

連続立体交差高架橋で構成される大阪モノレールの地震時における被災度推定システムの開発

大阪モノレール株式会社 正会員 川上 卓, 三宅 潤

株式会社建設技術研究所 正会員 ○松本 崇志, 川井 菜緒, 松原 学

1. 背景と目的

2018年6月18日の通勤時間帯に発生した大阪府北部を震源とする地震において、大阪モノレールでは施設等の被災状況の把握や点検作業に時間を要した¹⁾。この経験を教訓に、地震発生後、乗客の安全確保のための速やかな列車移動と効率的な施設点検を支援することを目的とした地震被災度推定システムを開発した。本システムでは、被災している可能性が高い施設の特定とその被災状態を推定することを目的としている。本稿では、地震被災度推定システムの概要を紹介する。

2. 大阪モノレール被災度推定システムの構成

地震被災度推定システムの構成を図-1に示す。本システムは、地震発生から5分以内を目処に、被災している可能性の高い橋脚とその範囲を概略的に提供する速報システムと、地震発生から10分以内を目処に、橋脚・支承・車両の被災状況をより詳細に推定し、列車の移動判断や点検の重点化を支援するための詳細システムで構成している。

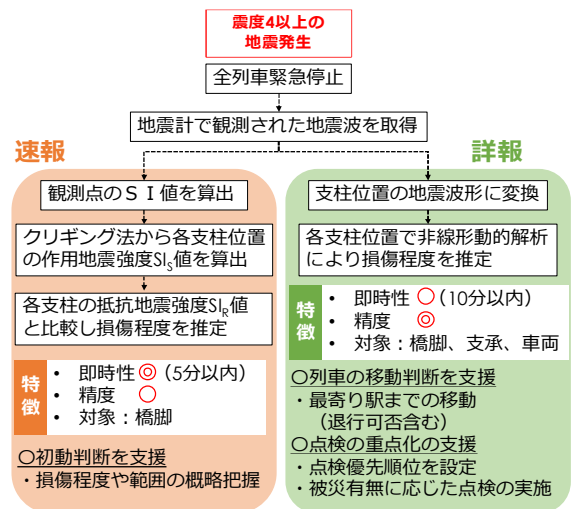


図-1 地震被災度推定システムの概要

地震発生から5分以内を目処に、被災している可能性の高い橋脚とその範囲を概略的に提供する速報システムと、地震発生から10分以内を目処に、橋脚・支承・車両の被災状況をより詳細に推定し、列車の移動判断や点検の重点化を支援するための詳細システムで構成している。

3. 速報システムの概要

3.1 地震強度と橋脚の損傷の相関性検討

即時性が求められる速報システムでは、橋脚位置に作用する地震強度 (SI_S 値) と各橋脚が抵抗できる地震強度 (SI_R 値) の大小関係から、被災状況を簡易に判定する方法を採用した。

この手法で被災度を推定するためには、橋脚の損傷と相関が高い地震強度の指標を把握する必要がある。そこで、地震強度の指標として地震動の最大加速度 PGA と SI 値²⁾と、橋脚の損傷指標として応答塑性率 μ_r に着目して検討した。検討に用いた地震波は国内外で観測された振幅調整等をしていない既往の強地震記録108波形とし、対象地震全ての所要降伏震度スペクトルを作成することで、全橋脚の応答塑性率 μ_r を算出した。

各地震波形における橋脚の応答塑性率 μ_r の平均値 μ_{rm} と、地震強度の関係を整理した結果を図-2に示す。 PGA と μ_{rm} は明確な相関性が見られないのに対し、 SI 値と μ_{rm} は高い相関関係が確認された。この結果から、速報は SI 値で評価する方針とした。 SI 値の積分周期帯は、大阪モノレールが保有する橋脚の活荷重を考慮した場合と考慮しない場合の固有周期が正規分布に従うものと仮定し、95%信頼区間に値する0.18秒~1.34秒とした。

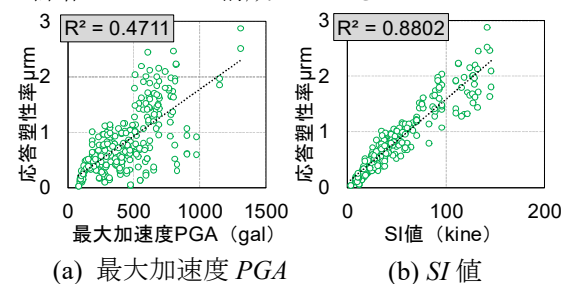


図-2 地震強度と μ_{rm} の相関図

3.2 各橋脚位置の作用地震強度 SI_S 値の評価方法

各橋脚位置における作用地震強度 SI_S 値は、大阪モノレールが保有する7地点の地震計より得られた加速度波形から SI_S 値を算出し、空間補間法である通常クリギング法で推定する手法とした。

3.3 抵抗地震強度 SI_R 値の設定方法

橋脚の抵抗地震強度 SI_R 値は、H24年道路橋示方書の許容塑性率 μ_a (安全係数 α 1.5) に達する時の地震強度とした。対象橋脚の地盤種別に応じたレベル2地震動のタイプ1およびタイプ2地震動の合計6波を1自由度1質点系の非線形マスバネモデルに動的で与え、許容塑性率 μ_a に達する時の地震波の SI 値を算出し、それを対象支柱の SI_R 値とした¹⁾。各地震動と各地震波形で SI_R 値のばらつきが見られたが、地震発生直後にプレート境界に生じる海溝型地震か内陸直下型地震の区分は行えないため、 SI_R 値は6波の単純平均値とした。

キーワード モノレール, 地震, 被災度推定システム, SI 値, 非線形動的解析, 地震防災

連絡先 〒565-0826 大阪府吹田市千里万博公園1番8号 大阪モノレール株式会社 技術部企画更新課 TEL 06-6875-5780

4. 詳報システムの概要

詳報システムでは非線形動的解析を行うことで、速報システムよりも精度良く橋脚の被災度を推定する方法を採用した。さらに、動的解析から得られる応答から、上部構造を支持する支承と大阪府北部地震で塑性化した車両台車枠の被災度も推定する。

4.1 自由振動実験による車両の基本特性の把握

車両の被災度推定するための非線形動的解析モデルを構築するうえで、ゴムタイヤの安定輪等を介して桁上を走行する車両の振動特性を把握することが重要である。そこで、図-3 に示すとおり、加速度計を設置した空車の実車両を人為的に自由振動させ、取得した加速度波形から車両全体の固有振動モード、そして、桁-台車枠間と台車枠と車体の水平剛性および減衰定数を評価した。自由振動実験の加速度波形と分布の一例を図4に示す。Stabilization Diagramによる車両の固有周期を分析した結果は1.85秒程度、自由振動波形から求まる減衰定数は4%程度である。

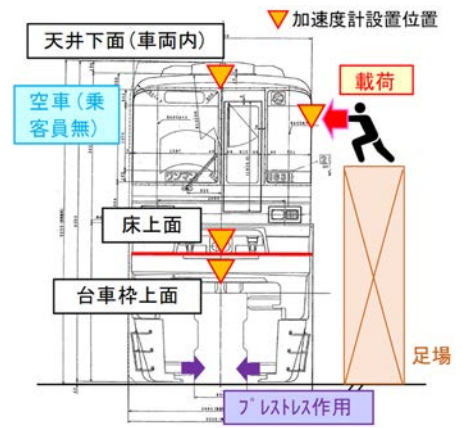


図-3 モノレール車両の載荷方法

図-4 に示すとおり、加速度計を設置した空車の実車両を人為的に自由振動させ、取得した加速度波形から車両全体の固有振動モード、そして、桁-台車枠間と台車枠と車体の水平剛性および減衰定数を評価した。自由振動実験の加速度波形と分布の一例を図4に示す。Stabilization Diagramによる車両の固有周期を分析した結果は1.85秒程度、自由振動波形から求まる減衰定数は4%程度である。

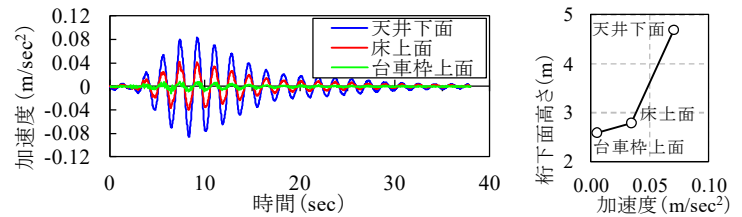


図-4 車両の加速度波形と高さ方向の加速度分布図

4.2 非線形動的解析モデルと解析ケース

車両による影響が支配的となる直角方向の動的解析は図-5に示すように、橋梁系と車両系の3質点系と、橋梁と車両の1質点系が考えられる。両者の条件で構造解析を実施して得たM- ϕ 関係の結果を図-6に示すが、前者のモデルは橋脚と車両の位相差によって橋脚の被災度を過小評価する可能性が示唆された。そこで、橋脚と支承の被災度判定は1質点系のばねマスモデル、車両の被災度判定は3質点系のばねマスモデルで評価する方針とした。動的解析モデルは、橋脚はモデルバイリニア型の非線形ばね要素、車両は線形ばね要素とし、減衰モデルは剛性比例型とした。解析ケースは1質点系モデルによる橋軸と直角方向の活荷重有無の計4ケース、3質点モデルによる直角方向の1ケースとした。

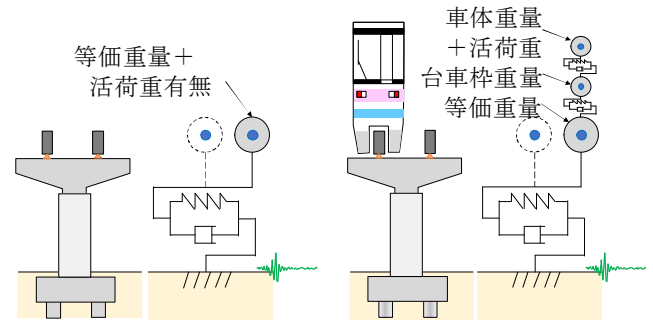


図-5 詳報システムにおける解析モデル

4.3 車両位置の条件を反映した被災度推定

橋脚と支承の被災度判定は車両が載っているか否か、すなわち、活荷重の有無、が大きく影響する。そこで、運輸指令が車両停止位置をシステムに登録することで、車両位置を反映した各施設の被災度を推定できるシステムとした。

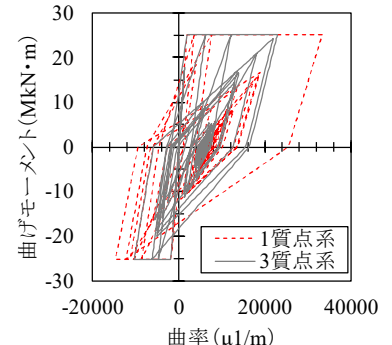


図-6 曲げモーメント-曲率の関係

4.4 支承および車両の被災度推定方法

支承はアンカーボルトの耐力(PC桁は引張耐力、鋼桁はせん断耐力)と作用力の大小関係で被災度判定を行う。車両は台車枠の載荷実験による水平力と応力の関係式から作用応力を算出し、降伏有無で判定を行う。

5. まとめ・今後の展望

2022年4月から被災度推定システムを運用している。現状の被災度推定システムにおける距離減衰率は既往研究を参考にしているが、地震発生ごとに大阪モノレールが保有する観測データから減衰傾向を分析し、高度化を図る。

謝辞: 今回の開発に際し、ご指導を賜り適切なるご助言をいただいた京都大学大学院工学研究科の清野純史教授、高橋良和教授、金哲佑教授、大阪産業大学工学部の大津山澄明教授、大阪市立大学大学院工学研究科の山口隆司教授、林巖助教に心からお礼申し上げます。

参考文献: 1) 鳥牧ら: 大阪モノレールにおける(仮称)地震被災度推定システムの構築, 第57回年次学術講演会講演概要集 Vol.75., I-440, 2) Housner, G. W.: Behavior of structure during earthquake, ASCE, EM4, pp.109~129, 1959, 3) 大阪府: 南海トラフ巨大地震土木構造物耐震対策検討部会 部会報告資料, H26.9