鉛直成分が卓越した地震動による橋桁の振動および損傷

名古屋工業大学大学院工学研究科　学生会員　○辻井純平
名古屋工業大学大学院工学研究科　正会員　野中哲也
大日本コンサルタント株式会社　正会員　徳橋亮治

1. まえがき

多数の橋梁が被害を受けた 2016 年の熊本地震では，鉛直成分が卓越した地震動が観測された．**図 1** に示すように，KiK-net 益城や西原村小森で本震時に観測された鉛直地震動は，周期 0.2 秒～0.3 秒程度の短周期帯で卓越した加速度を示している．一般的な鈑桁橋では 0.2 秒～0.3 秒程度の周期帯に鉛直方向の固有振動モード（鉛直方向に桁がたわむモード）を有する場合が多いため，鉛直地震動との共振により橋桁が損傷する可能性がある[1]．

本検討では，熊本地震で観測された鉛直地震動と，それと共振する可能性のある桁の鉛直振動に着目し，橋桁の振動特性および損傷特性を数値解析により検討した．

2. 対象橋梁の設計およびモデル化

本検討では，**図 2** に示す 4 主桁を有する支間長 30m-40m-30m の 3 径間連続非合成鈑桁橋を対象とする．これは，地方山間部一般国道相当の第 3 種第 2 級の道路に架かる 100m 程度の規模の鈑桁橋を想定し，本検討のために設計を行ったものである．上部構造の設計では，平成 24 年版道路橋示方書に準拠した．上部構造は一支承線上 4 基の積層ゴム支承を介して RC 橋脚で支持される．基礎は全て直接基礎である．免震支承は橋軸方向のみに機能し，橋軸直角方向は固定である．

桁の鉛直振動による上部構造の損傷を検討するため，対象橋梁に対して骨組モデル，詳細モデルの 2 つの解析モデルを設定する．

骨組モデルは，はり理論に基づく弾性域での桁の振動特性を把握するために，はり要素を基本にモデル化したものである．上部構造は主桁と床版の剛性のみを考慮した 1 本の弾性はり要素を用いた．橋台・橋脚には弾性はり要素を用い，ゴム支承は橋軸方向にバイリニア型の移動硬化則，橋軸直角･鉛直方向は剛なバネ要素を用いた．

詳細モデルは，上部構造の詳細な損傷特性を把握するために主桁，床版に加え，対傾構や横構，横桁を全て考慮してモデル化を行ったものである．**図 3** に示すように上部構造の各部材（主桁，対傾構，横構，横桁，床版）にはシェル要素を用いた．材料構成則には鋼材に対してバイリニア型の移動硬化則，床版のコンクリートは線形弾性体とした．上部構造以外のゴム支承と下部構造は骨組モデルと同一である．

3. 対象橋梁の固有振動特性

骨組モデル，詳細モデルの主要な鉛直固有振動モードを**表 1** に示す．両モデルとも約 0.33 秒に鉛直 1 次，約 0.17 秒に鉛直 2 次のモードを有している．これらの固有周期は，熊本地震の鉛直地震動で卓越した周期帯（**図 1**）と対応しており，これらのモードの共振により桁のたわみや曲げモーメントが大きく生じる可能性が考えられる．

4. 損傷に寄与する固有振動モードの検討方法

まず，骨組モデルに対して時刻歴応答解析を行い，はり理論を基に桁の損傷特性を把握する．次に，骨組モデルにおける損傷特性を踏まえた上で，詳細モデルに対して静的解析を行い，より詳細な損傷特性を検討する．

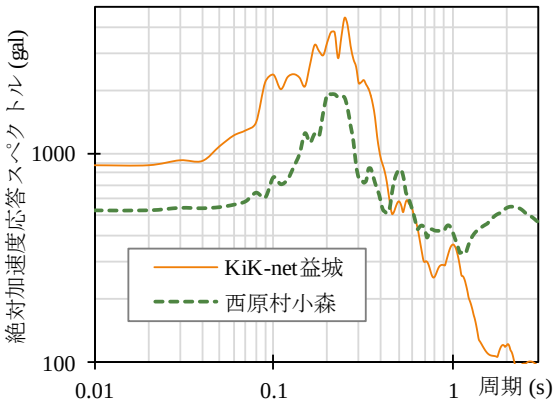


図 1　熊本地震の鉛直加速度応答スペクトル

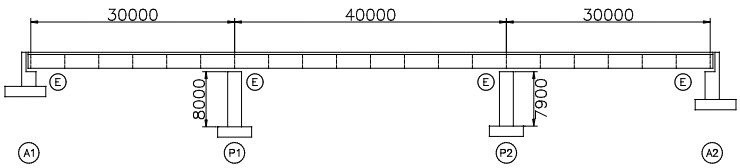


図 2　対象橋梁側面図

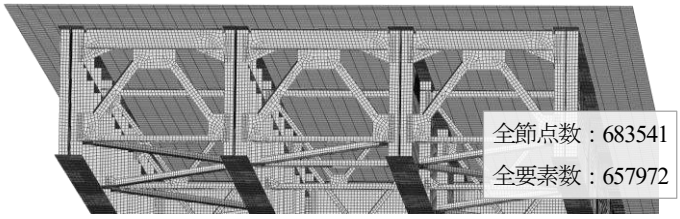
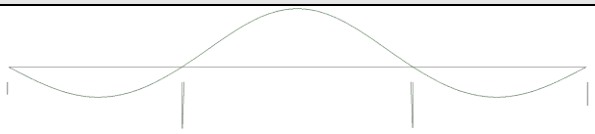
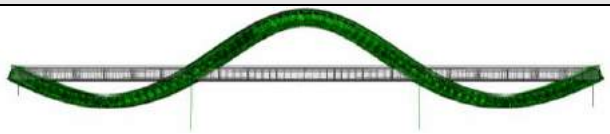
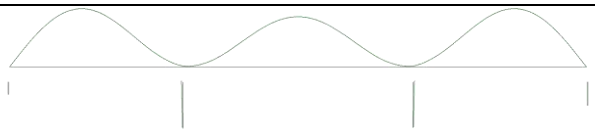


図 3　詳細モデル

キーワード　固有振動モード，固有周期，鉛直地震動，鈑桁橋，損傷
連絡先　〒466-8555　愛知県名古屋市昭和区御器所町　名古屋工業大学　TEL:052-735-5563

表 1　鉛直方向固有振動モード

	骨組モデル	詳細モデル
鉛直 1 次	 T = 0.332 (s)	 T = 0.326 (s)
鉛直 2 次	 T = 0.167 (s)	T = 0.173 (s)

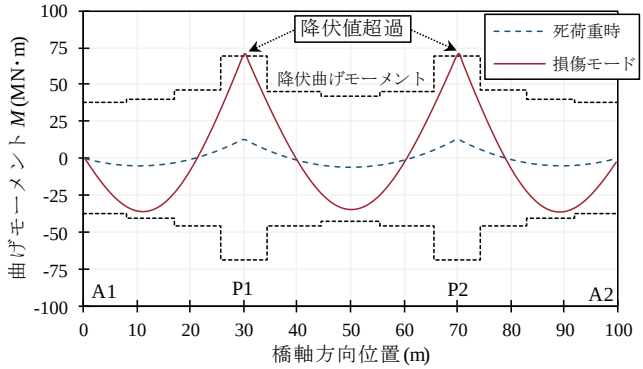


図 4　骨組モデルの曲げモーメント分布

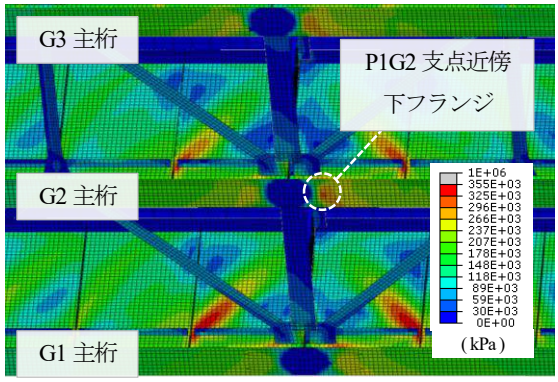


図 5　詳細モデル P1 支点周辺相当応力分布

詳細モデルに作用させる荷重モードは以下の方法による．まず，骨組モデルの時刻歴応答解析において桁の曲げ挙動が卓越した時刻の桁の変位モードを $\bar{\mathbf{u}}^b$ とする（以降「損傷モード」）．損傷モード $\bar{\mathbf{u}}^b$ は式(1)のように主要な固有振動モード $\boldsymbol{\varphi}_i^b$ の重ね合わせであると仮定し，損傷モードに対する各固有振動モード i の寄与率 α_i を最適計算により同定する．

$$\bar{\mathbf{u}}^b = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \boldsymbol{\varphi}_i^b \qquad (1)$$

同定した寄与率 α_i と詳細モデルの固有振動モード $\boldsymbol{\varphi}_i^s$ を用いた式(2)で表される変位モード $\bar{\mathbf{u}}^s$ を詳細モデルに対して弾性微小変位静的解析で与え，全ての変位制御点の節点反力を詳細モデルに与える荷重モードとする．

$$\bar{\mathbf{u}}^s = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \boldsymbol{\varphi}_i^s \qquad (2)$$

骨組モデルの時刻歴応答解析では熊本地震における代表的な強震記録である KiK-net 益城の加速度記録を用い，この東西・南北成分を橋軸・橋軸直角方向に，加えて鉛直成分も入力した 3 成分の地震動入力とする．また，骨組モデルと詳細モデルで対応する主要な固有振動モードとして，橋軸 1 次，橋軸直角 1 次と**表 1** に示した鉛直の 1 次，2 次モードを選定した．

5. 桁の鉛直振動による上部構造の損傷

骨組モデルの損傷モードにおける曲げモーメント分布を**図 4** に示す．各支間中央部や P1，P2 支点部で曲げモーメントが大きく生じており，これらの箇所の下フランジ等において損傷が生じる可能性が考えられる．

この損傷モードより求めた主要固有振動モードの寄与率比は，橋軸 1 次が 28%，橋軸直角 1 次が 10%，鉛直 1 次が 10%，鉛直 2 次が 52%であった．桁のたわみに対して，鉛直 2 次モードが大きく影響したことが確認できる．この寄与率と詳細モデルの主要固有振動モードから，損傷モードの 85%程度に相当する荷重モードを詳細モデルに入力した静的解析の結果，支点部周辺において高い応力値を示し，**図 5** のように P1G2 支点近傍の下フランジにおいてその部位の降伏応力である 355MPa に近い応力値を示した．損傷モードと同等の荷重モードを入力した場合，支点部周辺において損傷が生じる可能性がある．

6. まとめ

本検討では，熊本地震において卓越した鉛直地震動に着目し，橋梁が有する固有振動モードによる損傷の可能性を検討した．詳細な鈑桁橋モデルを用いた解析を行った結果，鉛直振動により桁全体に曲げ挙動が生じ，支点部において高い応答値を示すことが確認された．

参考文献

1) 矢部正明，馬越一也，秦吉弥：上部構造の詳細モデルを用いた積層ゴム系免震支承の地震応答の推定，第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.365-372，2017.