

広域道路ネットワークの地震シミュレーションを用いた 隣接橋梁の影響検討

服部 匡洋¹・谷口 惺²・中村 真貴³・馬越 一也³・
吉田 龍平⁴・鈴木 英之⁵

¹正会員 博士（工学） 一般財団法人阪神高速先進技術研究所 調査研究部
（〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町4-5-7）

²正会員 修士（工学） 一般財団法人阪神高速先進技術研究所 調査研究部
（〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町4-5-7）

³正会員 博士（工学） 株式会社地震工学研究開発センター
（〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通4-6-20星野ビル7F）

⁴正会員 学士（工学） 阪神高速道路株式会社 技術部
（〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島3-2-4中之島フェスティバルタワー・ウエスト）

⁵非会員 修士（工学） 阪神高速道路株式会社 技術部
（〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島3-2-4中之島フェスティバルタワー・ウエスト）

1. はじめに

阪神高速道路では、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により甚大な被害を受けて以降、橋梁の下部構造の耐震補強や上部構造の落橋防止対策等、構造物の被害を最小に留めるよう対策を行うとともに、災害時にも関西圏のライフラインとして機能することを目指した防災・減災対策にも積極的に取り組んでいる¹⁾。その取り組みの1つとして、今後発生が予想される南海トラフ地震や都市直下型地震のような様々な震源域を想定した広域道路ネットワークの地震シミュレーションに関する研究を進めている^{2),3),4)}。これは、図-1、図-2に示すとおり、一般的な橋梁の設計に用いられる数径間程度の橋梁単位の地震応答解析ではなく、阪神高速道路全線を対象とした広域の地震応答解析を行うことで、地震による構造物の損傷程度を路線単位や出入口・JCT間の区間単位で評価するものである。また、様々な震源域を想定した地震応答解析を実施することで、予め路線単位または橋梁単位の損傷状況を把握でき、耐震補強の優先度の高い部材や橋梁、路線を抽出することができるとともに、地震直後に実施する緊急点検においても、地震応答解析により得られた被災度判定分布を踏まえ、重点的に着目すべき路線、橋梁を明らかにできるなど、耐震対策や緊急点検計画の合理

化に役立てられると考えている。さらに、地震応答解析の結果に基づき、地震後にかけ違い部で生じる段差量を推定することで、土嚢や敷鉄板等の資機材配置を最適化するなど、迅速な応急復旧にも繋がると考えられる。

著者らは、これまで1995年兵庫県南部地震の再現による地震応答解析の精度の確認を行い、現段階の解析手法及び解析モデルであっても下部構造や支承部の損傷状況を一定程度の精度で再現できることを確認した³⁾。また、実務への実装に向けた取り組みとして、南海トラフ地震や上町断層地震など今後起こりうるさまざまな震源域を想定した地震応答解析に基づく下部構造被災度判定分布、支承部段差量分布、固有周期分布の作成を行った⁴⁾。

本稿では、地震応答解析のさらなる精度向上に資する取り組みとして、これまで阪神高速全線約9,000基の橋脚を12種類のグループに分類し、代表断面でモデル化していた下部構造について、12種類からグループを増やすことでより実構造物の断面に近い形状でモデル化することにより、少なくとも実構造物の振動特性を精度よく評価できるよう改良した。また、改良した断面を用いて各橋脚の固有周期の算出を行い、隣接橋脚との周期差を確認することで阪神高速全路線モデルを用いて隣接橋梁の影響を評価する方法について検討した。

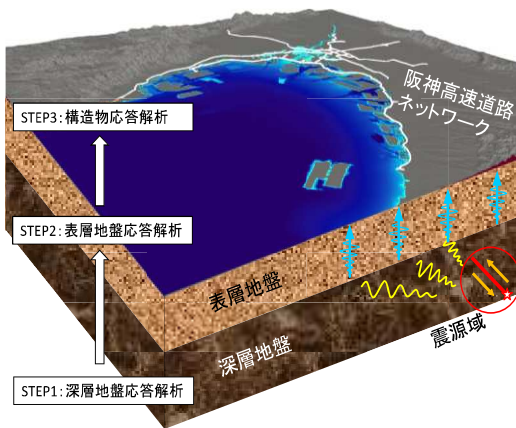


図-1 地震シミュレーションの方法

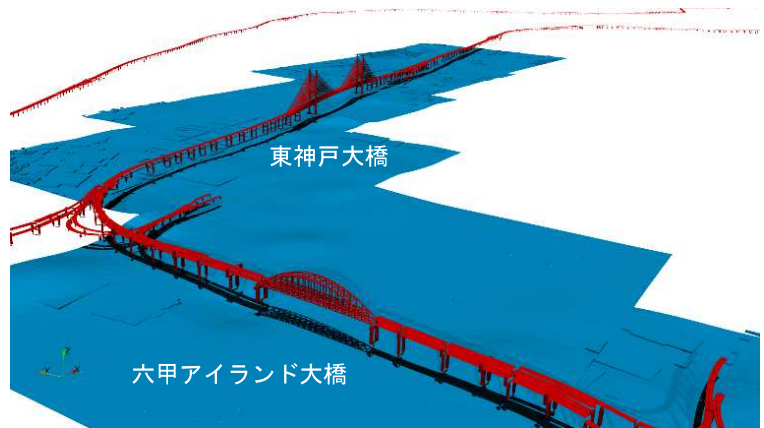


図-2 阪神高速全路線モデル（東神戸大橋付近）

2. 橋脚グルーピングの見直し

(1) 検討背景・目的

これまでの検討では、阪神高速道路の約9,000基の橋脚を12種類の代表断面でモデル化していた³⁾。グルーピング断面を用いると大量の構造物を効率的にモデル化できる一方で、グルーピング断面と実構造物の断面形状が大きく異なると、対象橋梁の耐震性能を過大評価または過小評価する可能性がある。そこで、本章では、阪神高速道路の約9,000基の橋脚の断面形状を整理し、グルーピング断面と実構造物の断面形状の差異が小さくなるよう、新たなグルーピング断面を設定した。グルーピング断面を増やすことで、断面形状が実構造物と近くなり、実構造物の振動特性（固有周期や振動モード）を精度よく評価できると考えられる。

(2) 鋼製橋脚のグルーピングの見直し

これまでの検討では、阪神高速道路の約1,300基の鋼製橋脚を表-1に示す4種類のグルーピング断面でモデル化していた。各グルーピング断面の諸元は阪神高速道路の実構造物を参考に設定したものであり、基部から約3mの範囲にコンクリート充填補強が実施されていると仮定している。図-3(a)に実構造物とグルーピング断面の橋脚形状（橋軸方向・橋軸直角方向の柱幅）を示す。グルーピング断面は断面寸法3m～5mの範囲で設定しており、実構造物の橋脚形状の分布を平均的に捉えていることがわかる。一方で、断面寸法2m未満の構造物が多数存在するものの、この範囲にはグルーピング断面がない。この場合、断面寸法3m未満の構造物をこれらのグルーピング断面でモデル化すると、実構造物よりも固有周期を短く評価し、また耐力が大きい断面でモデル化することになるため、耐震性能を危険側に評価

表-1 橋脚断面グルーピング（改良前）

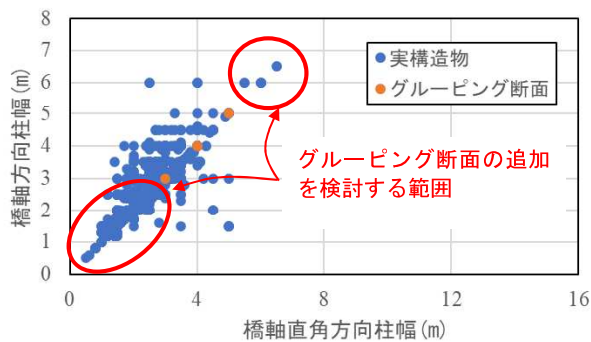
グループ	橋脚材質	断面形状	断面寸法	
			橋軸方向(m)	直角方向(m)
1	鋼	矩形	3.0	3.0
2	鋼	矩形	4.0	4.0
3	鋼	矩形	5.0	5.0
4	鋼	円形	4.0	4.0
5	コンクリート	矩形	2.0	2.0
6	コンクリート	矩形	3.0	3.0
7	コンクリート	矩形	3.7	4.0
8	コンクリート	矩形	4.3	3.5
9	コンクリート	矩形	3.0	6.0
10	コンクリート	円形	3.0	3.0
11	コンクリート	円形	4.0	4.0
12	コンクリート	円形	5.0	5.0

する可能性がある。

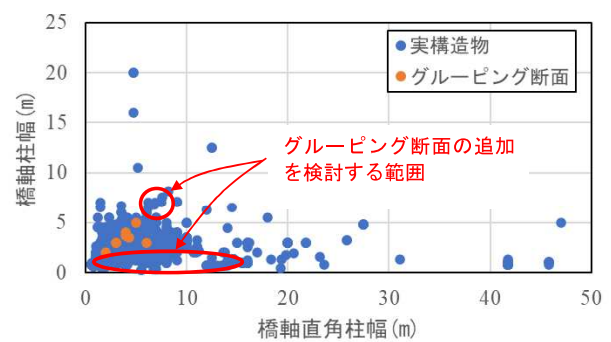
このため、表-2に示すとおりこれまでのグルーピング断面でカバーできていなかった断面寸法3m未満の範囲および断面寸法が5mより大きい範囲に、新たなグルーピング断面の追加を検討した。ここでは、断面寸法が小さい鋼製橋脚をカバーできるよう、新たにグループ101、102を設定した。また、これまで円形断面の鋼製橋脚は直径4mのグルーピング断面のみでモデル化していた。このため、4mよりも小さい断面等の鋼製橋脚をカバーできるようグループ103～106を設定した。

(3) コンクリート橋脚のグルーピングの見直し

これまでの検討では、阪神高速道路の約7,700基のコンクリート橋脚を表-1に示す8種類のグルーピング断面でモデル化していた。各グルーピング断面の諸元は阪神高速の実構造物を参考に設定したもので、鋼板巻立て補強またはRC巻立て補強が実施されていることを考慮している。図-3(b)に実構造物とグルーピング断面の橋脚形状（橋軸方向・橋軸直角方向の柱幅）を示す。これまでは断面寸法が3m～5m程度で、橋軸方向柱幅と橋軸直角方向柱幅がほぼ同寸法のグルーピング断面を設定しており、鋼

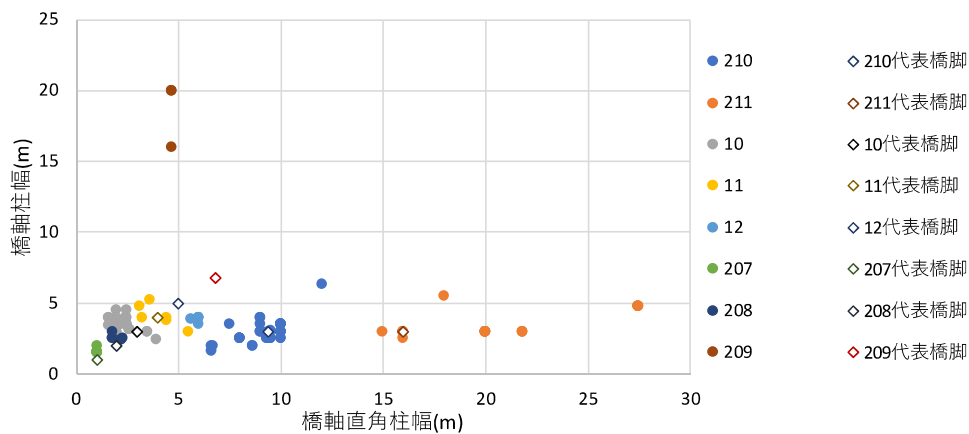


(a) 鋼製橋脚

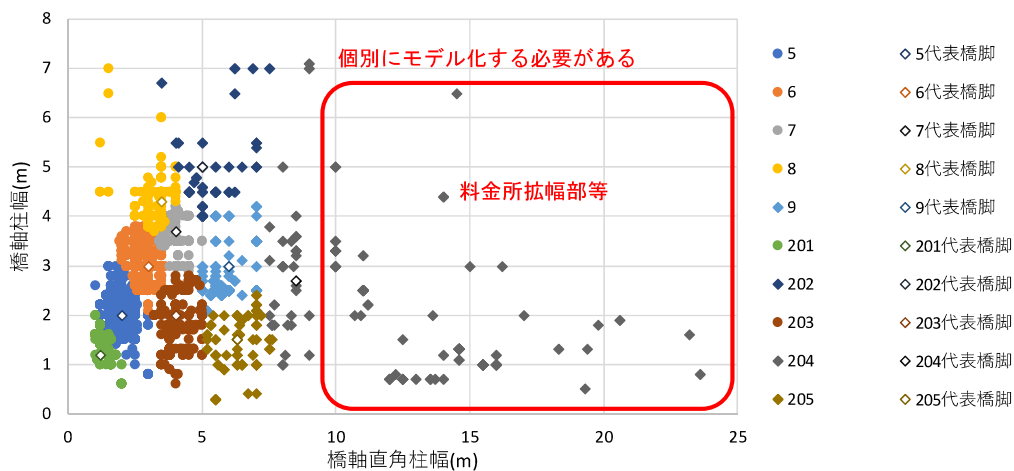


(b) コンクリート橋脚

図-3 実構造物とグルーピング断面の対応 (改良前)



(a) 鋼製橋脚



(b) コンクリート橋脚

図-4 グルーピング断面の割り当て (改良後)

製橋脚同様、実構造物の橋脚形状の分布を平均的に捉えていることがわかる。一方で、壁式橋脚のように橋軸直角方向柱幅が橋軸方向柱幅と比べて大きい橋脚についても、断面寸法が3m～5m程度のグルーピング断面でモデル化していた。これらの条件に該当する橋脚では実構造物より固有周期が長く、また耐力が小さい断面でモデル化している可能性がある。

さらに、断面寸法が10mを超えるような特異な橋脚（長大橋等）については現在のモデル化では実構

造物とグルーピング断面の寸法が大きく異なっており、実構造物の挙動を適切に表現できていない可能性がある。

以上を踏まえ、これまでのグルーピング断面でカバーできていなかった断面寸法が5mより大きい範囲や橋軸直角方向の柱幅が橋軸方向の柱幅と比べて大きい範囲等に、新たなグルーピング断面の追加を検討した。

表-2 橋脚断面グルーピング（改良後）

グループ	橋脚材質	断面形状	断面寸法		備考
			橋軸方向(m)	直角方向(m)	
101	鋼	矩形	1.2	1.2	新規
102	鋼	矩形	2.0	2.0	新規
1	鋼	矩形	3.0	3.0	
2	鋼	矩形	4.0	4.0	
3	鋼	矩形	5.0	5.0	
103	鋼	円形	1.0	1.0	新規
104	鋼	円形	2.0	2.0	新規
105	鋼	円形	3.0	3.0	新規
4	鋼	円形	4.0	4.0	
106	鋼	円形	6.0	6.0	新規
201	コンクリート	矩形	1.2	1.2	新規
205	コンクリート	矩形	1.5	6.3	新規
5	コンクリート	矩形	2.0	2.0	
203	コンクリート	矩形	2.0	4.0	新規
204	コンクリート	矩形	2.7	8.5	新規
6	コンクリート	矩形	3.0	3.0	
9	コンクリート	矩形	3.0	6.0	
7	コンクリート	矩形	3.7	4.0	
8	コンクリート	矩形	4.3	3.5	
202	コンクリート	矩形	5.0	5.0	新規
207	コンクリート	円形	1.0	1.0	新規
208	コンクリート	円形	2.0	2.0	新規
10	コンクリート	円形	3.0	3.0	
11	コンクリート	円形	4.0	4.0	
12	コンクリート	円形	5.0	5.0	
209	コンクリート	円形	6.8	6.8	新規
210	コンクリート	小判・楕円形	3.0	9.4	新規
211	コンクリート	小判・楕円形	3.0	16.0	新規

* 1-12：当初のグループ

101-106：新規に追加したグループ（鋼製橋脚）

201-211：新規に追加したグループ（コンクリート橋脚）

矩形断面のコンクリート橋脚では、これまでカバーできていなかった2mよりも小さな断面を201、4mよりも大きな断面を202とし、橋軸直角方向の柱幅が大きい断面として202～205を設定した。また、円形断面のコンクリート橋脚では、断面寸法が小さいコンクリート橋脚をカバーするためグループ207、208を、断面寸法が大きいコンクリート橋脚をカバーするために、新たにグループ209を設定した。さらに、小判・楕円形断面のコンクリート橋脚については、これまで橋軸直角方向柱幅が橋軸方向と比べて大きい小判型断面等の橋脚を表現したグルーピング断面がなかったため、新たにグルーピング断面210、211を追加した。

以上より、最終的には16グループを増やし、28のグルーピング断面でモデル化するよう改良した。なお、図-4に示すとおり断面寸法が10mを超えるような形状が特異な橋脚（料金所部の橋脚など）は、本検討では形状が最も近いグルーピング断面でモデル化しているが、設備数量が限られていること等も踏まえると、今後の検討において個別にモデル化することが望ましいと考える。

3. 全路線モデルを用いた固有周期の算出

(1) 固有周期の算出方法

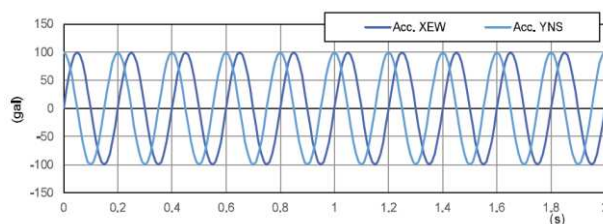


図-5 入力した正弦波（周期 0.2 秒）

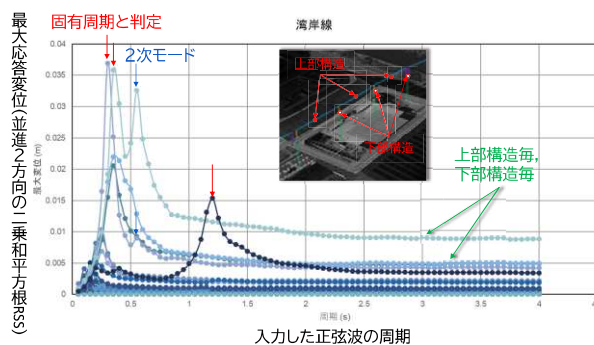


図-6 固有周期の算出方法（一例）

前章の検討により、グループを増やすことで実構造物の断面に近い形状でモデル化したことから、改良前より実構造物の振動特性を精度よく評価できると考えられる。ここでは、改良したグルーピング断面を割り当てた阪神高速全路線モデルを用い、阪神高速全橋脚の固有周期の算出を行った。

一般的な動的解析モデルでは、固有値解析を行うことにより橋梁の固有周期を求める。しかし、全路線モデルで固有値解析を行った場合、無数の振動モードが現れ、各橋梁の固有周期や固有振動モードの特定が困難である。そこで、本検討では図-5に示すように最大加速度を一定にして周期を変化させる正弦波加速度を入力する応答解析を実施することとした⁴⁾。ここで、全路線モデルには橋軸方向、橋軸直角方向の区分がないことから、方向性に依存せずに固有周期を算出できるよう、図-5に示すとおりNS方向とEW方向に半波長ずらした正弦波を全ての橋脚に対し同時入力する、すなわち加速度の軌跡が円を描くような正弦波加速度で阪神高速全路線モデルを一斉に揺らす解析を実施した。

また、図-6に示すように正弦波の周期は0.1秒から4秒まで0.05秒間隔で変化させるものとし、各周期の正弦波を順次入力したときの橋脚天端の応答変位（水平2方向成分の二乗和平方根、RSS）をプロットし、最大になる周期をその構造物の固有周期と判定する。なお、本検討においては、橋脚天端の変位から橋脚基部の変位を除いた純粋な橋脚の変位を用いた。また、検討周期の閾値0.1秒と4秒が最大変位

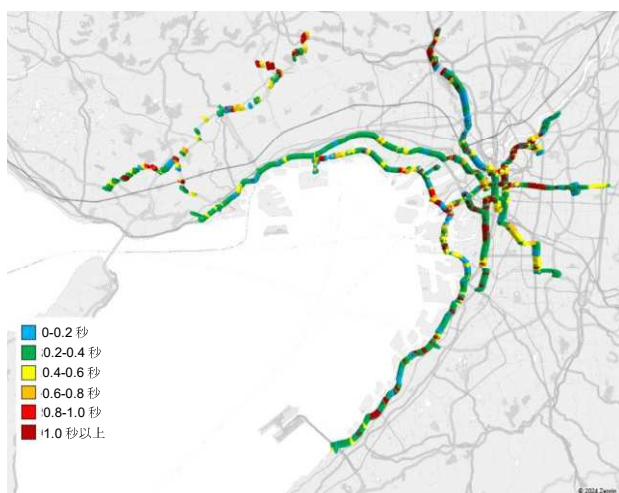


図-7 橋脚の固有周期分布

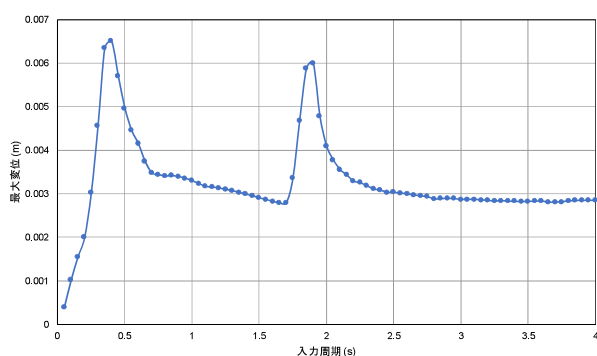


図-8 固有周期の算出 (P-6 橋脚)

の場合は最大変位の判断が困難であるため除外している。

(2) 固有周期分布の作成

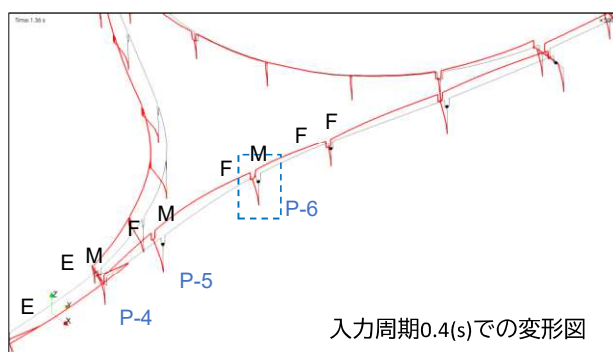
図-7に全路線モデルを用いて得られた下部構造の固有周期分布を示す。本検討により下部構造の多くが固有周期0.4秒以下に分布することがわかる。また長大橋をはじめ、一部区間では1秒以上の固有周期を有している。

4. 隣接橋梁間の相互影響の評価

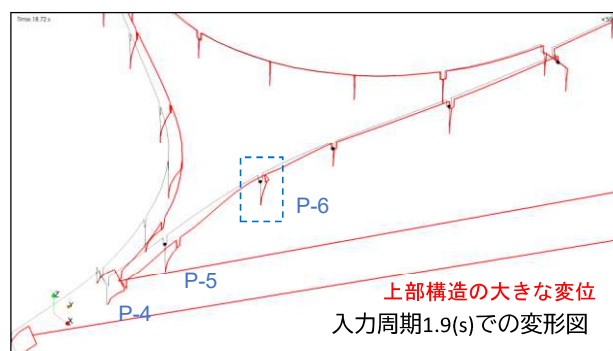
本章の検討では、先の検討により算出した固有周期分布を用いることで、隣接橋梁の影響を評価することが可能か検討を行った。

(1) 隣接橋梁との周期差による被害・耐震設計における隣接橋梁の影響の評価

1995年兵庫県南部地震では、西宮港大橋の東側に隣接する支間長52mの単純桁が落橋する被害が確認



(a) 0.4 秒



(b) 1.9 秒

図-9 固有周期と振動モード (変形倍率 500 倍)

された⁵⁾。本橋周辺は軟弱地盤であり、液状化とそれに伴う地盤流動が生じた影響や想定を超える地震力が生じたことによる固定支承と桁連結装置の破損の影響が考えられている。また、西宮港大橋の固定支承側の海P-100の周期が1.39秒であるのに対し、可動支承側の海P-99の周期は0.98秒であり、周期の違いによる位相差による影響も落橋の要因の1つと考えられている。

その後に実施された港大橋の耐震補強では、港大橋に隣接するアプローチ橋の耐震補強設計にあたり、港大橋本橋部を考慮して全橋（本橋部＋隣接するアプローチ部2橋）で動的解析を実施する場合と、一般橋梁と同様に本橋部を質量としてのみ考慮した場合では、アプローチ橋に生じる断面力やひずみが大きく異なり危険側に評価するため、全橋モデルを用いるのが望ましいとされている⁶⁾。

以上を踏まえると、長大橋とその隣接橋梁で周期差が生じる可能性が高いのは明らかであるが、一般橋梁の区間でも、橋梁同士で周期差が生じる場合には振動の位相差が生じ、地震時に大きな損傷や落橋が生じることが懸念される。このため、固有周期分布から隣接する橋梁の固有周期の差を確認することで、隣接橋梁の影響を把握するとともに、位相差が生じる区間を抽出できる可能性があると考えた。

(2) 隣接橋梁で周期差が生じる箇所の確認

図-8及び図-9に一例としてP-6の固有周期及び固有モードを示す。P-6は別々の路線が合流する複雑なジャンクションの中に位置している。図-8よりP-6では、0.40秒と1.90秒の2つの卓越周期が確認された。0.40秒は一般的な橋脚の固有周期と同程度であり、橋脚が振動するモードと考えられる。P-6の耐震補強設計時に算出された等価固有周期⁷⁾は橋軸方向で0.537秒、橋軸直角方向で0.830秒であった。本解析の固有周期はこれらに比べると短周期であるが、本解析では弾性範囲内で挙動しているため、初期剛性から固有周期が算出されているのに対し、等価固有周期は降伏剛性から算出したものであり、整合が取れていると考える。一方、1.90秒は橋脚の固有周期としては長く、隣接する橋梁の影響を受けていると考えられる。ここで、P-6から2基先のP-4は掛け違い橋脚であり、可動支承と免震支承を有する橋梁である。図-9(b)のように、周期1.90秒では免震橋梁であるP-4が支持する上部構造が大きく変位しており、これがP-4の特に橋軸方向の振動を励起させ、隣接するP-5やP-6の振動特性にまで影響を及ぼしていると考えられる。また、P-4は異なる2つの路線（2車線と3車線）が合流し上部構造重量が大きくなる区間であるため、長周期で振動する構造物となり、より隣接橋梁との位相差が生じていると考えられる。このような箇所では、1橋梁ごとに耐震設計した場合に想定していない損傷が生じる、または位相差による落橋が生じる可能性が考えられる。

以上のように、断面グループを増やし固有周期を精度よく算出することができれば、隣接橋梁との周期差等を確認でき、隣接橋梁の影響を大きく受ける箇所のスクリーニングができる可能性を示した。

5. おわりに

本検討では、地震応答解析のさらなる精度向上に資する取り組みとして、これまで阪神高速全線約9,000基の橋脚を12種類の代表断面でモデル化していた下部構造について、グループを増やすことでより実構造物の断面に近い形状でモデル化することにより、少なくとも実構造物の振動特性を精度よく評価できるよう改良した。また、改良した断面を用いて各橋脚の固有周期の算出を行い、隣接橋脚との周

期差を確認することで、阪神高速全路線モデルを用いて隣接橋梁の影響を評価する方法について検討した。その結果、より実構造物に近い断面形状でモデル化したことにより、実構造物の振動特性を精度よく評価することができ、また得られた固有周期分布を確認することで、長大橋や免震橋梁が隣接する場合等、橋梁同士の周期の違いによる位相差が生じる可能性のある箇所を抽出し、隣接橋梁の影響を大きく受ける箇所をスクリーニングできる可能性を示した。

今後は前述の固有周期分布に加え、南海トラフ地震や上町断層地震等の多数のシナリオを想定した地震動を作成し、それを入力とした地震シミュレーションを実施することで、阪神高速全線における構造的な弱点部の抽出を試みていく。

参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：阪神高速道路株式会社企業情報サイト、阪神高速の取り組み、
<https://www.hanshin-exp.co.jp/company/torikumi/anzen/p04.html>
(2024.4.5.閲覧)
- 2) 松下麗菜，篠原聖二，馬越一也，中村真貴，本橋英樹，服部匡洋：広域道路ネットワークにおける地震応答シミュレーションの実現可能性に関する検討，第37回地震工学研究発表会，2017.
- 3) 服部匡洋，大石秀雄，中村真貴，馬越一也，篠原聖二：広域道路ネットワークを対象とした地震被害シミュレーションの精度検証と被災度評価，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 76, No. 4（地震工学論文集第39巻），I_516- I_528, 2020.
- 4) 服部匡洋，大石秀雄，中村真貴，馬越一也，伊佐政晃，茂呂拓実：広域道路ネットワークの地震被害シミュレーションによる構造物応答及び周期特性の評価，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 77, No.4（地震工学論文集第40巻），I_457-I_466, 2021.
- 5) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて―震災復旧工事誌一，1997.
- 6) 阪神高速道路株式会社：港大橋 巨大地震に対する構造再生 「耐震」から「対震」へ
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1990.