



鋼管集成橋脚のモニタリング計測結果を用いた性能評価法の提案

赤松伸祐¹⁾, 服部匡洋²⁾, 谷口祥基³⁾, 西村美紀⁴⁾,
青木康素⁵⁾, 宮田秀太⁶⁾, 杉浦邦征⁷⁾

- 1) 阪神高速先進技術研究所, 主任研究員
E-mail: shinsuke-akamatsu@hit.or.jp
- 2) 阪神高速先進技術研究所, 主任研究員 博士(工学)
E-mail: masahiro-hattori@hit.or.jp
- 3) 阪神高速道路株式会社, 課長代理
E-mail: yoshiki-taniguchi@hanshin-exp.co.jp
- 4) 阪神高速道路株式会社
E-mail: miki-nishimura@hanshin-exp.co.jp
- 5) 阪神高速道路株式会社, 課長代理 博士(工学)
E-mail: yasumoto-aoki@hanshin-exp.co.jp
- 6) 大日本ダイヤコンサルタント株式会社
E-mail: miyata_shuta@dcne.co.jp
- 7) 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻, Ph.D.
E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

要 約

実橋梁として建設された鋼管集成橋脚に対して, 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, 常時や小規模地震動に対する応答が計測されている. 本研究では, 実橋に適用された鋼管集成橋脚の性能検証方法を提案するとともに, これまでに得られた計測値を用いた性能評価を行った. 常時に対しては, 計測値を用いて設計時に想定した挙動であるかを確認し, 小規模地震動に対しては, 観測波形を用いた再現解析により解析モデルの妥当性を検証した.

キーワード: 鋼管集成橋脚, モニタリング, 性能評価, 再現解析, 非線形動的解析

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構造形式の橋脚の開発を目指し, 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)-5).

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機構を有する。道路橋示方書・同解説Ⅴ編耐震設計編⁶⁾（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。

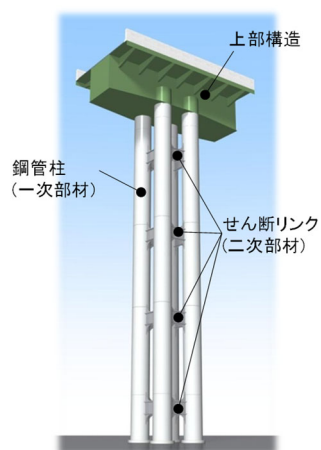


図1 鋼管集成橋脚

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地震動相当以上の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するかどうか、実際に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でこの構造が適用される可能性があることから、これらの試験的に適用された橋脚において、構造の安全性や地震後の復旧性を適切に評価することが求められている。

これを受けて、著者らは鋼管集成橋脚の構造特性を踏まえたモニタリング計画を策定⁷⁾し、2021年4月より実橋にて計測を開始している。このモニタリング計測では、計測の詳細度とコストの関係から、全ての性能を計測データから直接評価するのではなく、解析を組み合わせることで性能を検証することを目的としており、最低限の計測点での計測が実施されている。しかし、これらの計測結果を用いた具体的な性能評価法は示されていない。

そこで本研究では、実橋に適用された鋼管集成橋脚の性能評価法を提案するとともに、これまでに計測されたデータを用いて評価可能な性能の検証を行った。ここでは、性能評価法とそれに基づいた性能評価の一例を示す。

2. 対象橋梁と計測項目

2.1 対象橋梁

計測の対象とする鋼管集成橋脚は、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2⁸⁾（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（ $92.7+60.5+50.5+49.0+78.9=331.6$ m）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30 m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橋脚の一般図を図3に示す。単柱形式となるPD4橋脚は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φ7000 mm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高を上回る、高さ13 m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。



図2 Dランプ[1]橋平面図

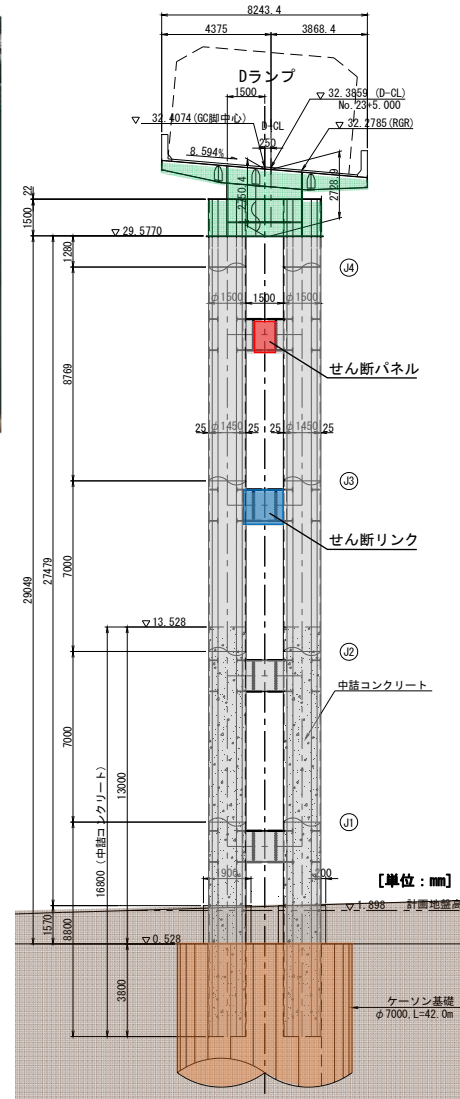


図3 PD4橋脚構造一般図

2.2 計測項目

モニタリング計画⁷⁾に基づいた計測は2021年4月から実施しており、代表的な計測機器の設置位置および測点名を図4に、設置状況を図5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100 mm離れた断面とし、橋脚上部を上部工と橋脚剛結部のフィレットから最低離れ100 mm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。なお、計測に用いたひずみゲージは長期間の計測に対応するために溶接型防水ゲージ（KWC-5-350-G14S-11）を使用した。

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方向成分としている。加速度計はCAN 式加速度計 (M-A550AC2x) を用いており、分解能は0.06 $\mu\text{G}/\text{LSB}$ である。

また、表1に想定される各種状況に対する計測頻度、計測期間および計測間隔を示す。常時の計測のうち活荷重は、平均的な交通量と考えられる春季に72時間、車両荷重による構造物の挙動を捉えるために200 Hzの計測間隔とした。風荷重は台風上陸時に24時間、200 Hz、温度荷重は気温に大きく左右されるため、春季・夏季・秋季・冬季の4回を1週間程度、10分毎に計測を行う計画である。また、地震時については、鋼管基部に設置する加速度計によりトリガ判定を行い、一定の加速度が生じた場合に計測が開始される設定となっている。なお、本計測では小さな地震動でもデータが取得できるように閾値を2 galと設定している。地震時の計測は地震動の大きさに係わらず、計測時間を300秒、計測間隔を200 Hzとした。

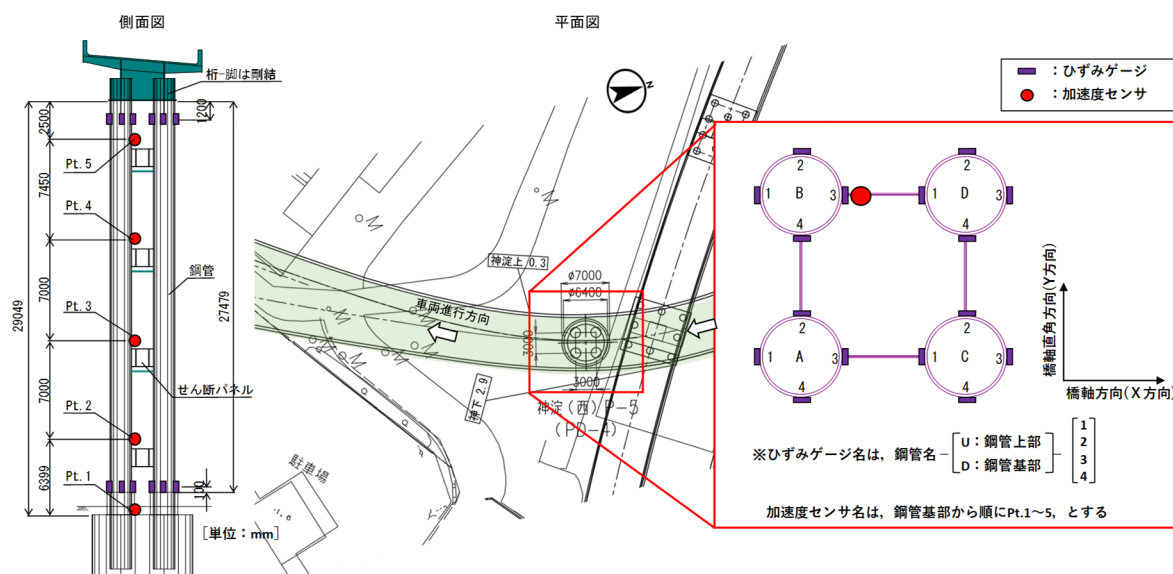


図4 計測機器の設置位置および測点名

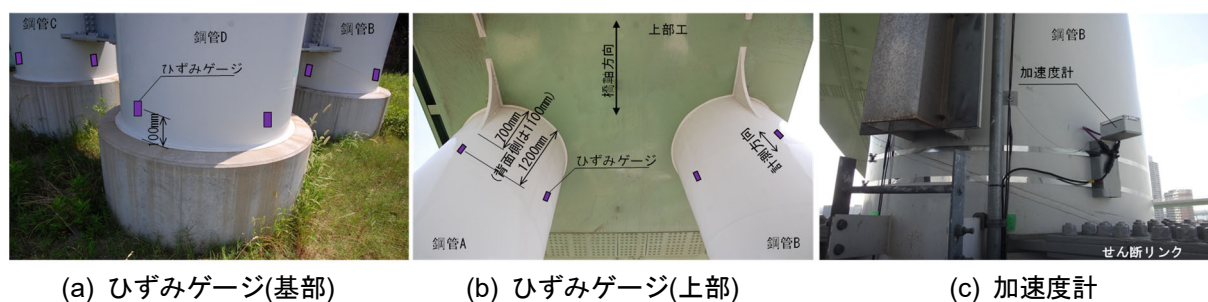


図5 計測機器の設置状況

表1 計測機器の設置状況

想定される状況		計測回数・時期	計測期間	計測間隔
常時	活荷重	年1回(春季)	72時間	200Hz
	風荷重	年1回(強風が想定される時期)	24時間	
	温度荷重	年4回(春季・夏季・秋季・冬季)	1週間程度	10分
地震時	レベル1地震動	地震発生時	地震開始から300秒	200Hz
	レベル2地震動			
	レベル2を超える地震動			

3. 実橋に適用された鋼管集成橋脚の性能評価法の提案

実橋に適用された鋼管集成橋脚がコンセプトに従って挙動するかどうかを検証するための性能評価フローを図6に示す。このフローの内、モニタリング計測計画を策定するにあたっては、2.1に示す対象構造物の構造特性を踏まえ、想定する作用の状況に対し、その構造に求められる性能を整理した。図7に各部材の評価指標と測点の検討イメージを示す。設計で想定されている挙動を列挙し、それぞれの挙動に対して実構造物において実際に起こる可能性がある挙動、すなわち想定と異なる挙動（疑義）を抽出した。その上で、抽出した疑義を検証するために捉えるべき項目について検討し、計測部位・計測項目を整理した。表2にPD4橋脚の各部材の評価指標と測点の一覧を示す。ここで、設計で想定している作用の状況として、常時、レベル1地震動、レベル2地震動、最大級シナリオ地震動などレベル2地震動を超える地震動があり、ここではこれらの状況ごと実際に起こっている可能性がある挙動と設計想定を確認するために捉える項目を整理した。

この整理を基に全ての項目を計測するとコストが膨大になることから、計測計画では最低限の計測点数での計測を行うこととした。その上で、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し、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こととした。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ととなる。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必要がある。

これまでに活荷重時、温度変化時、レベル1地震動に満たない小規模地震動の計測データが得られているが、ここでは、これらの計測データを用い、これらの2つの評価方法による分析例を示す。なお、台風時やレベル1地震動以上の計測データは執筆時点で取得できていない。

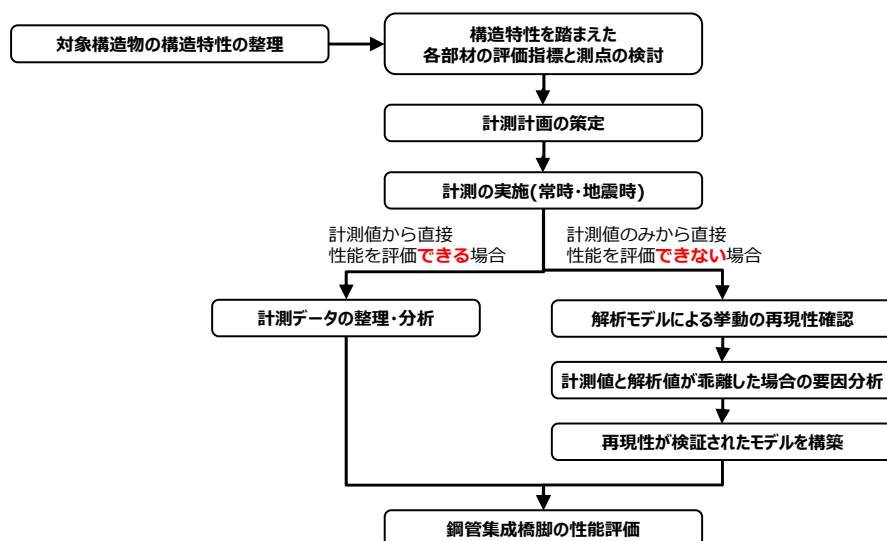


図6 実橋に適用された鋼管集成橋脚の性能評価フロー

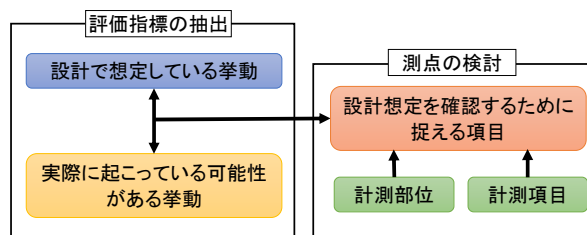


図7 各部材の評価指標と測点の検討

表2 PD4橋脚の各部材の評価指標と測点の一覧

計測で主に想定される状況		設計で想定している挙動	実際に起こっている可能性がある挙動	設計想定を確認するために捉える項目	計測計画	
					計測部位	計測項目
1	常時	【耐荷性能】 4本の鋼管が一体で挙動	各鋼管の挙動にバラつきが発生	鋼管間の距離 各鋼管が負担する荷重	4本の鋼管断面	鋼管間距離
					4本の鋼管全体	鉛直方向ひずみ
		【耐荷性能】 全ての部材が構造的に弾性域	溶接部の残留応力や仕口取付部が応力集中により部分的に塑性化	構造弾性体であること 部材接合部の振幅応力	橋脚天端 橋脚基部	変位、残留変位 構造体の周期
					溶接部近傍 (柱-上部工) (柱-横つなぎ)	鉛直方向ひずみ
2	活荷重	【耐荷性能】 溶接部の振幅応力を疲労限以下とするため、疲労の影響は受けない	最大の振幅応力が想定より大きい可能性（過積載車の影響）	鋼管内の状態	鋼管内部	内部状態 温度 湿度
3		【耐荷性能】 鋼管内は密閉空間であるため、腐食しない	損傷の発生や結露の繰り返しによる水の浸入によって鋼管内部が腐食			
4	環境作用	【耐荷性能】 4本の鋼管が一体で挙動	各鋼管の挙動にバラつきが発生	鋼管間の距離 各鋼管が負担する荷重	4本の鋼管断面	鋼管間距離
5					4本の鋼管全体	鉛直方向ひずみ
6	L1地震動	【耐荷性能】 全ての部材が構造的に弾性域	溶接の残留応力等による塑性域が、部分的に拡大	構造弾性体であること	橋脚天端 橋脚基部	変位、残留変位 構造体の周期
7	L2地震動	【耐荷性能】 4本の鋼管が一体で挙動	各鋼管の挙動にバラつきが発生	鋼管間の距離 各鋼管が負担する荷重	4本の鋼管断面	鋼管間距離
8		【耐荷性能】 せん断パネルに塑性化が集中	鋼管が部分的に塑性化 横つなぎ材仕口側の溶接部に割れが発生	鋼管が構造弾性体であること	橋脚基部 横つなぎ材部断面 橋脚天端	変位、残留変位 ひずみ
9		【耐荷性能】 せん断パネルが安定してエネルギーを吸収	一断面で対面するせん断パネルの累積塑性変形量が不均一	各パネルの累積塑性変形倍率	せん断パネル	対角距離
10		【耐荷性能】 せん断パネルの降伏が鋼管の降伏よりも先行して発生	せん断パネルの降伏点が想定よりも大きくなり、鋼管の降伏が先行して発生	鋼管とせん断パネルの損傷順序	4本の鋼管全体 せん断パネル	鉛直方向ひずみ 対角距離
11		【耐荷性能】 地盤(0.2)や鋼管(0.03)の減衰を考慮した振動	せん断パネルを適用した構造物において、それらの減衰が有効に機能しない	下部工の加速度	橋脚天端 横つなぎ材部断面 橋脚基部	加速度
12	L2を超える地震動 (最大級シナリオ地震動等)	【耐荷性能】 L2地震動と同じ	L2地震動と同じ	L2地震動と同じ	-	-
13		【耐荷性能(復旧性)】 せん断パネルのみの取り換えが可能	仕口間の変形が残り、取り換えが困難	せん断リンクの損傷状況	横つなぎ材部断面	目視

3.1 計測データを用いた性能評価

常時のうち、温度変化時の挙動に対して計測データから性能評価を行った例を示す。鋼管集成橋脚は“水平荷重に対して、4本の鋼管が一体で抵抗する”ことを想定している。これに対して、各鋼管がバラバラに抵抗することが疑義として挙げられるため、計測データから温度変化時の挙動の分析を行った。

計測データのうち、外気温が最も低い時刻は2022年1月23日5時38分の3.6℃、外気温が最も高い時刻は2022年7月23日16時04分の39.1℃であった。この温度変化(+35.5℃)に伴う鋼管ひずみの変化量を図8に示す。

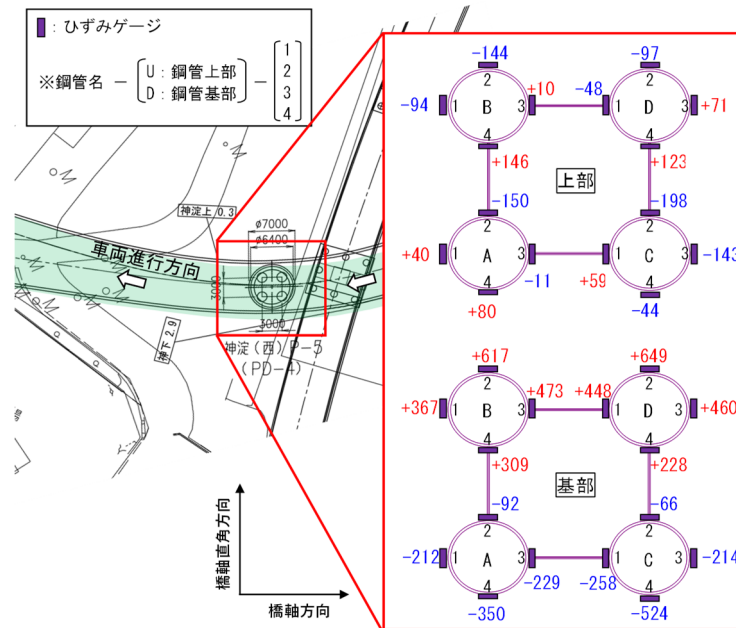


図8 温度変化(+35.5℃)に伴う鋼管ひずみの変化量(ひずみ値×10⁻⁶)

鋼管基部のひずみ変化量は、鋼管B、D基部の橋軸直角方向外側（B-D-2、D-D-2）でそれぞれ+617 μ 、+649 μ 、鋼管A、C基部の橋軸直角方向外側（A-D-4、C-D-4）でそれぞれ-350 μ 、-524 μ である。これは、+35.5℃の温度変化により鋼製の上部工が延び、上下部工剛結構造のPD4橋脚上部が曲線の外側（橋軸直角方向）に押し出された挙動を、鋼管基部のひずみが捉えているためと考えられる。また、このひずみ変化量は、4本の鋼管が1本の柱とした場合の最外縁においてそれぞれ最大・最小となっていることから、設計で想定した通り、4本の鋼管は一体で挙動していると言える。

一方、鋼管上部のひずみは鋼管基部のような一定の傾向が見られなかった。これは、鋼管上部のひずみは、温度変化による水平力によるひずみだけではなく、活荷重による鉛直力によるひずみが含まれているためと考えられる。

3.2 解析を用いた性能評価

モニタリング計測を開始した2021年4月以降、2022年3月31日23時34分頃、京都府南部を震源とするマグニチュードM4.3の地震が発生し、京都府伏見区および亀岡市付近で最大震度4を記録した。海老江JCTが位置する大阪市福島区では震度2を観測し、設置した計測機器で地震時観測データを得た。

鋼管集成橋脚はこのような中小規模の地震動に対して、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、この挙動は図4に示す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って鋼管集成橋脚の地震時の挙動を再現し、その解析モデルを用いた評価が必要である。一方、中小規模の地震動に対しては、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^{9) 10)}。そこで、小規模な地震動ではあるが、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。

3.2.1 観測波形

代表的な計測値としてPt.1、Pt.3、Pt.5で計測された加速度の時刻歴波形およびを図9に示す。Pt.1、Pt.3、Pt.5のそれぞれの最大加速度は、橋軸が -0.032 m/s^2 、 -0.095 m/s^2 、 -0.101 m/s^2 、直角が -0.060 m/s^2 、 -0.107 m/s^2 、 -0.110 m/s^2 、鉛直が -0.021 m/s^2 、 -0.026 m/s^2 、 -0.038 m/s^2 となり、橋脚の上部ほど加速度が増幅する傾向であった。図10に5%の減衰を考慮したPt.1の加速度応答スペクトルを道示Vに示される加速度応答スペクトルと併せて示す。これより今回計測された計測波形は、道示Vに示されるレベル1地震動より全ての周期帯で大幅に小さいことが分かる。また、橋軸と鉛直方向は周期0.1秒程度、直角方向は周期0.35秒程度の周期帯で最大加速度になっていることから、短周期が卓越する地震動であると言える。

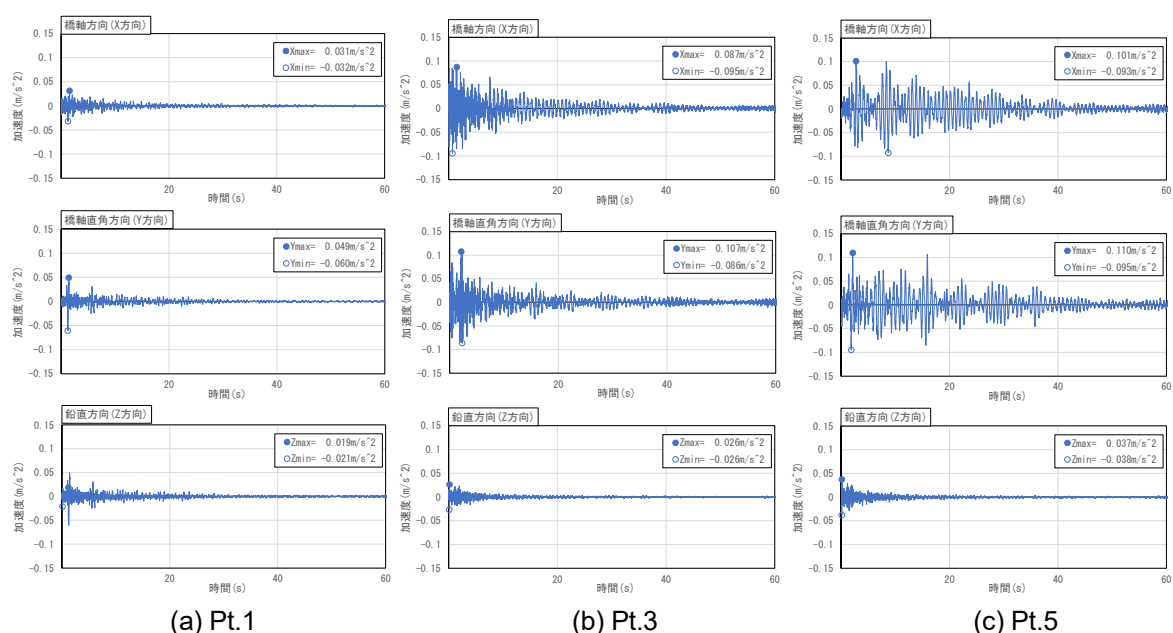


図9 観測した加速度応答時刻歴波形

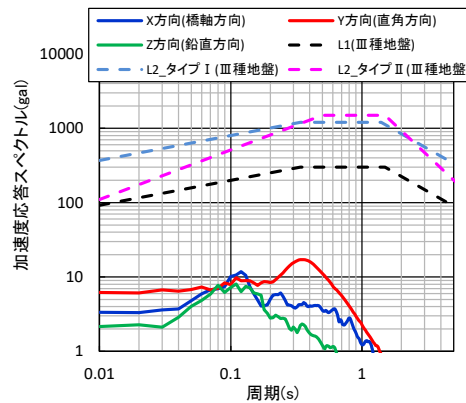


図10 観測波形の加速度応答スペクトル図(Pt.1)

3.2.2 対象橋梁のモデル化

解析条件は表3に示す通りであり，詳細設計時の考え方を踏襲することを基本とした．解析モデルは，Dランプ①橋の全体系を対象とし，2軸曲げ，軸力変動および幾何学的非線形を考慮できるファイバーモデルを用いた．橋梁の全体系モデルの3次元骨組み構造図，RC橋脚，鋼製橋脚，鋼管集成橋脚のファイバーモデルにおけるセル分割断面図を図11に示す．PD4橋脚の鋼管断面のファイバー要素は，円周方向に64分割，板厚方向に2分割とした．PD1橋脚の機能分離支承は橋軸および直角方向を線形バネ要素によりモデル化した．

鋼管柱，せん断リンクにおける普通鋼材，充填コンクリート，低降伏点鋼を用いるせん断パネルの各材料構成則を図12に示す．鋼材については，図12 (a)に示すバイリニア移動硬化則とし，降伏剛性はひずみ硬化などを考慮して $E/100$ とした．充填コンクリートについては図12 (b)に示す応力-ひずみ関係を採用した．なお，除荷と再載荷時剛性は初期剛性と同じとし，充填コンクリートの圧縮破壊ひずみは文献11)を参考に1.1%とした．せん断パネルのウェブ面は，せん断非線形特性を与え，図12 (c)に示すバイリニア移動硬化則とし，降伏剛性はひずみ硬化などを評価して $G/100$ とした．

本検討では，実橋の挙動分析を目的としているため，各部材の降伏強度は実強度を用いた．PD4橋脚は，材料検査試験の値から降伏強度を設定し，鋼管は $\sigma_y = 377 \text{ N/mm}^2$ （基準値： $\sigma_y = 315 \text{ N/mm}^2$ ），せん断パネルは $\sigma_y = 229 \text{ N/mm}^2$ （基準値： $\sigma_y = 225 \text{ N/mm}^2$ ）とした．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¹²⁾を参考に，統計データの平均値を用いた．

ここでは，Pt.1で計測された加速度を入力地震動とした地震応答解析を実施し，対象構造物のPt.2～Pt.5で計測された加速度の再現性を確認する．この際の入力地震動について，Pt.1はPD4橋脚の基部に設置された加速度計であり，基礎構造の地震応答や基礎構造と地盤間の相互作用の影響を受けた橋脚基部の応答加速度波形である．この応答加速度波形を入力地震動とするため，解析モデルの境界条件は橋脚基部固定とし，構造物全体に地震動を作用させた．地震動の加振方向は，計測方向と同様にPD4橋脚に対して橋軸方向，橋軸直角方向，鉛直方向の3方向同時加振とした．なお，解析には汎用骨組解析プログラムScanFEM¹³⁾を用いた．

表3 解析条件

ソフト名	ScanFEM ver1.2.2
解析モデル	3次元立体全体系モデル
要素	FEM梁要素(ティモシェンコ梁理論)
材料非線形性	ファイバーモデル
材料構成則	バイリニア(鋼材)
硬化則	移動硬化則
幾何学的非線形の種類	有限変位・有限ひずみ・有限回転
幾何学的非線形の計算法	updated Lagrange法
時間積分法	0.01sec以下
減衰	レーリー減衰
反復計算	Newton-Raphson法

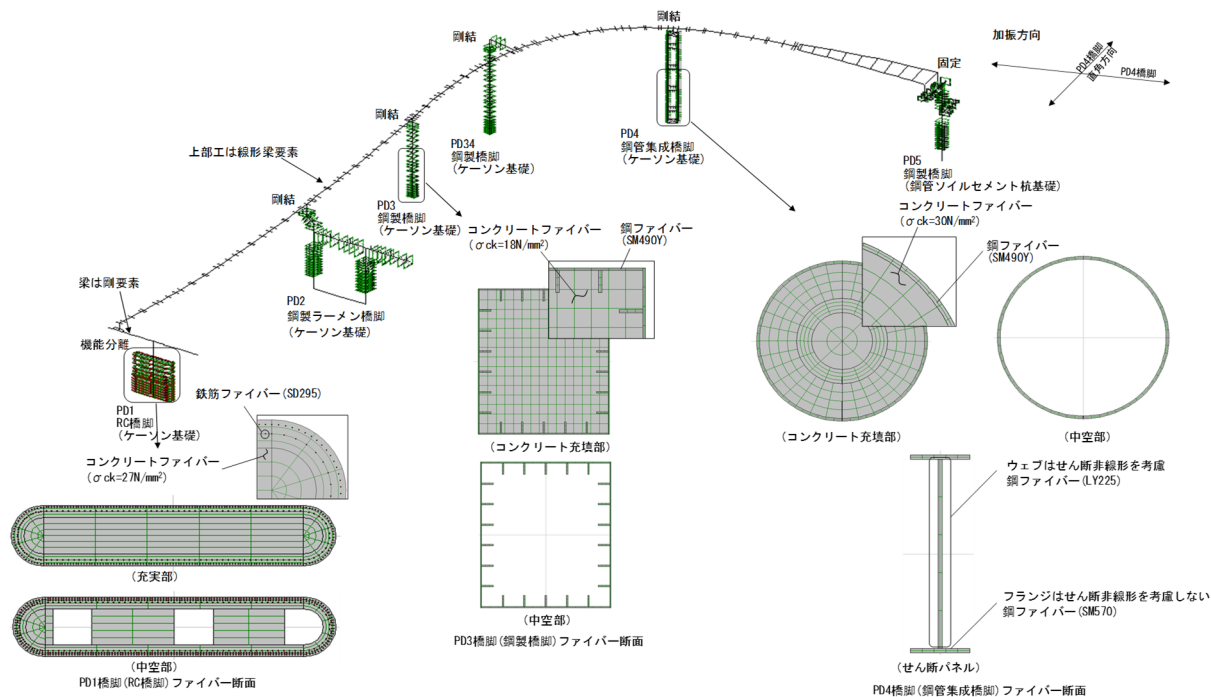
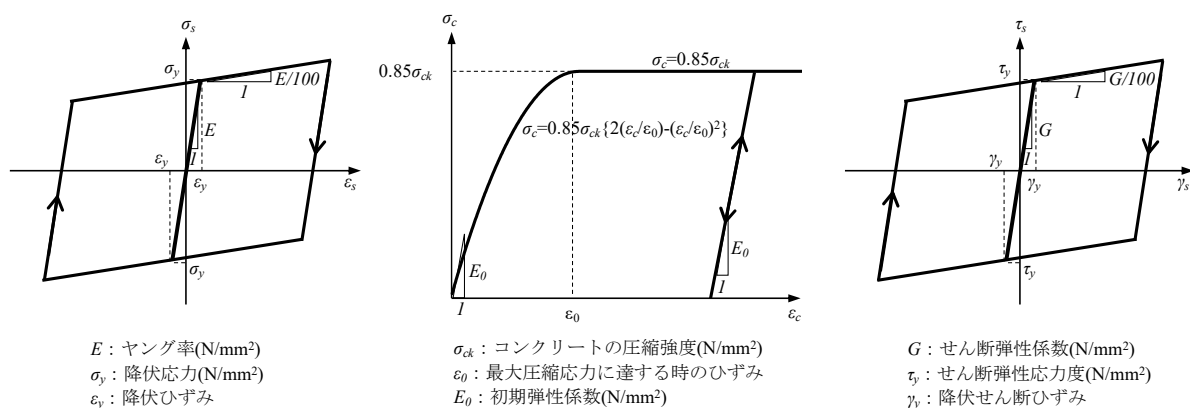


図11 Dランプ①橋および鋼管集成橋脚の解析モデル



(a) 鋼材の応力-ひずみ関係 (b) 充填コンクリートの応力-ひずみ関係 (c) せん断パネルの応力-ひずみ関係

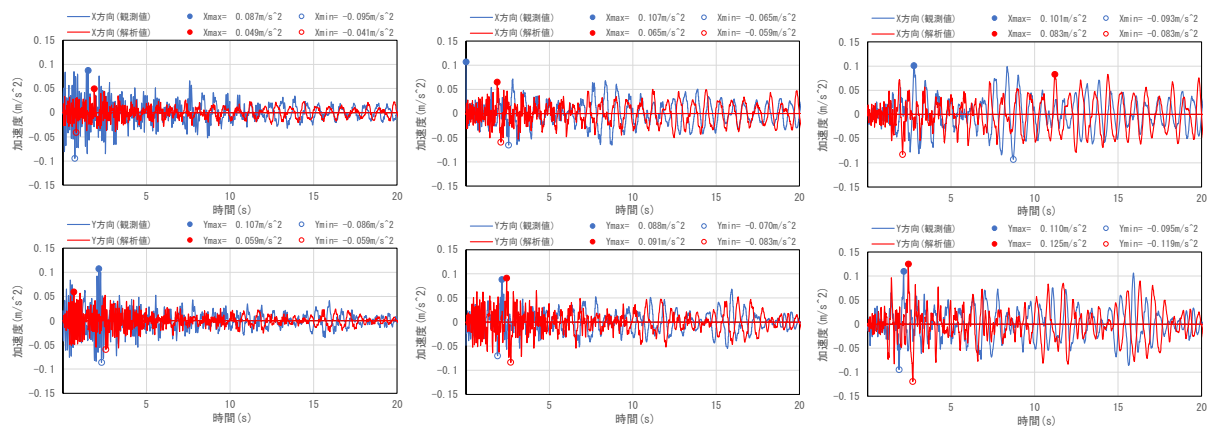
図12 材料構成則

3.2.3 小規模地震時の再現性の確認

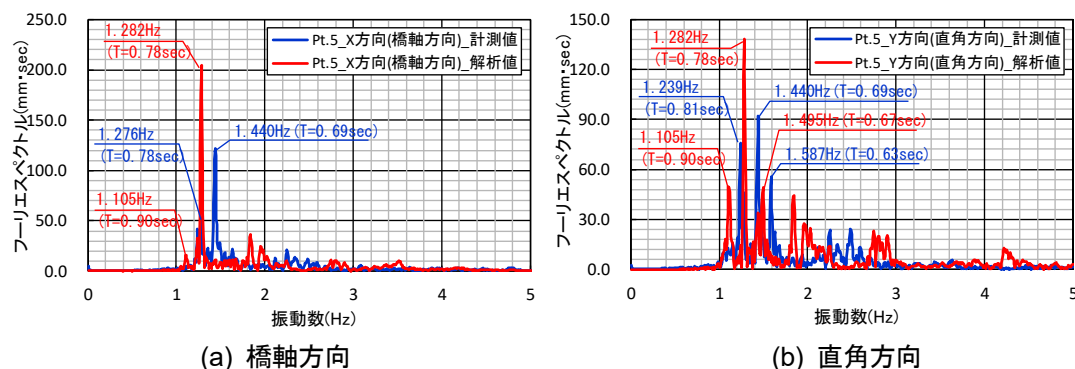
図13に橋脚上部に位置するPt.3, Pt.4, Pt.5の橋軸および直角方向の加速度応答時刻歴波形の観測波形と解析結果の比較を示す. 本来, 解析モデルの再現性の確認においては, 上部工の挙動などの異なる点での比較を併せることにより検証精度は向上するが, 本検討の目的が鋼管集成橋脚の挙動検証であることや, 異なる地点での計測が実施されていないことから, PD4橋脚の応答を比較の対象としている. 最大加速度に着目すると, Pt.3において解析結果より観測波形の方が大きい傾向が見られたが, Pt.4, Pt.5では概ね一致した. 一方, 図14に示すPt.5のフーリエスペクトルに着目すると, 橋軸方向の観測波形の卓越振動数は1.28 Hzであり, 解析結果の卓越振動数は1.11 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. この影響で, 図13に示す加速度応答時刻歴波形も逆位相になっている箇所が見られる.

このように観測値と解析結果が一致しないのは, 地震動の大きさによって基礎の変形量が異なることでの周辺地盤のひずみ依存性や, 設計上の支承条件と実挙動の相違が要因となる場合がある. これに対

して、本解析では基礎構造と地盤間の相互作用の影響を受けた橋脚基部の応答加速度波形を入力地震動としていることや、対象橋梁の中間橋脚が剛結構造であることから、これらの影響は小さいと考えられる。その他の要因としては、解析モデルの上部構造の剛性に壁高欄や舗装などが考慮されていないことが挙げられる。特に壁高欄の剛性は、ランプ橋のように幅員が狭く桁高が低い場合には、影響が大きいと考えられる。また、本橋は曲線橋であるために、壁高欄の面外剛性は橋軸方向および橋軸直角方向の両方向に影響を及ぼすと考えられる。



(a) Pt.3 (b) Pt.4 (c) Pt.5
図13 観測波形と解析結果の加速度応答時刻歴波形の比較（上段：橋軸方向，下段：直角方向）



(a) 橋軸方向 (b) 直角方向
図14 観測波形と解析結果のフーリエスペクトルの比較（Pt.5）

このように、解析モデルを用いて計測位置の挙動の再現性を確認し、計測値と解析値が乖離した場合には、その要因を分析した上で解析モデルを更新する必要がある。そして、再現性が確認された解析モデルを用いて、例えば、鋼管全体や全てのせん断パネルが弾性的に挙動しているかといった、計測データと外観目視から評価が困難な項目を評価することは有効である。

4. まとめ

本研究では、実橋に適用された鋼管集成橋脚の鋼管集成橋脚の性能検証方法を提案するとともに、これまでに得られた計測値を用いて性能評価の一例を示した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 鋼管集成橋脚の構造特性を踏まえ、各作用に対して設計で想定している挙動と実際に起こる可能性がある挙動を整理した。
- (2) それらの差を捉えるために必要な計測項目及び計測箇所を抽出した上でモニタリング計画を策定し、モニタリング計測の評価手法として、計測値から直接性能を評価できる場合とできない場合の評価

フローを示した。

- (3) 計測値から直接評価できる場合の一例として、常時作用のうち温度変化時に計測された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1本の柱として一体で抵抗していることを確認した。
- (4) 計測値から直接評価できない場合の一例として、計測された小規模地震動を用いて、一般的な非線形動的解析モデルの再現性を検証した。その結果、橋軸方向、橋軸直角方向ともに解析が長周期側の傾向であった。これは、解析モデルに考慮されていない壁高欄の剛性が影響を及ぼしていると考えられる。

今後、壁高欄等の解析モデルで考慮されていない部材の影響を把握し、再現性向上を図る必要がある。また、2024年1月1日に発生した能登地震により計測地点で震度4を観測しており、その時に取得した計測データを用いて同様の検討を行い、鋼管集成橋脚の性能を評価する予定である。

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) 金治英貞，鈴木英之，野中哲也，馬越一也：履歴型ダンパー付き鋼管集成橋脚の損傷制御構造に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 50A，2004。
- 2) 金治英貞，林訓裕，西海健二，豊島径：モデル載荷試験による鋼管集成橋脚の力学的特性の検証，土木学会第60回年次学術講演会，2005。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 後藤芳顕，海老澤健正，野中哲也，Yan XU，金治英貞，岡上政史，安藤高士，服部匡洋：大型加振実験によるレベル2とこれを超える地震動に対するコンクリート充填鋼管集成橋脚で支持された連続高架橋の耐震性能の解明，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 77，No. 1，2020。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017。
- 7) 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。
- 8) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス，<https://mapapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>(参照2023-3-20)。
- 9) 松本崇志，光川直宏，服部匡洋，馬越一也，篠原聖二：免震支承を有する4径間連続鋼箱桁橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，第38回地震工学研究発表会，土木学会，A21-I312，2018。
- 10) 富健一，許佳奕，服部匡洋，馬越一也，篠原聖二：ケーソン基礎を有する鋼単純合成鉄桁における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価，第38回地震工学研究発表会，土木学会，A21-I305，2018。
- 11) （社）日本鋼構造協会・鋼橋の性能照査型設計対応研究委員会・鋼橋の耐震性部会：鋼橋の耐震性能設計の基本と応用，2002。
- 12) 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。
- 13) 株式会社耐震解析研究所：SeanFEM ver.1.38 理論マニュアルと検証，2007。

（受理：2024年3月17日）
（掲載決定：2024年9月19日）

Proposal for Performance Evaluation Method of an Integrated Column by Steel Pipes Using Monitoring Results

AKAMATSU Shinsuke¹⁾, HATTORI Masahiro²⁾, TANIGUCHI Yoshiki³⁾,
NISHIMURA Miki⁴⁾, AOKI Yasumoto⁵⁾, MIYATA Shuta⁶⁾
and SUGIURA Kunitomo⁷⁾

1) Chief Researcher, Hanshin Expressway Research Institute for Advanced Technology

2) Chief Researcher, Hanshin Expressway Research Institute for Advanced Technology, Dr. Eng.

3) Assistant Manager, Hanshin Expressway Company Limited

4) Hanshin Expressway Company Limited

5) Assistant Manager, Hanshin Expressway Company Limited, Dr. Eng.

6) Dia Nippon Engineering Consultants Co., Ltd.

7) Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Ph.D.

ABSTRACT

Monitoring measurements have been conducted on an integrated columns by multiple steel pipe applied to actual bridges to verify that the pier behave according to the concept assumed in the design. In this measurement, the response is measured for both ordinary conditions and small earthquake conditions. This study proposes a method for verifying the performance of an integrated column by multiple steel pipe using the measured data, and evaluated the performance of the piers using the measured data obtained so far. For ordinary conditions, the measured data were used to verify that the behavior of the piers was as assumed in the design, and for small earthquake conditions, the validity of the analysis model was verified by reproduction analysis using observed waveforms.

Keywords: Integrated column by multiple steel pipes, Monitoring, Performance verification, Repeatability analysis, Nonlinear dynamic analysis