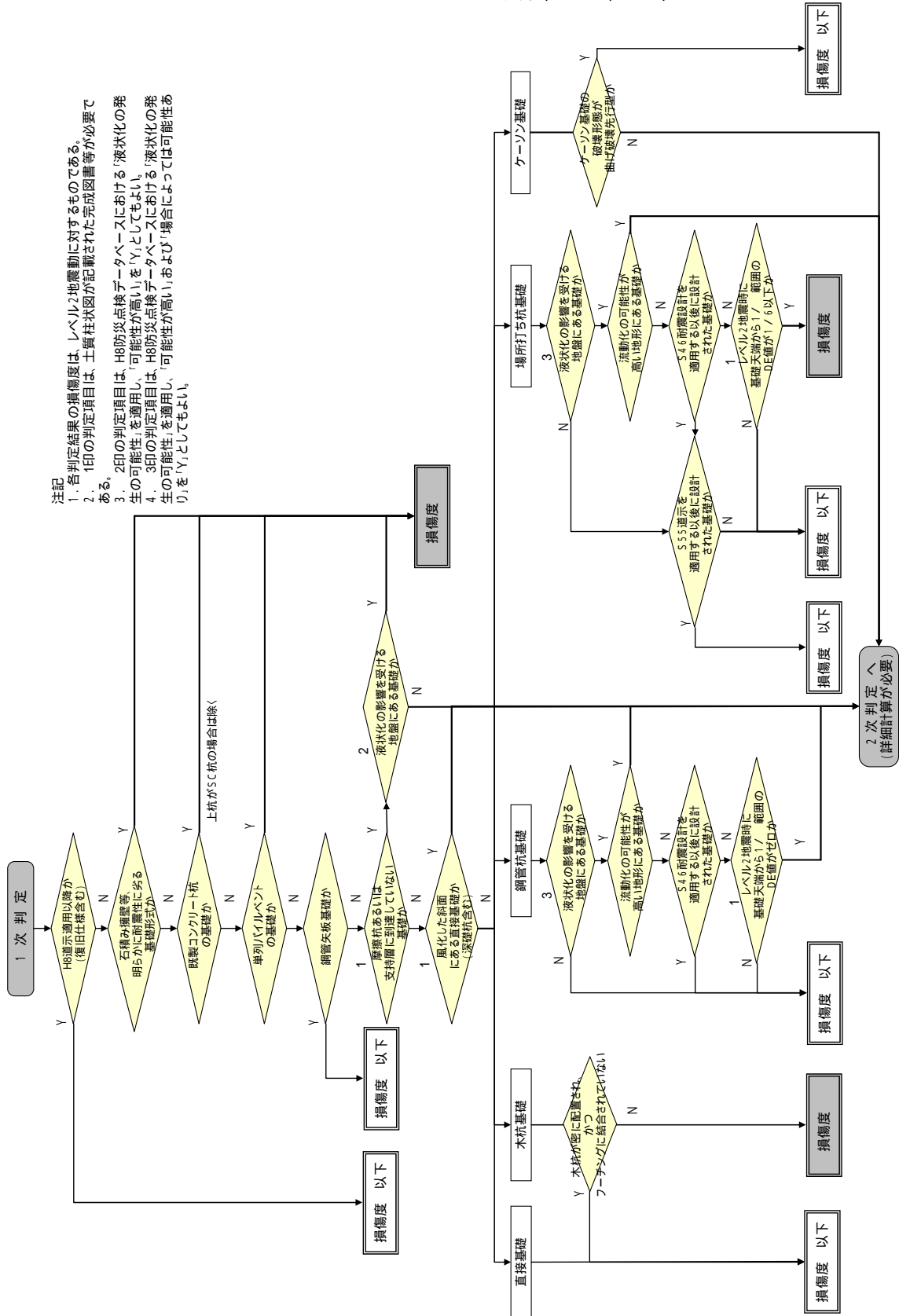


図-7 基礎の耐震性能1次判定フロー(案)

SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF EXISTING HIGHWAY BRIDGE FOUNDATIONS

In terms of highway bridge foundations, damage case histories, earlier design norms and construction technique, trial seismic design of a large number of typical existing foundations designed with earlier representative design norms, a large-scale experiment on the ductility of RC columns with little reinforcement so forth have been conducted to clarify the degree of seismic vulnerability. Finally, a draft spread sheet and manuals to evaluate the degree of seismic vulnerability and give priority of seismic reinforcement of existing highway bridge foundations have been proposed.