

鉄道耐震基準に基づく性能照査結果の統計的性質の調査

～ラーメン高架橋を対象とした検討～

中央復建コンサルタンツ (株)

○千本 七虹

青田 周平

今村 年成

(公財) 鉄道総合技術研究所

田中 仁規

坂井 公俊

曾我 大介

(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

井上 翔

西 恭彦

論文要旨

近年の耐震基準で設計された鉄道構造物は、大規模地震においても大きな被害は発生しておらず、耐震基準は一定の有効性を有していると考えられる。その一方で、耐震設計のさらなる合理化、適正化を考える場合には、構造物の設計事例の抽出、整理も重要である。そこで本検討では、多数のラーメン高架橋を対象として、照査結果の統計的性質を整理することで、耐震設計の今後を見据えた基礎情報の整理を行った。

キーワード：鉄道構造物、耐震基準、ラーメン高架橋、性能照査、統計的性質

まえがき

土木構造物の耐震設計は、過去に発生した大規模地震の経験を踏まえて見直し、高度化が進められている。その結果、近年設計・建設された構造物は、大規模地震において深刻な被害に至るケースは限られている等、現在の耐震基準は一定の有効性、信頼性を有していると考えられる。

鉄道構造物の耐震設計¹⁾は、要求性能の設定、設計地震動の設定、構造物の応答値算定、性能照査という流れで実施されることが一般的であり、耐震設計のさらなる高度化を考える場合には、各要素をさらに高度化、適正化していく必要がある。こうした中で、重点的に検討を行う要素を適切に把握するためには、現在の基準で設計された構造物

の実態を把握することも重要である。

そこで本検討では、近年の耐震基準で設計された多数のラーメン高架橋を対象として、照査結果の統計的性質を整理することで、耐震設計の今後を見据えた基礎情報を把握することを目的とする。

1. 対象構造物および抽出する内容

(1) 対象とする構造物

本検討で対象とするのは、近年の鉄道構造物の耐震基準¹⁾に従って設計された新幹線の杭基礎ラーメン高架橋 120 連とした。対象とする杭基礎ラーメン高架橋の形状の例を図-1に示す。また、対象構造物の基本情報を表-1に示す。

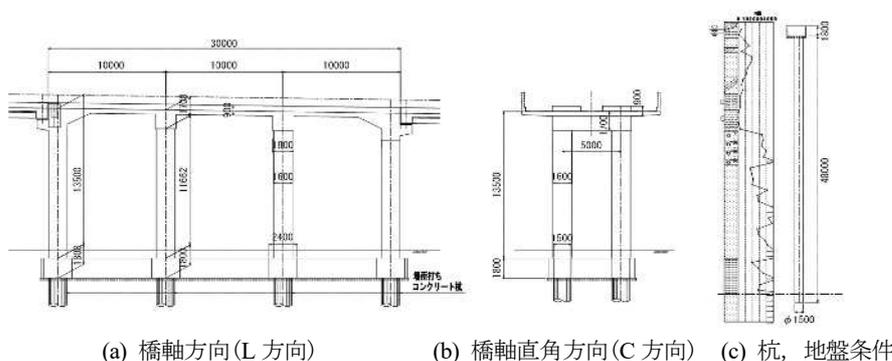


図-1 対象とする杭基礎ラーメン高架橋の形状の例

表-1 対象構造物の基本情報

(a) 柱高

柱高(m)	連数(連)
~10	47
10~15	50
15~20	19
20~	4
合計	120

(b) 杭長

杭長(m)	連数(連)
~20	31
20~30	57
30~40	17
40~	15

(c) 地盤種別

地盤の固有周期(s)	地盤種別	連数(連)
~0.25	G2 地盤	31
0.25~0.5	G3 地盤	28
0.5~0.75	G4 地盤	28
0.75~1.0	G5 地盤	33

(d) 液状化指数 P_L (標準L2地震動スペクトルI)

液状化指数 P_L	連数(連)
$P_L < 5$	4
$5 \leq P_L < 20$	33
$20 \leq P_L$	36
情報なし	47

(e) 液状化指数 P_L (標準L2地震動スペクトルII)

液状化指数 P_L	連数(連)
$P_L < 5$	5
$5 \leq P_L < 20$	35
$20 \leq P_L$	38
情報なし	42

(2) 抽出する項目の整理

各構造物の設計計算書から、図-1 に示した構造物諸元、地盤条件のほか、表-2 に示す各項目の抽出を行った。対象方向は橋軸方向、橋軸直角方向の2方向を個別に取り扱うこととし、同一の要求性能、地震動等について慣性力設計

や液状化設計、応答変位法の複数ケースで検討を行うものについては、このすべてを対象とした。

ここで、鉄道構造物に要求される性能と照査・確認項目の関係を概説する。まず安全性(破壊)では、L2地震動に対して部材の損傷レベルの照査と基礎の安定レベルの照査を行っている。また、安全性(走行安全性)では、少なくともL1地震動に対して $khL1/khy$ や基礎の安定レベル、軌道面の不同変位、振動変位の照査を行っている。

次に復旧性(損傷)では、標準L2地震動スペクトルII(以下、SpclI)に対して部材の損傷レベルと基礎の安定レベルの照査を行っている。新幹線構造物のように重要度の高い構造物に関して、L2地震動とSpclIが一致する条件では、復旧性(損傷)の照査は、安全性(破壊)の照査よりも厳しくなる。このような場合には、安全性(破壊)の照査は省略している。

損傷過程に関しては、柱と杭の降伏順序の確認を、破壊形態に関しては曲げ先行破壊の確認を行う。

表-2 分析の対象とする要求性能、照査・確認項目等の概要

要求性能	性能項目	照査・確認項目	設計地震動
安全性	破壊	損傷レベル	L2地震動
		基礎の安定レベル3	
	走行安全性	$khL1/khy$	少なくともL1地震動
		基礎の安定レベル1	
軌道面の振動変位			
復旧性	損傷	損傷レベル	当面はSpclI
		基礎の安定レベル2	
損傷過程	—	柱と杭の降伏順序	—
破壊形態	—	曲げ先行破壊	—

2.抽出した各項目の分析

前章で整理した各項目を抽出した結果を箱ひげ図を用いて要求性能ごとに整理する。ここで、箱ひげ図とは、最大値、最小値、四分位数、平均値、外れ値の情報を表現したグラフである(図-2)。箱で示される第1四分位数から第3四分位数の間に全体の50%が含まれていることを意味する。

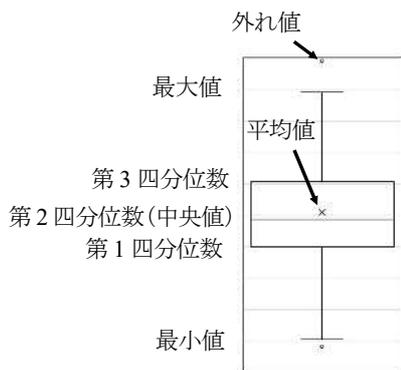


図-2 箱ひげ図

(1) 走行安全性の照査に関する分析結果

走行安全性とは、地震時において車両が脱線に至る可能性をできるだけ低減するための性能である。この時には、L1 地震動に対して①構造物が降伏しないこと($khL1/khy \leq 1.0$)、②構造境界における軌道面の不同変位が列車の走行安全上要求される限界値以内に収まること、③構造物の横方向の振動変位が一定値以内に収まること、を一般的に確認している。ここで、 $khL1$ は L1 地震動における構造物の応答震度を示し、 khy は構造物の降伏震度を示す。

これら各項目の照査値をまとめた結果を図-3 に示す。横軸の L および C は、それぞれ橋軸方向および橋軸直角方向を示す。

$khL1/khy$ の照査値に着目すると、橋軸方向 (L 方向)、橋軸直角方向 (C 方向) とともに中央値が 0.9 程度となっており、他の項目と比較して相対的に大きな値を示している。このことは、柱の降伏震度に対して L1 地震動での応答震度が 0.9 倍程度になるように柱の軸方向鉄筋の配置量を決定していることを意味する。

続いて不同変位と振動変位については、照査値の第3四分位数は 0.8 程度となっている。その一方で数量としては少ないものの照査値が 1.0 に近いケースもあり、相対的に不同変位、振動変位が設計時の決定ケースになるような状況もある。このような場合の対応として、柱間隔を広げたり、斜杭構造を選択するなどの措置を取ることもあるが、ここでは詳細な説明は省略する。

以上より、走行安全性という観点では、相対的に $khL1/khy$ の照査が決定ケースとなっており、柱の軸方向鉄筋の配置量はこれによって決定されるケースが多いことが確認された。

(2) 損傷過程の確認に関する分析結果

構造物の損傷過程として、地震後の復旧を容易にするために、柱を杭より先行降伏させることが望ましい。この結果を確認するために、柱の降伏震度を杭の降伏震度で割った値を照査値として縦軸に取ったグラフを図-4 に示す。

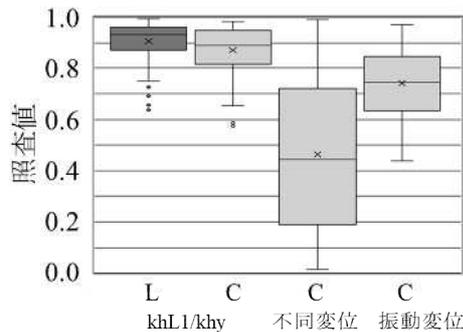


図-3 走行安全性の照査

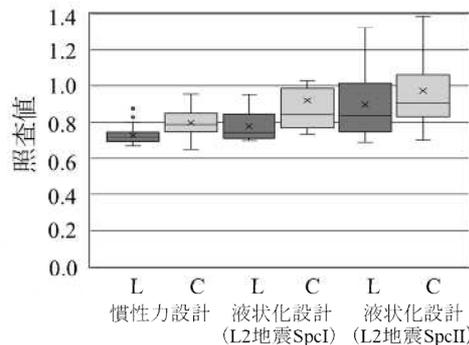


図-4 損傷過程(柱と杭の降伏順序)の確認

これを見ると、地盤の液状化影響を無視した慣性力設計において、橋軸方向 (L 方向)、橋軸直角方向 (C 方向) とともに、照査値が概ね 0.8 程度になっている。このことから、杭の降伏震度が柱の降伏震度よりも多少大きくなるように配慮されており、これにより杭の軸方向鉄筋の配置量が決定されていることが推察される。

なお、どのケースにおいても橋軸直角方向 (C 方向) の方が橋軸方向 (L 方向) より照査値が厳しい傾向にある。これはラーメン高架橋では橋軸直角方向 (C 方向) は 1 径間であることが一般的であり、相対的にロッキングの影響が大きくなるためと考えられる。

以上をまとめると、杭の軸方向鉄筋は、慣性力設計で柱先行降伏とすることにより決定されている。なお、液状化設計においては、杭先行降伏で設計されるケースも散見される。

(3) 破壊形態の確認に関する分析結果

破壊形態の確認とは、構造物全体の脆性的な破壊を防止するために、構造物を構成する各部材に発生するせん断力や曲げモーメントを追跡し、せん断耐力と曲げ耐力を比較することで、曲げ先行破壊となることを確認する行為である。

破壊形態に関する確認結果(Vmu / Vud)を部材毎に整理した図をまとめて図-5 に示す。ここで Vmu は部材が曲げ耐力に達する時の発生せん断力、 Vud は部材の設計せん断耐力

力であり、 V_{mu}/V_{ud} から以下のように破壊形態を判定できる。

- $V_{mu}/V_{ud} \leq 1.0$: 曲げ破壊形態
- $V_{mu}/V_{ud} > 1.0$: せん断破壊形態

まず、図-5(a) 上層梁の確認結果に着目する。慣性力設計と液状化設計を比較すると、慣性力設計の方が厳しく、 V_{mu}/V_{ud} の中央値は0.8以上の値となっているとともに、橋軸方向(L方向)と橋軸直角方向(C方向)で大きな差はない。続いて図-5(c)の柱の結果についても概ね同様の傾向を示しており、慣性力設計が決定ケースとなっている。次に、図-5(b) 地中梁の確認結果に着目すると、液状化設計においても V_{mu}/V_{ud} が0.9程度となるケースが存在し、液状化設計も決定ケースになることがあると言える。また、橋軸直角方向(C方向)では V_{mu}/V_{ud} のばらつきが大きい、これについてはさらなる分析が必要である。

最後に、図-5(d) 杭の確認結果について述べる。上層梁や柱と同様に慣性力設計が決定ケースとなっている。液状化設計が決定ケースとならない理由は、①最も大きなせん断力が発生する部位は杭頭部であること、②柱が降伏するまで杭は降伏しないように設計されていること、③杭頭部に発生するせん断力は柱の曲げ耐力に依存することの3点が考えられる。

以上より、上層梁、柱、杭のせん断補強鉄筋は、慣性力設計における破壊形態の確認で決定されることが多い一方で、地中梁のせん断補強鉄筋は、液状化設計でも決定される場合があると言える。

(4) 復旧性(損傷レベル)の照査に関する分析結果

復旧性(損傷レベル)の照査では、地震後に短期間で機能回復できる状態であることを保証するために、応答部材角や応答曲率が設計限界値以下であることを確認している。この設計限界値は、部材の損傷状況や帯鉄筋・スタラップの配置量、復旧容易性に応じて、表-3のように定義されている。また、地震後の復旧容易性は損傷部位によって異なることを勘案して、損傷レベルの限界値は部材毎に設定する。

この復旧性(損傷レベル)に関する照査結果を図-6に示す。縦軸には応答回転角や応答曲率と設計限界値との比を照査値として示している。

まず、図-6(a) 上層梁の照査結果に着目すると、どのケースにおいても橋軸方向(L方向)より橋軸直角方向(C方向)の方が照査値が厳しい傾向にある。これは、橋軸方向(L方向)はせん断スパンが長く、じん性が期待できるので損傷レベル2まで許容されるのに対し、橋軸直角方向(C方向)は低せん断スパン比の部材でじん性が期待できないので、損傷レベル1に制限されることが多いため

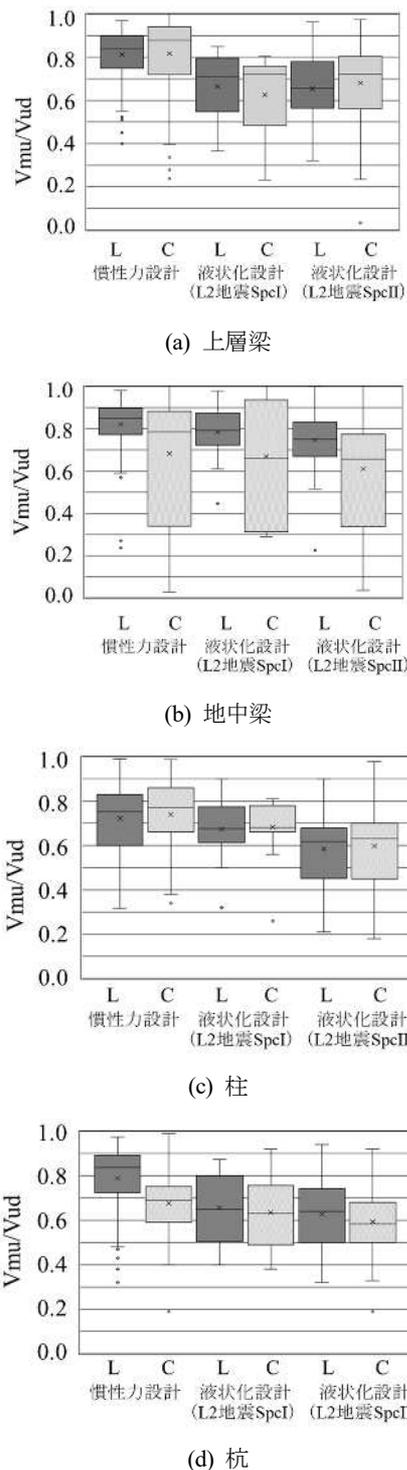


図-5 破壊形態(曲げ先行破壊)の確認

表-3 損傷レベルに対する補修のイメージ

	部材の状態	補修・修復方法の例
損傷レベル1	無損傷	無補修(必要により耐久性上の配慮)
損傷レベル2	場合によっては補修が必要な損傷	必要によりひび割れ注入・断面修復
損傷レベル3	補修が必要な損傷	帯鉄筋等の修正, 鋼板巻立て等による補強

ある。また、検討ケースに着目すると、応答変位法（地盤変位主体慣性力下限）におけるケースを除いて、どの検討ケースも決定ケースになり得る。

図-6(b)地中梁についても同様であるが、慣性力設計よりも応答変位法（慣性力主体地盤変位上限）の方が厳しい傾向にある。

次に、図-6(c)柱の照査結果を見ると、慣性力設計が決定ケースになっている一方で、応答変位法（地盤変位主体慣性力下限）や液状化設計は照査値が顕著に低いことが確認できる。

最後に図-6(d)杭の照査値は、全てのケースで値が低くなっている。これは、構造物が柱先行降伏になるように設計されているためであると考えられる。

以上より、一般的に帯鉄筋やスターラップの配置量を決定する復旧性（損傷レベル）の照査では、柱部材は慣性力設計で決定されることが多く、杭は余裕度が高い場合が多い。また、橋軸直角方向（C方向）の上層梁や地中梁については低せん断スパン比部材となることが多く、損傷レベル1限界に抑えるように軸方向鉄筋配置量が決定される場合が多いことが分かった。

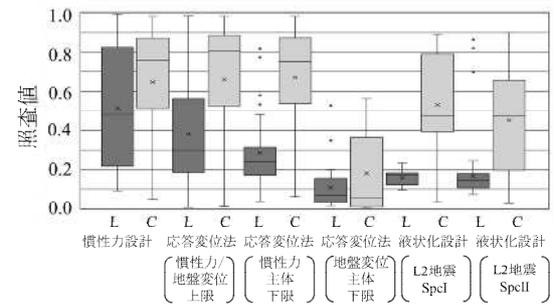
(5) 基礎の安定レベルに関する照査値の分析

表-2に示すように、基礎の安定レベルに関しては、安全性（破壊）ではL2地震動に対して安定レベル3を、安全性（走行安全性）ではL1地震動に対して安定レベル1を限界値として設計することになっている。また、新幹線構造物のように重要度の高い構造物に対しては、復旧性（損傷）においてSpcIIに対して安定レベル2を限界値として設計することになっている。

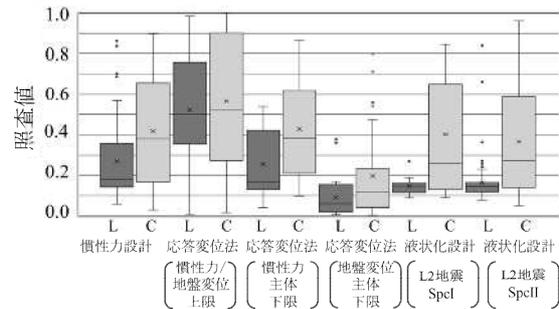
安全性（破壊）で用いられるL2地震動には、SpcIとSpcIIの2つの地震動が含まれる。慣性力設計や応答変位法においては、SpcIとSpcIIとで応答値が一致することが分かっているので、SpcIに対する設計を省略することが一般的である。

また、基礎の安定レベルについては、残留鉛直変位（鉛直）、残留水平変位（水平）、残留傾斜（傾斜）および基礎部材等の損傷の4項目を照査することになっている。このうち基礎部材等の損傷については上記(2)および(4)に示しているため、ここでは残りの3項目についての結果を示す。

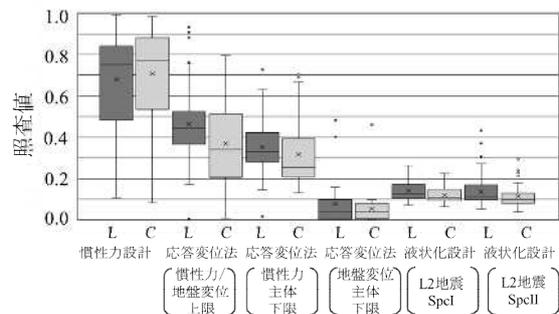
これらをまとめると、L1地震動に対して基礎の安定レベル1を限界値とした設計を行う。その結果を図-7に示す。また、SpcIIに対して安定レベル2を限界値とした設計を行う他、液状化設計ではSpcIに対して安定レベル3を限界値とした設計も追加して行う。その結果を図-8に示す。図-7、図-8ともにグラフの縦軸は、応答値/制限値の値を照査値



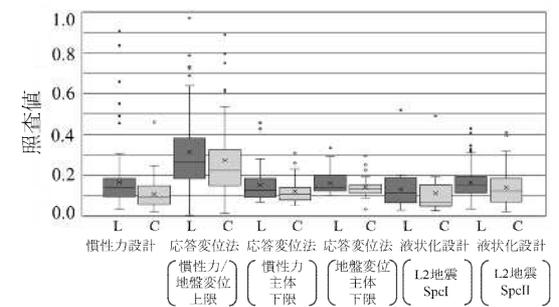
(a) 上層梁



(b) 地中梁



(c) 柱



(d) 杭

図-6 復旧性（損傷レベル）の照査

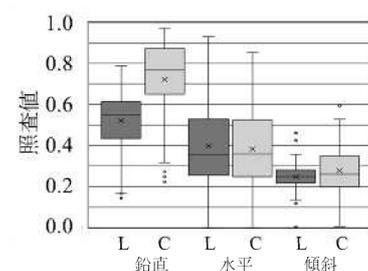


図-7 基礎の安定レベルに関する照査(L1地震動)

として示す。

残留鉛直変位(鉛直)の結果に着目する。図-7及び図-8(a)ともに鉛直の照査では、橋軸方向(L方向)より橋軸直角方向(C方向)の方が照査値が大きい。その理由は、ラーメン高架橋の場合、橋軸直角方向(C方向)は1径間であることが一般的であり、かつ橋軸方向(L方向)に比べて杭間隔が狭いためである。L1地震動とL2地震動の照査値を比較すると、L1地震動の方が相対的に大きな値となっている。

次に、残留水平変位(水平)の結果に着目する。図-7及び図-8(b)ともに橋軸方向(L方向)と橋軸直角方向(C方向)とで照査値に大きな差はなく、比較的余裕がある。

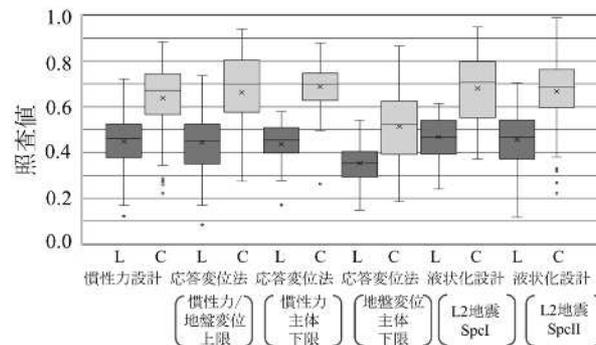
最後に、残留傾斜(傾斜)の結果に着目する。図-7は橋軸方向(L方向)より橋軸直角方向(C方向)の方がやや照査値が大きいが、相対的に余裕がある。図-8(c)は慣性力設計および応答変位法(慣性力主体地盤変位上限、慣性力主体地盤変位下限)で残留傾斜の照査値が大きい場合がある。

以上より、L1地震動における残留鉛直変位(鉛直)が最も厳しい傾向にある他、SpcIIにおける残留傾斜(傾斜)でも厳しいケースがある。その他のケースでは比較的余裕があることが確認された。

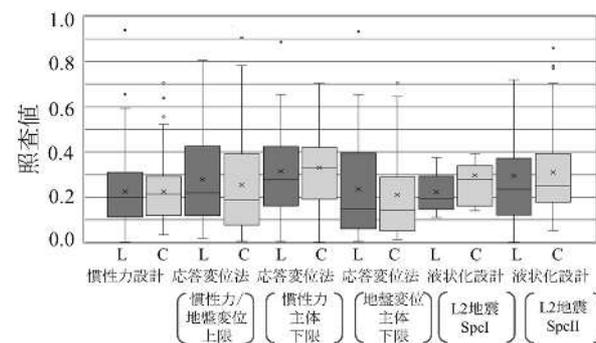
3. まとめ

本検討では、耐震設計の今後を見据えた基礎情報を把握することを目的として、近年の耐震基準で設計された多数のラーメン高架橋の照査結果の統計的性質を整理した。得られた結論は次のとおりである。

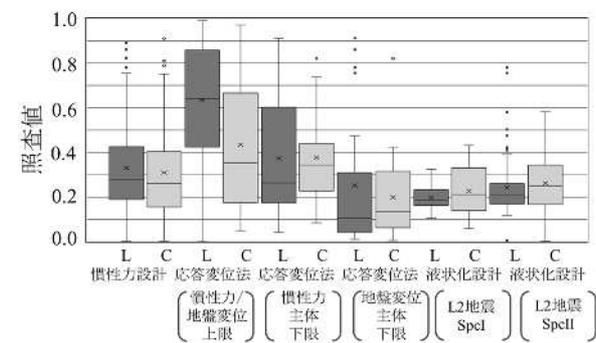
- ・柱の軸方向鉄筋の配置量は、khL1/khyの照査で決定されるケースが多い。
- ・杭の軸方向鉄筋は、非液化化時の降伏順序によって決定されるケースが多い。
- ・上層梁・柱・杭のせん断補強鉄筋は、非液化化時の破壊形態の確認で決定されることが多い。地中梁については、慣性力設計のほか、液化化設計でも決定されることがある。
- ・帯鉄筋やスターラップの配置量は、柱においては慣性力設計で決定されることが多い。杭については、比較的余裕度が高い場合が多い。
- ・橋軸直角方向(C方向)の上層梁や地中梁は、低せん断スパン比部材となることが多く、損傷レベル1限界に抑えるように軸方向鉄筋配置量が決定されることが多い。
- ・基礎の安定レベルは、L1地震動における残留鉛直変位(鉛直)が最も厳しい傾向にある他、SpcIIにおける残留傾斜(傾斜)でも厳しいケースがある。



(a) 残留鉛直変位



(b) 残留水平変位



(c) 残留傾斜

図-8 基礎の安定レベルに関する照査(L2地震動)

あとがき

本検討の結果は、耐震設計の今後を考える際の基礎資料として有用である。今後は、他の構造形式を対象とした検討、構造物断面の合理化や設計ケースの合理化に向けた検討についても引き続き実施していく。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012。