

鋼管集成橋脚における 能登半島地震のモニタリング計測結果を用いた 地震時応答の分析

赤松伸祐¹・服部匡洋¹・谷口祥基²

¹ (一財)阪神高速先進技術研究所調査研究部橋梁・構造研究室

² 技術部技術推進室

要約

淀川左岸線（1期）と3号神戸線の連結路である海老江ジャンクションにおいて適用された鋼管集成橋脚では、設計で想定したコンセプトに従って挙動しているかを確認するためにモニタリング計測が実施されており、2024 年1 月1 日に発生した令和6 年能登半島地震時の応答が計測された。本研究では、得られた計測結果を用いて、供用されている鋼管集成橋脚挙動が設計想定通りの挙動を示しているかを検証した速報を示すとともに、有事の際の計測値の活用方法を提案した。

キーワード: 令和6 年能登半島地震, 鋼管集成橋脚, モニタリング, 性能評価,

1. はじめに

阪神高速道路では、1995 年兵庫県南部地震において橋脚が倒壊または大きな損傷を受け、復旧までに多くの時間を要した教訓から、RC橋脚や鋼製橋脚に比べ同等以上の耐震性を有し、また容易にかつ短時間で復旧できるような橋脚の構造形式の開発を目指し、2002 年から鋼管集成橋脚の開発に取り組んできた（例えば1,2）。

鋼管集成橋脚は図-1 に示すように、鋼管 4 本組を基本単位とし、履歴減衰機能を有するせん断パネルを組み込んだせん断リンクにより、鋼管を互いに接合することで単一の柱とした構造である。本橋脚は死荷重や活荷重などの鉛直荷重を一次部材である鋼管柱で支持し、地震時慣性力などの水平荷重を二次部材であるせん断リンクで抵抗する。道路橋示方書・同解説V編耐震設計編³⁾（以下、「道示V」という）に示されるレベル2 地震動のような大きな地震動が作用した場合には、せん断パネルに損傷を集中させることで、主部材である鋼管柱を健全に保つことが出来るため、地震後速やかに緊急車両を通行させることが可能となる。また、地震後の緊急点検時には、他部材に先行して損傷する部材が定まっているため、点検する部材を限定できる。つまり、せん断パネルの損傷状態を見れば橋脚全体の損傷度を把握することができ、せん断パネルは損傷度センシングの役割を担っているため、供用の可否を速やかに判断することができる。さらに、仮復旧が必要な損傷を受けた場合でも、せん断パネルを取り換えるだ

けで元構造に戻すことが出来ることから、地震時を含めたライフサイクルコストの低減に寄与することができる。

この鋼管集成橋脚は、阪神高速道路の海老江ジャンクション（以下、「海老江JCT」という）や西船場ジャンクションにおいて試験施工が実施され、既に供用が開始されている。一方で、これらの橋脚はこれまでレベル2 地震動を超えるような大きな地震動を受けたことがないなど、実構造に適用された鋼管集成橋脚が前述したコンセプトに従って挙動しているかどうか、検証できていないのが実状である。今後、阪神高速道路の新規路線等において適用される可能性があることから、試験的に適用された本橋脚を対象に、安全性を適切に評価しておくことが求められている。

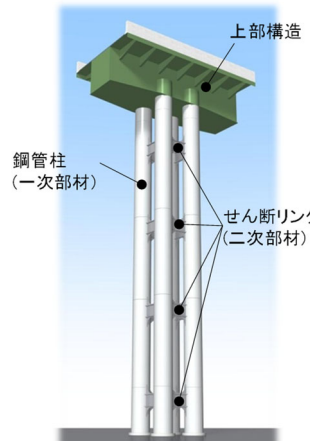


図-1 鋼管集成橋脚

これを受けて、鋼管集成橋脚の構造特性を踏まえたモニタリング計画が策定され⁴⁾、2021年4月より計測が行われている。このモニタリング計画では、計測コストの関係から、全ての性能を計測データから評価するのではなく、解析での評価を組み合わせることで性能を評価することを提案しており、最低限の計測点において計測が実施されている。2024年1月1日には、能登半島を震源とする令和6年能登半島地震が発生し、海老江JCTではこの計測を開始して以降最大となる震度4を観測した。

そこで本研究では、得られた計測結果を用いて、供用されている鋼管集成橋脚挙動が設計想定通りの挙動を示しているかを検証した速報を示すとともに、有事の際の計測値の活用方法を提案した。

2. 対象橋梁とセンサ配置

(1) 橋梁概要

鋼管集成橋脚は、海老江JCTの神戸線から淀川左岸線への渡り線となるDランプ①のPD4橋脚に適用されている。Dランプ①の平面図を図-2⁵⁾(航空写真を加工して作成)に示す。PD4橋脚を含むDランプ①橋はPD1～PD5間の鋼5径間連続鋼床版箱桁橋(92.7+60.5+50.5+49.0+78.9=331.6m)であり、端支点の支持条件はPD1が機能分離、PD5が固定、その間の中間支点は剛結構造である。PD4橋脚は地表面から上部構造までの高さが約30mとDランプの中で最も高く、鋼管集成橋脚の特性を活かせる箇所である。PD4橋脚以外の橋脚は従来型の矩形断面鋼製橋脚である。

PD4橋脚は単柱形式であり4本の鋼管から構成される。基礎形式は現場施工の制約条件からφ7000mmのケーソン基礎が採用されており、このケーソン径から柱の鋼管径やせん断リンクの寸法が決定されている。ケーソン天端から下から2段目のせん断リンクを含む、高さ13mまでは一般的な鋼製橋脚同様、鋼管内に中詰めコンクリートが充填されている。

(2) センサ配置

モニタリング計画⁴⁾に基づいた計測は2021年4月から実施しており、計測機器の設置位置を図-3に示す。

ひずみゲージの計測断面は、橋脚基部を根巻きコンクリート上端から100mm離れた断面とし、橋脚上部を上部工と橋脚剛結部のフレットから最低離れ100mmを確保した断面としている。取付箇所は、各鋼管の基部・上部の断面に対して、橋軸および橋軸直角方向の4箇所、4本の鋼管で計16箇所とし、計測方向は鋼管軸方向(鉛直方向)としている。

加速度計は鋼管Bの橋脚基部(以下、「Pt.1」という)と各せん断リンクの上側(以下、下段より「Pt.2, Pt.3, Pt.4, Pt.5」という)に計5箇所取付け、計測方向は、鋼管集成橋脚に対して橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向の3方向性成分としている。



図-2 Dランプ①橋平面図

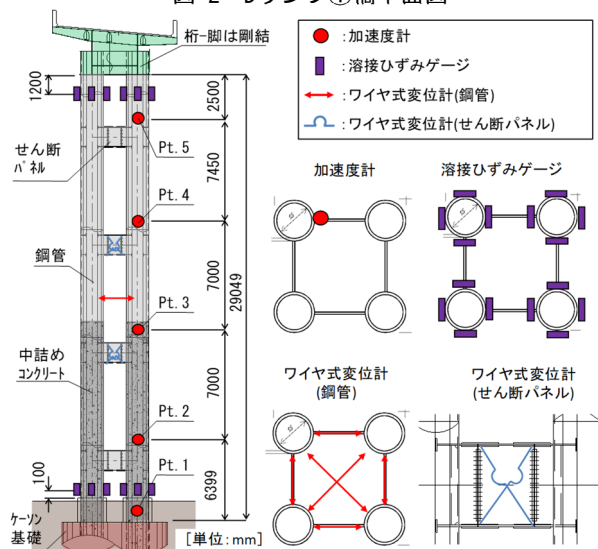


図-3 計測機器の設置位置(PD4橋脚)

ワイヤ式変位計は、下から2段目と3断面のせん断リンクの中央断面と、下から2段目と3断面の全てのせん断パネルに取付けており、前者では鋼管間距離、後者ではせん断パネルの対角距離を計測している。なお、計測時間は地震発生から300秒間、計測間隔は200Hzである。

3. 観測地震動

2024年1月1日16時10分頃、能登半島珠洲市を震源とするマグニチュードM7.6の令和6年能登半島地震が発生し、石川県輪島市門前町走出と同県羽咋郡志賀町香能で最大震度7を記録した。海老江JCTが位置する大阪府福島区付近では震度4を観測し、設置した計測機器で地震時観測データを得た。

図-4に、建設地点から約800m離れた地点(福島[FKS])の地表面の観測記録⁶⁾を示す。また図-5に、5%の減衰を考慮した加速度応答スペクトルと、道示Vに示される加速度応答スペクトルを併せて示す。ここで建設地点近傍の観測記録を用いたのは、2.(2)に示す計測から得られた加速度は全て構造物の応答であり、自然地盤での観測記録ではないためである。PD4橋脚に対する橋軸方向がN-S方向、直角方向E-W方向とおおむね一致する。この加速度応答スペクトルより、今回計測された計測波形は、道

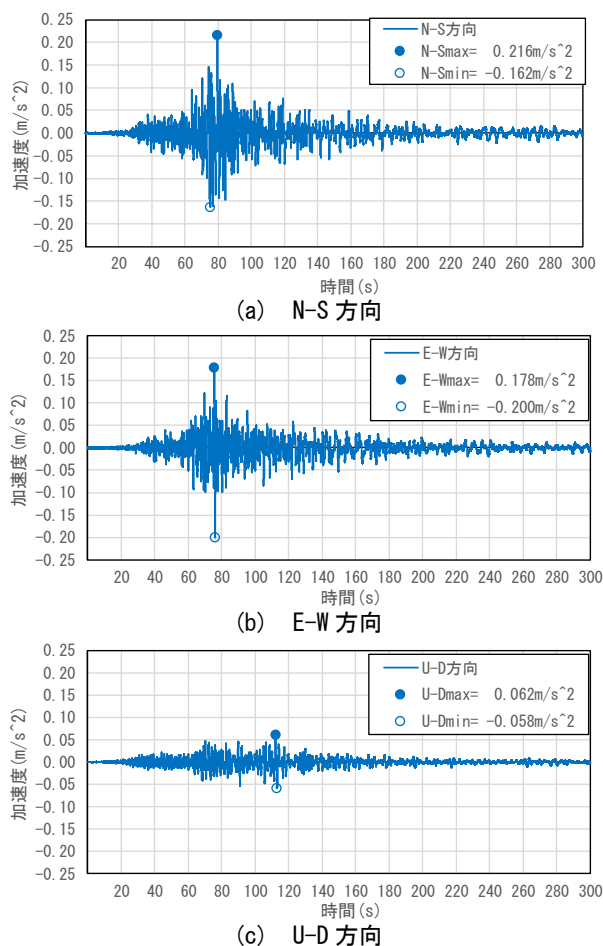


図-4 FKSの観測記録⁶⁾

示Vに示されるレベル1地震動より全ての周期帯で小さいことが分かる。

4. 計測結果を用いた性能評価

計測結果を用いた鋼管集成橋脚の性能評価フローを図-6に示す。計測値から直接性能を評価できる場合は、計測データを整理・分析することにより性能を評価をする。一方で、計測値から直接性能を評価できない場合は、解析によって構造物の挙動を再現し、間接的に性能を評価する。解析を用いる場合は、まず計測時の作用を与えた解析モデルで、計測位置の応答を比較することによりモデルの再現性を確認する。ここで、計測値と解析値が乖離した場合は、その要因を分析した上で解析モデルを見直し、再現性が検証された解析モデルによって、鋼管集成橋脚の性能を評価することとなる。ここでは、計測結果から構造物の挙動を分析するとともに、これらの2つの方法によって評価した速報を示す。

(1) 計測データからの性能評価

a) 加速度の分析

代表的な計測値としてPt.1, Pt.3, Pt.5で計測された橋軸と直角方向の加速度応答時刻歴波形を図-7に示す。Pt.1, Pt.3, Pt.5のそれぞれの最大加速度の絶対値は、橋軸が 0.213 m/s^2 , 0.518 m/s^2 , 0.819 m/s^2 、

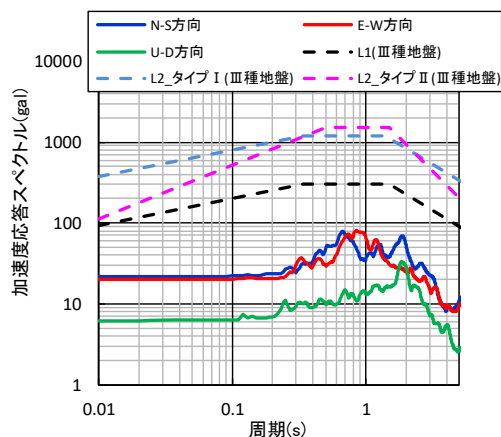


図-5 観測波形の加速度応答スペクトル図 (FKS)

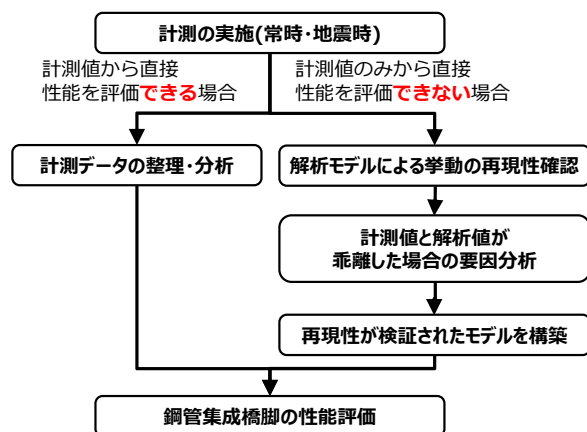


図-6 計測値の評価フロー

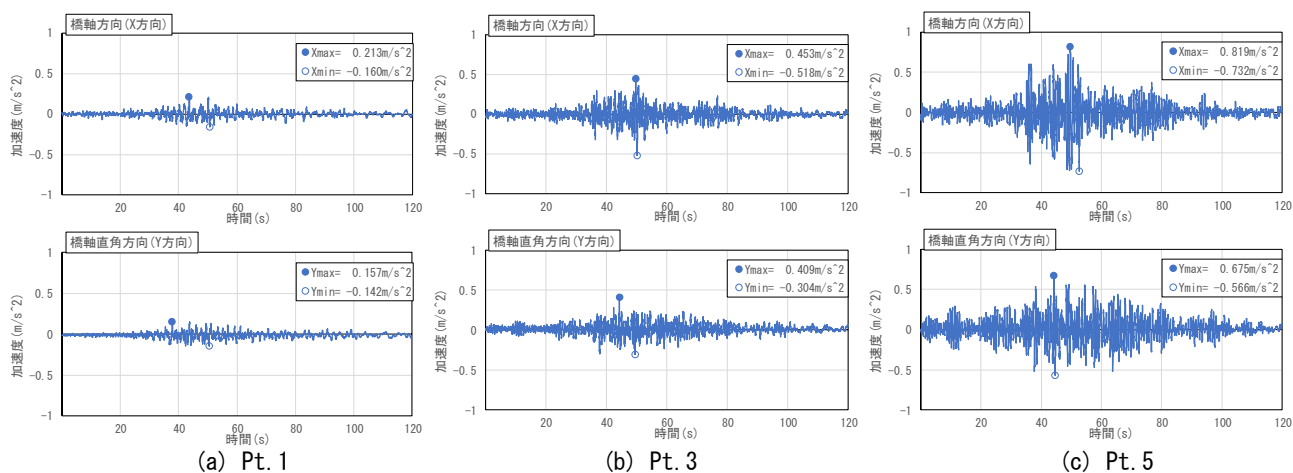
直角が 0.157 m/s^2 , 0.409 m/s^2 , 0.675 m/s^2 となり、橋脚の上部ほど加速度が増幅する傾向を捉えている。

また、図-8に示すPt.5とPt.1のフーリエスペクトル比から推測されるPD4橋脚の固有振動数は、橋軸方向と直角方向でそれぞれ 1.67 Hz , 1.41 Hz である。一方で、耐震設計で用いた非線形動的解析モデルの固有振動数は、PD4橋脚の橋軸方向と直角方向に着目するとそれぞれ 1.05 Hz と 0.94 Hz であり、どちらも計測値の方が振動数が高い傾向である。これは、耐震設計では大規模地震時の地盤の軟化を考慮した基礎ばねを用いていることに対し、今回のレベル1地震動より小さな地震では基礎が応答しなかったことが要因の一つと想定される。

b) ひずみの分析

今回計測された中小規模な地震に対して、鋼管集成橋脚は“4本の鋼管が一体で挙動する”ことを想定している。これに対して、“各鋼管の挙動にバラつきが発生する”ことが疑義として挙げられる。そこで鋼管基部と上部のひずみから鋼管の挙動を分析した。

計測データのうち、Pt.5の加速度が最も大きい時間 ($t=49.6 \text{ s}$) の鋼管ひずみを図-9に示す。鋼管基部のひずみは、鋼管A, B基部の橋軸方向外側 (A-b-1, B-b-1) でそれぞれ $+140 \mu$, $+154 \mu$ 、鋼管C, D基部の橋軸方向外側 (C-b-3, D-b-3) でそれぞれ -237μ , -115μ と、橋軸方向外側で最大の圧縮および引張のひずみが発生している。



鋼管上部も同様の傾向であるが、各鋼管の内側（A-t-3, B-t-3, C-t-1, D-t-1）で逆方向のひずみが発生している。この逆方向のひずみが発生している箇所は、全て各鋼管の橋脚内側のフィレット下側であり、フィレットにより鋼管上部の変形が拘束された影響を捉えていると考えられる。

このように、ひずみ値は4本の鋼管の中央に近づくほど小さい値となっていることから、設計における想定通り4本の鋼管が1本の柱のように挙動していると言える。またひずみ値から橋軸方向に橋脚が挙動していたと考えられる。

(2) 解析を用いた性能評価

鋼管集成橋脚はこのような中小規模の地震に対して、設計上は全ての部材が弾性的に挙動することを想定している。ただし、この挙動は計測箇所数に限りがある計測データと外観目視から評価することが困難なことから、時刻歴応答解析による検証が必要である。一方、中小規模の地震においては、一般的に耐震設計で用いられる非線形動的解析モデルでは、挙動が一致しないことが報告されている（例えば7）。そこで、小規模な地震ではあるが、地震時の加速度が計測できたため、まずはこの観測データを用いて、一般的な非線形動的解析モデルによる挙動の再現性の確認を行った。

a) 対象橋梁のモデル化

解析条件は詳細設計時の考え方を踏襲し、解析モデルは詳細設計時の橋梁全体系の3次元骨組みモデルを用いた。ただし各部材の降伏強度は、実橋の挙動分析を目的としているため実強度を用いた。PD4橋脚は、材料検査試験の値から降伏強度を設定し、PD4橋脚を除く橋脚部材の降伏強度は、統計データの調査結果⁸⁾を参考に、統計データの平均値を用いた。

b) 令和 6年能登半島地震の再現性

建設地点から約800 m 離れた地点（福島[FKS]）の地表面の観測記録を入力地震動とした地震応答解析を実施し、対象橋梁の Pt.2～Pt.5 で計測された加速度の再現を試みた。地震動の加振方向は、計測方向と同様にN-S方向、E-W方向、U-D方向の3方向同

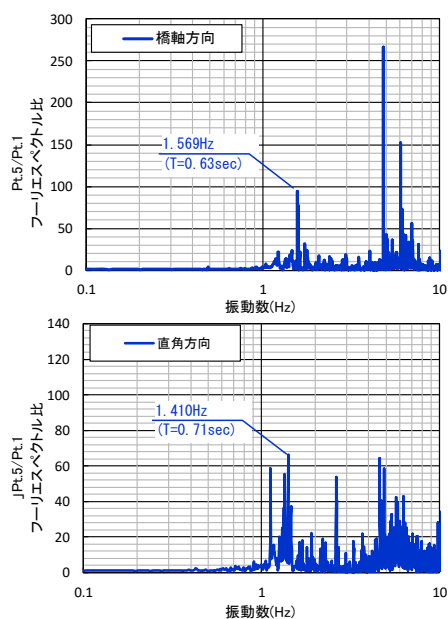


図-8 フーリエスペクトル比 (Pt. 5/Pt. 1)

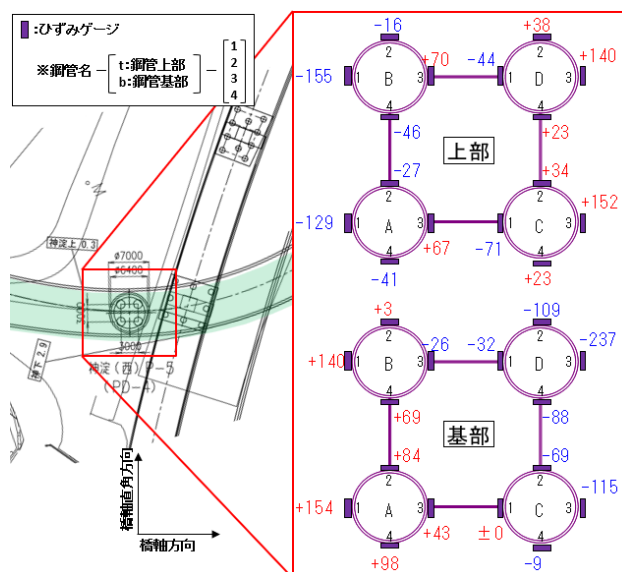
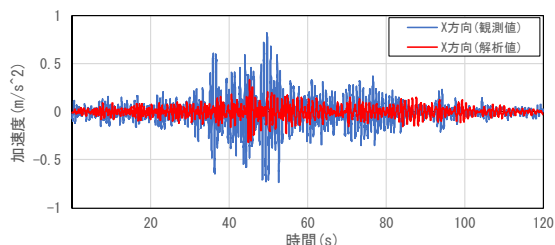


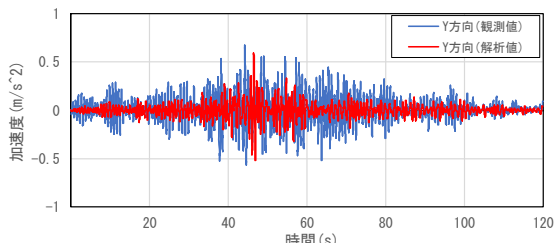
図-9 49.6 sの鋼管ひずみ(ひずみ値 $\times 10^{-6}$)

時加振とした.

図-10に橋脚最上部に位置するPt.5 の橋軸および直角方向の加速度応答時刻歴波形をの観測波形と解

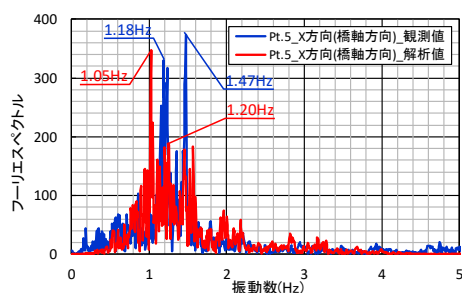


(a) 橋軸方向

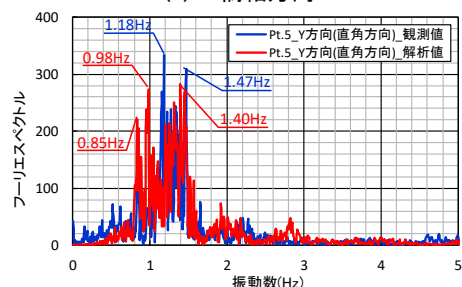


(b) 橋軸直角方向

図-10 Pt. 5の観測と解析の加速度応答時刻歴波形の比較 (基礎バネ考慮)



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-11 Pt. 5の観測と解析のフーリエスペクトルの比較 (基礎バネ考慮)

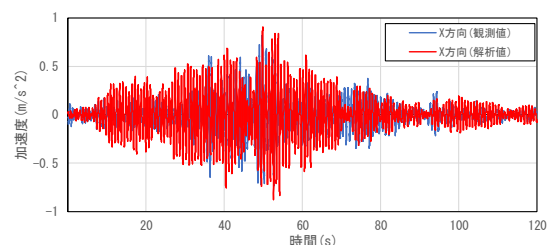
析結果の比較を示す。加速度はいずれの計測位置においても解析結果より観測波形の方が大きい傾向が見られた。また、図-11に示すPt.5のフーリエスペクトルによると、橋軸方向の観測波形の卓越振動数は1.18 Hzであり、解析結果の卓越振動数は1.05 Hzである。直角方向も同様に、観測波形より解析結果の方が低振動数側（長周期側）にシフトしていると言える。

これらの比較からも、4. (1) (a)の計測加速度の分析で述べた、耐震設計で用いている地盤の軟化を考慮した基礎ばねが、今回のレベル1地震動より小さな地震では応答しなかったことを確認できる。

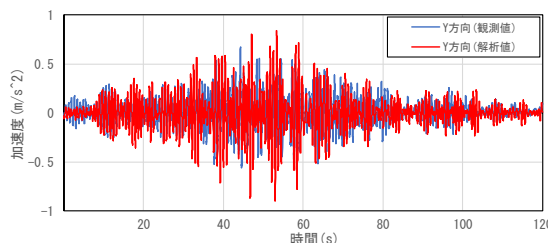
c) 解析モデルの更新

前項に示す再現解析の結果を受けて、基礎ばねの影響を確認するため、全ての橋脚の基礎ばねを固定した場合の解析を行った。

図-12に基礎ばねを固定とした場合のPt.5の橋軸

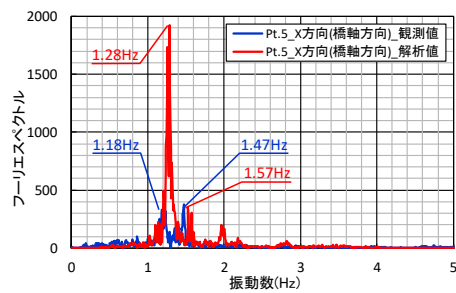


(a) 橋軸方向

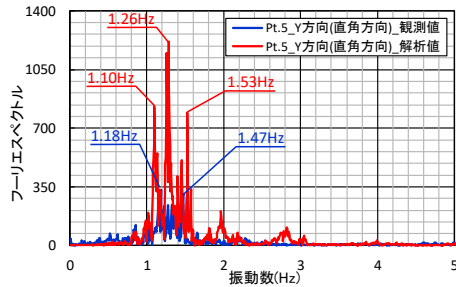


(b) 橋軸直角方向

図-12 Pt. 5の観測と解析の加速度応答時刻歴波形の比較 (基礎バネ固定)



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-13 Pt. 5の観測と解析のフーリエスペクトルの比較 (基礎バネ固定)

および直角方向の加速度応答時刻歴波形の観測波形と解析結果の比較を、図-13にフーリエスペクトルの比較を示す。Pt.5の加速度応答は、橋軸および直角ともに基礎ばねを考慮した場合（図-10）より大きくなり、観測値に対しても大きくなる傾向が見られた。卓越振動数は、基礎ばねを考慮した場合（図-11）より短周期側にシフト（橋軸方向では、1.05 Hz→1.28 Hz）しており、観測値と比較しても短周期側であることが確認できる。この傾向は直角方向も同様である。

これらから、今回対象とした地震動に対して鋼管集成橋脚の挙動を解析で再現する際には、設定する基礎ばねが影響すること、そして、基礎は応答するものの、耐震設計で用いる基礎ばねよりも高い剛性で挙動したと考えられる。また、加速度振幅が一致しないのは、各部材に設定している減衰の影響と考えられ、引き続き詳細の分析が必要である。

5. 阪神高速BCPへの活用提案

4. は対象構造物の性能検証に着目しているが、これらの計測は、阪神高速道路株式会社事業継続計画（以下、「阪神高速BCP」という）にも活用できる。図-14に有事の際の活用イメージを示す。

Step1 は事前準備であり、ここでは、三次元骨組み解析モデルを用いたプッシュオーバー解析により、各損傷イベント及び耐震性能I～III⁹⁾に対応する各計測位置の応答を抽出する。

Step2 は道路啓開の判断を目的とした状態の把握である。橋脚天端の加速度から変位を算出し、その変位をStep1 で得られた荷重－変位関係に落とし込むことで状態を把握する。併せて、各計測位置の最大応答とStep1 で抽出した各イベント発生時の応答を比較することで、状態を把握することができる。この評価は本検討に精通する担当者が行うと1日程度を要するが、そうでない場合はさらに時間を要すると想定される。これに対し、この処理を自動化する仕組みを構築することで、3時間程度で安定的に状態把握が可能になると考えられる。

Step3 は、本復旧計画の策定のためにStep2 で把握できない計測位置以外の挙動を把握することを目的としている。ここでは、計測した橋脚基部の地震波形を解析モデルに入力し、構造物の全体挙動を把握する。この処理も自動化することで、阪神高速BCPに定められている「災害後3 日以内の本復旧計画の策定」の支援が可能となる。

このように、各ステップでの実施内容を自動化することで、より確実な阪神高速BCPの達成を支援することが可能となる。なお、このような計測値の活用は、本検討で対象としている鋼管集成橋脚以外の構造にも適用できる。

6. まとめ

本研究では、令和 6年能登半島地震で計測されたデータを用いて鋼管集成橋脚の性能評価を実施した速報を示すとともに、阪神高速BCPへの活用方法を提案した。得られた知見は以下の通りである。

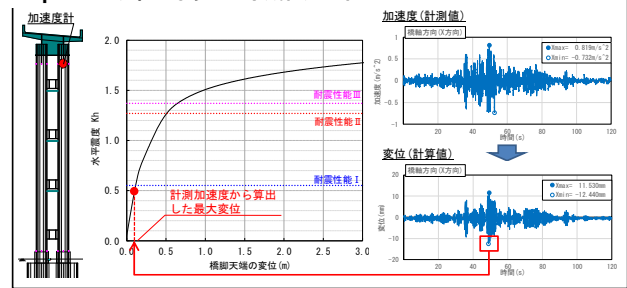
- ・最大加速度が発生した時刻の鋼管基部のひずみを分析し、設計想定通りに4本の鋼管が一体で挙動していることを確認した。
- ・中小規模地震を対象とした解析では、基礎ばねが振動特性や加速度応答に及ぼす影響が大きい。
- ・有事の際の道路啓開の判断や本復旧計画作成の支援に計測値を活用することができる。その際の処理を自動化することで、迅速化が可能である。

今回の性能評価は速報に留まったが、解析での再現性の検討を含めて、今後より詳細に挙動を分析する予定である。また、阪神高速BCPの確実な達成を支援するために、計測値の処理を自動化する仕組みを構築し、有事に備える必要があると考えられる。

Step1：（事前準備）プッシュオーバー解析より荷重－変位関係を把握

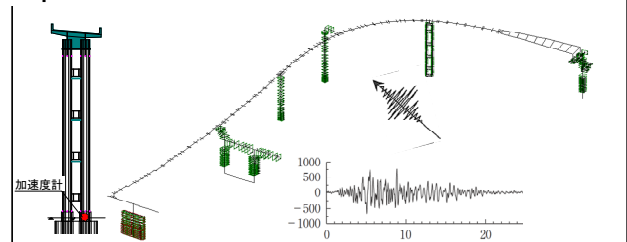
- ・実強度を反映した三次元骨組み解析モデルにてプッシュオーバー解析を実施
- ・各損傷イベントおよび耐震性能に対応する計測位置の応答を把握

Step2：計測結果より鋼管集成橋脚の状態を把握



【道路啓開の判断(約3時間)】

Step3：動的解析より計測位置以外を含めた挙動の把握



【本復旧計画の作成(3日以内)】

図-14 阪神高速BCPへの計測値の活用イメージ

謝辞：鋼管集成橋脚のモニタリング計測にあたり、阪神高速技術(株)と内外構造(株)にご協力頂いた。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 篠原聖二、金治英貞、小坂崇、杉山裕樹、津丸徳宏、鳥越卓志:鋼管集成橋脚の技術コンセプトと構造設計、橋梁と基礎、2014年2月号、2014。
- 2) 篠原聖二、杉山裕樹、金治英貞、橋本国太郎、杉浦邦征：鋼管集成橋脚における実大せん断パネルの損傷過程と終局モードの実験的評価、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.71, No.3, 2015。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2017。
- 4) 赤松伸祐、服部匡洋、青木康素、谷口祥基：鋼管集成橋脚の性能検証を目的としたモニタリング計画の策定および挙動分析、鋼構造年次論文報告集、日本鋼構造協会、第30巻、2022。
- 5) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス、<https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>(2023年3月20日閲覧)
- 6) 関西地盤観測研究協議会：2024年1月1日16時10分に発生した令和6年能登半島地震の観測波形、2024.1。
- 7) 佐々木達生、徳橋亮治、服部匡洋、馬越一也、篠原聖二：10径間連続PC箱桁橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.75, No.4（地震工学論文集第38巻）、I_602-612, 2019。
- 8) 独立行政法人 土木研究所：鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査、土木研究所資料、第4090号、2008。
- 9) 阪神高速道路：鋼管集成橋脚の設計製作架設手引き、2020。