

3.2 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、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。平成 19 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、基礎の設計年代、基礎形式、地盤条件等のパラメータと基礎の脆弱度の関係を整理し、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。今年度は、詳細に区分した液状化の程度と場所打ち杭基礎やパイルベント橋脚の耐震性能との関係を分析し、基礎の判定フローの更新を行った。さらに、基礎の設計年代と液状化の程度が損傷度に影響を及ぼすため、簡易に液状化判定が可能な手法を開発した。

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。

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の調査を行い、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、地震後による基礎の損傷パターンを分類整理し、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。そして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を行い、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。

平成 20 年度は、過去の設計基準にしたがって場所打

ち杭基礎の復元設計を行い、現在の基準にしたがって静的荷重漸増解析を行って詳細に区分した液状化の程度と耐震性能との関係性を評価した。鋼製単列パイルベント橋脚についても追加検討を行い、耐震性能を明確にした。そして、その結果を基に平成 19 年度に提案した基礎の脆弱度判定フローの更新を行った。また、液状化の判定を簡易に行うためのノモグラムを作成した。

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。

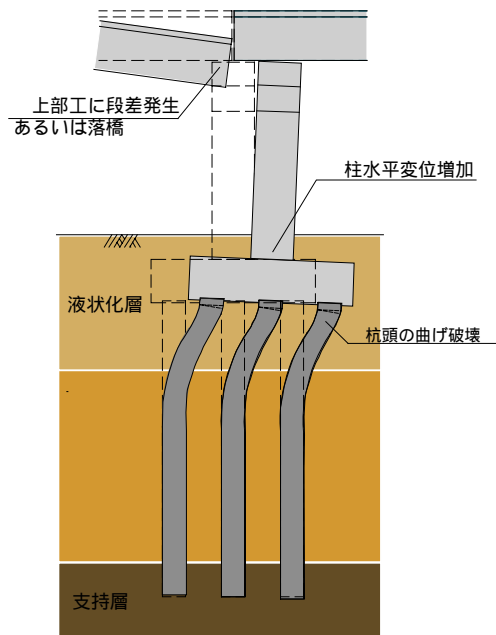


図-2 崩壊パターンの一例(杭基礎の曲げ破壊)

前年度までの検討結果より、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

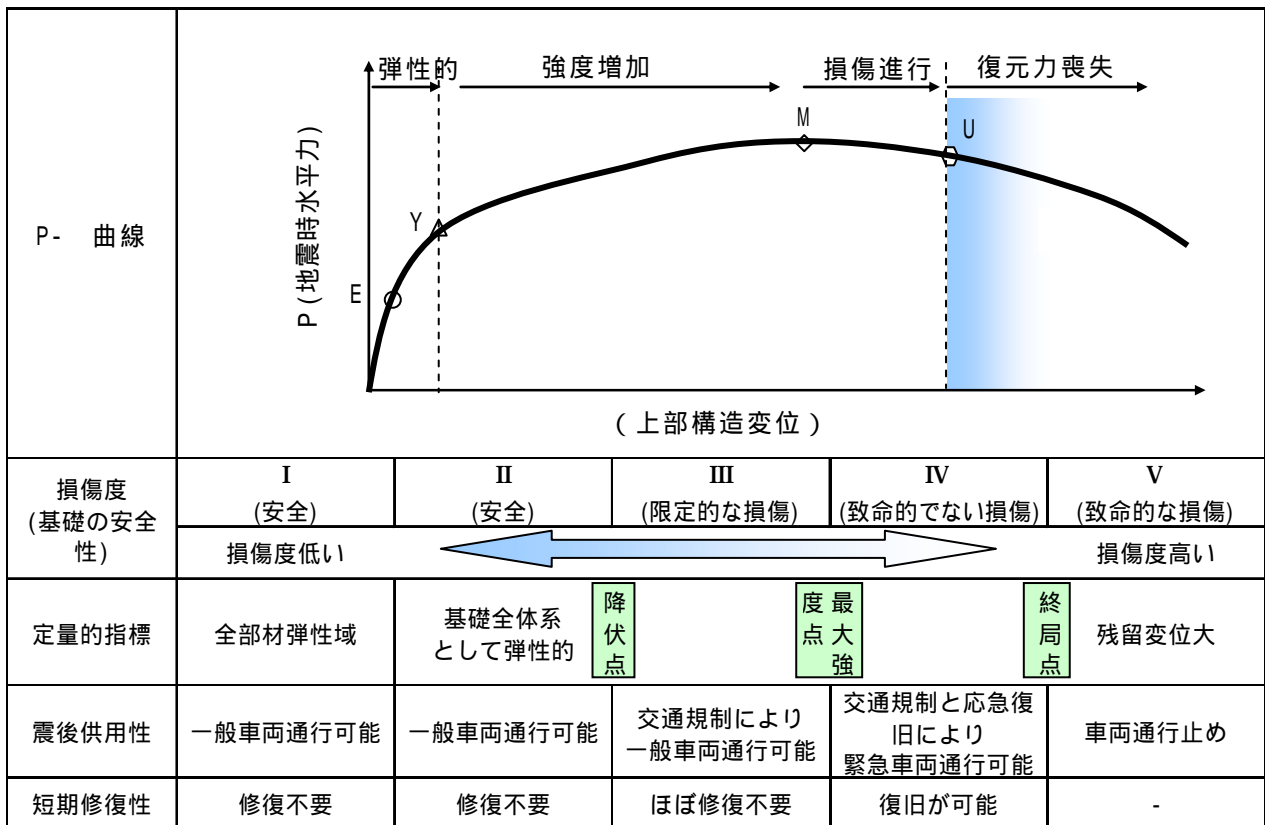


図-1 既設道路橋基礎の耐震性能水準区分のイメージ

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。

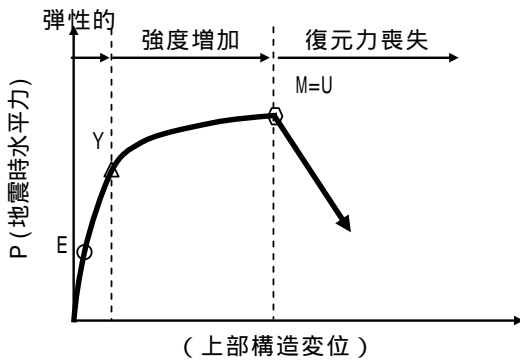


図-3 変形性能が乏しい場合

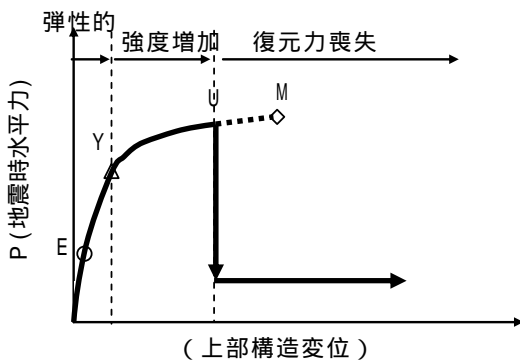


図-4 変形性能がほとんどない場合

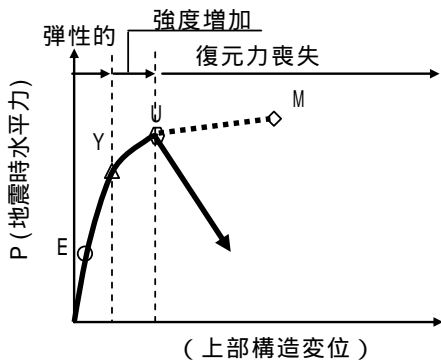


図-5 基礎底面地盤の液状化の場合(破線は変形性能に富む場合の模式図を示す)

損傷度 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。

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 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、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。

4. 液状化の程度と場所打ち杭基礎の耐震性

前年度の検討において、図-6 のように鋼管杭・場所打ち杭基礎の耐震性能は設計年代や液状化の有無によって大きく異なることが判明した。

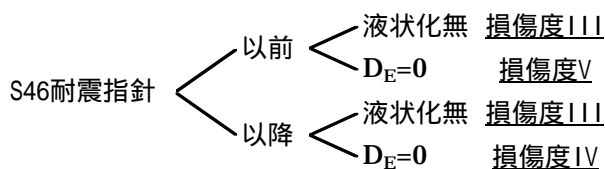


図-6 鋼管杭・場所打ち杭の適用基準の違いによる損傷度イメージ (L2-Type)

そこで、今年度は前年度までの検討ケースが不足していた昭和 46 年以前の設計基準で設計された基礎に重点を置いた。検討は前年度同様、実橋をモデルにその当時の基準にしたがって場所打ち杭基礎の復元設計を行い、設計年代および液状化の程度をパラメータとした耐震性の確認を行った。計算においては、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。

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。

当時の基準にしたがって復元設計を行った場所打ち杭基礎に対し、現行基準にしたがって静的荷重漸増解析を行って P- μ 関係を求め、2. で整理した耐震性能水準のどの区分に評価されるのかを評価した。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。解析対象モデル数を表-1 に示す。

表-1 解析対象モデル数 (全 22 ケース)

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	-	-

また、構造細目 (杭頭部の帯鉄筋) は、杭体降伏後の変形性能に影響を与え、杭頭部の帯鉄筋量に関する規定は設計基準によって相違がある。よって、設計基準によ

る杭頭部の帯鉄筋量の相違は各損傷度に対応する塑性率の上限値に反映させることとした。具体的には、次のとおりである。道路橋示方書に規定される杭体の曲げモーメント・曲率関係 (M- μ 関係) における終局時の曲率 μ_u の杭体降伏時の曲率 μ_y に対する比率 μ_u / μ_y を各設計年代に対して求める。昭和 55 年の道路橋示方書に規定される杭頭部の最小帯鉄筋量は、現行の道路橋示方書の規定と同様であるから、昭和 55 の道路橋示方書の帯鉄筋量に対する上記比率 μ_u / μ_y を基準として、各年代の許容塑性率を決定した。設計年代と損傷度に対応する塑性率の上限値の値を表-2 に示す。

表-2 損傷度区分に対応する塑性率の上限値

	損傷度	損傷度
S46 より前	$\mu 2$	$\mu 4$
S46 耐震指針	$\mu 3$	$\mu 6$
S55 道示	$\mu 4$	$\mu 8$

(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 III に区分され、 $D_E=1/3$ および $2/3$ の場合では損傷度 II 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 III 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 II 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 II 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 III 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 II 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 II 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 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 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 以下と扱うことにする。

以上の計算結果をまとめると表-3 のようになる。

表-3 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
$D_E=1/6$			
$D_E=1/3$			
$D_E=2/3$			

5. 鋼製単列パイルベント橋脚の耐震性能

前年度の検討では、昭和 46 年以前に設計された単列パイルベント橋脚を対象に、杭体を鋼管杭及び PC 杭としたケースを実施し、いずれも損傷度 に該当することが計算により判明した。今年度は、平成 8 年の防災点検データを調査し、本橋脚形式が昭和 55 年の道路橋示方書より前の基準で設計されたものが多数を占め、当時、採用形式が最も多かった鋼製パイルベント橋脚を対象に昭和 46 年以前と液状化に対する設計が取り入れられた昭和 46 年の耐震設計指針をもとに、実橋の復元設計を行い、現行基準にしたがって静的荷重漸増解析を実施し、液状化の程度による耐震性能照査を行った。なお、検討ケースは 種地盤とし、液状化の程度が小さい低減係数 $D_E = 2/3$ 及び非液状化の合計 4 ケースとした。また、損傷度判定に用いる塑性率の上限値は、杭頭部に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ことが規定された平成 2 年の道示適用前であることから、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 ⑨を参考に損傷度区分に用いる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 に対応する許容塑性率に $\mu=2$ を、損傷度 に対応する許容塑性率に $\mu=4$ を用いた。

計算の結果を表-4 に示す。以上から、鋼製単列パイルベント橋脚の損傷度は に区分する。

表-4 鋼製単列パイルベント橋脚の損傷度区分

	S46 年より前	S46 年耐震指針
$D_E=2/3$		
$D_E=1$		

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。

これまで木杭基礎は耐震性能の低い基礎（損傷度 ）に分類していたが、文献 ⑦にもあるように木杭が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場合には直接基礎と同様な判断が可能と思われるので判定フローを修正した。

さらに、平成 8 年道示適用前のケーソン基礎であるが、軸方向鉄筋量が少ないために $M_c > M_u$ となる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が複数存在する。このような基礎を対象とした実験は、ほとんどなく、鈴木等 ⑩がケーソンの部分模型を作成し、気中にて低鉄筋比 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 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小を考慮した場合、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. 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既往のボーリング資料により耐震性能の判定が可能となる。

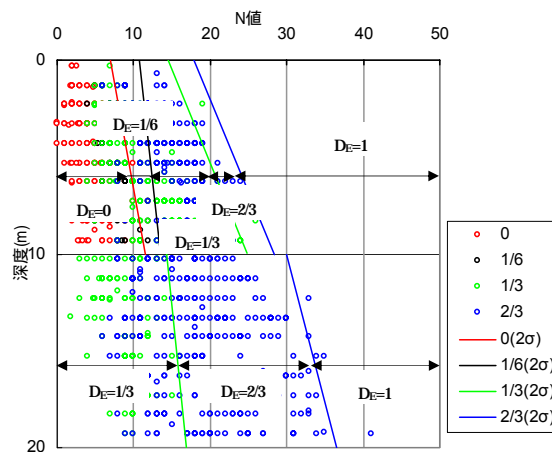


図-8 液状化簡易判定ノモグラム (A 地域の例)

8. まとめ

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) 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、表-3の結果を得た。
- (2) 鋼製単列パイルベント橋脚は設計年代及び液状化の程度に拠らず、損傷度 となる。
- (3) これまでの成果に基づき、耐震性能判定フローを更新した。
- (4) 鋼管杭及び場所打ち杭基礎において、設計年代と液状化の程度が基礎の損傷度に影響を及ぼすため、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。

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能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) 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) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針，1971.
- 5) 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.
- 6) 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

- 7) 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
- 8) 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.

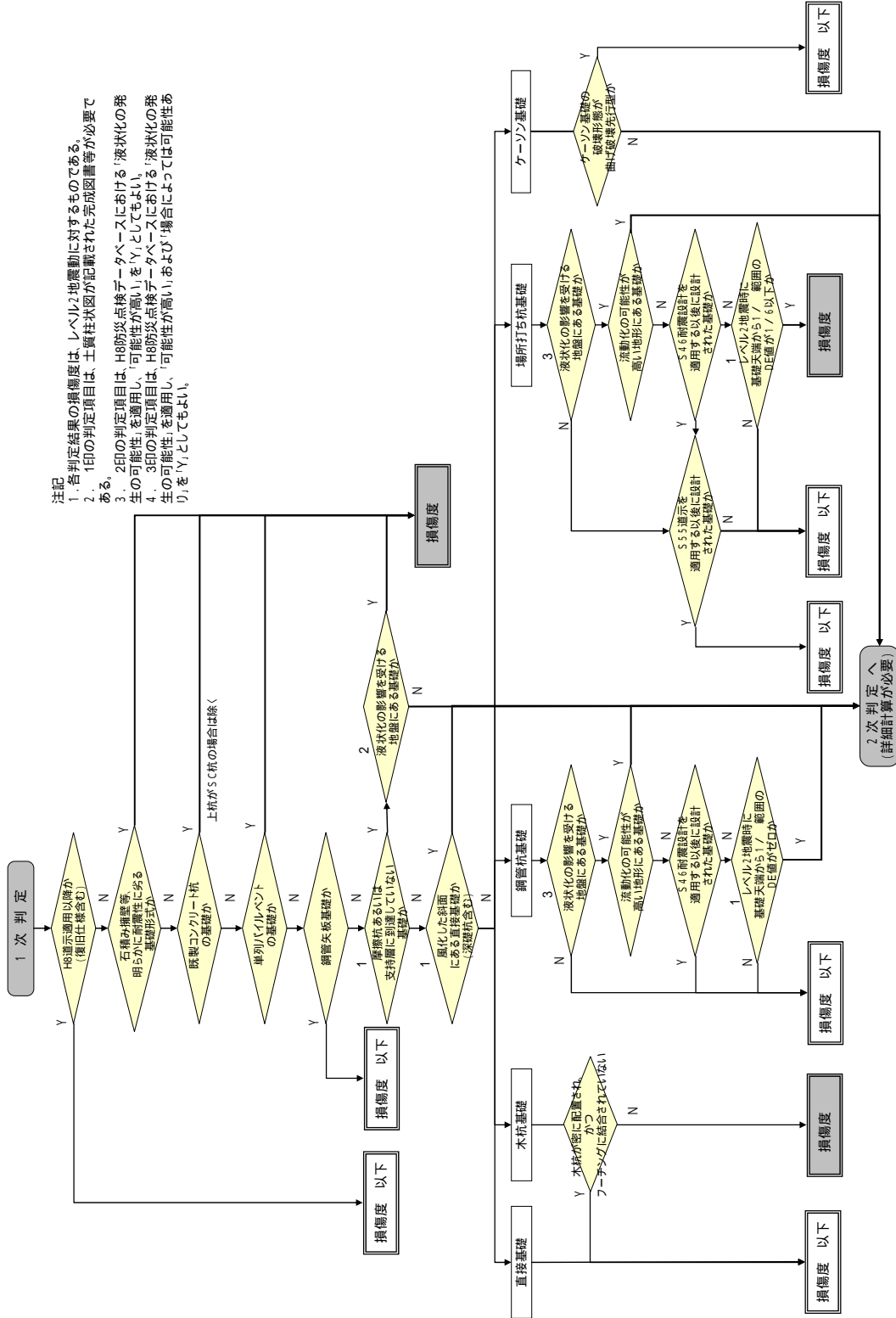


図-7 基礎の耐震性能1次判定フロー(案)

SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF EXISTING HIGHWAY BRIDGE FOUNDATIONS

A flowchart to evaluate the degree of seismic vulnerability of existing highway bridge foundations was proposed in previous fiscal years based on the survey of damage case histories and earlier design norms/construction technique and the trial seismic design of a large number of typical existing foundations. In FY2008, the flowchart has been improved with added trial seismic evaluation results of existing structures. In addition, a new diagram for the evaluating liquefaction potentials without detailed soil tests except for SPT-N logs has been proposed that is easier but less precise than the standard evaluation method of liquefaction.