

イラン・バム地震における構造物の被害分析

九州工業大学 正会員 幸左 賢二
 大日本コンサルタント(株) 正会員 田崎 賢治
 九州工業大学 正会員 内野 裕士

1. はじめに

イラン南東部のバム市近郊を震源とし、2003 年 12 月 26 日午前 5 時 26 分頃（現地時間）発生したマグニチュード $M_w=6.6$ のイラン・バム地震では、犠牲者が 4 万人を超える甚大な被害を生じた。表-1 にバム市およびバラッド市における調査した代表的な公共構造物の損傷度一覧表を示す。構造物の特徴として公共構造物は重要度が高いために比較的 RC 構造が多く用いられており、被害も相対的に小さいものが多い。以下に、代表的な構造物の被害分析を行った結果について示す。

2. 給水塔の被害

2.1 水平震度漸増解析による分析

被災中心地に位置する RC 構造の給水塔では、図-1 に示すように、柱下端部においてかぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋が露出、座屈する被害を生じていた。給水塔の柱配置は正八角形であり、中層梁を有する立体ラーメン構造である。そこで、給水塔の保有耐力を把握する目的で、フレームモデルを用いた静的な水平震度漸増解析を実施した。図-2 に給水タンク重心位置における水平震度－水平変位関係を示す。解析の結果、柱下端部が降伏に達した後、曲線勾配は大きく軟化する。したがって、給水塔全体としての降伏水平震度は $k_{hy}=0.37$ 程度であり、等価水平加速度に換算して 370gal 程度以上の地震力が作用したものと考えられる。

2.2 非線形時刻歴応答解析による分析

次に、図-3 に示す今回の地震で観測されたバム市の地震波形を用いて非線形時刻歴応答解析を実施した。また、当該地域の地盤種別を II 種地盤と推定し、兵庫県南部地震における JR 鷹取駅波形を入力するケースも行った。給水塔の実際の損傷として、西側柱に引張力によるかぶりコンクリートの剥離、東側柱に圧縮による鉄筋座屈が発生しており、断層直角方向西方向の作用力が卓越したものと考えられることから、図-1 に示すフレームモデルの東西方向を入力方向としている。また、解析パラメータとして、各々波形倍率を 4 種類変化させている。図-4 にイラン地震波形を入力した場合（波形倍率 1.0）の柱基部の曲げモーメント－曲率応

表-1 代表的構造物の損傷度

構造物 種別	番号	主部材 材料	損傷度	備 考
橋梁	No.1	RC	C	14 径間単純桁
	No.2	RC	D	3 径間単純桁
	No.3	RC	D	7 径間単純桁
給水塔	No.1	RC	C	鉄筋座屈発生
市役所	No.1	アドベ	A	完全倒壊
	No.1	レンガ	A	鉄製中柱
	No.2	アドベ	A	鉄製中柱
	No.3	RC	B	鉄筋座屈発生
	No.4	RC	C	柱ひび割れ発生のみ
	No.5	レンガ	B	鉄製中柱、壁が倒壊
	No.6	アドベ	A	完全倒壊
	No.7	レンガ	B	鉄製中柱
	No.8	レンガ	B	鉄製中柱
	No.9	RC	C	柱ひび割れ発生のみ

損傷度 A：破壊 B：中程度 C：軽微 D：無損傷

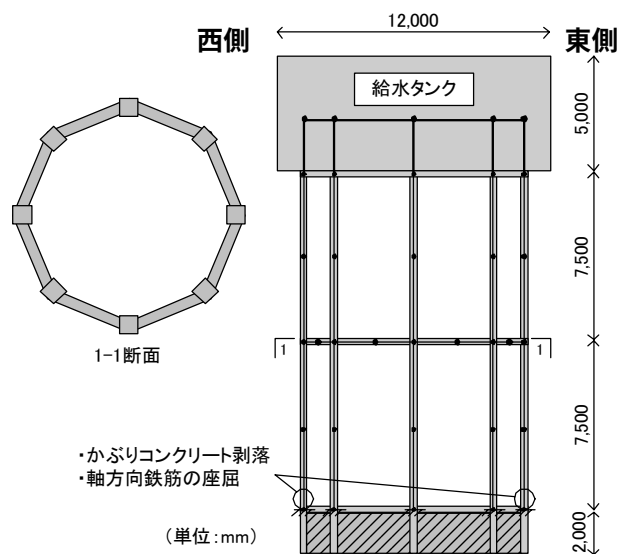


図-1 給水塔構造図

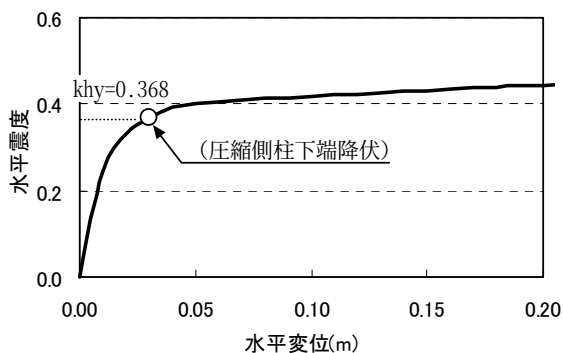


図-2 給水塔の水平震度－水平変位関係

キーワード イラン・バム地震、被害分析、公共構造物、給水塔、橋梁、時刻歴応答解析

連絡先 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学工学部建設社会工学科 TEL 093-884-3123

答履歴結果を、表-2 に各解析ケースと最大応答結果を示す。まず、イラン地震波形を用いた結果では、波形倍率 1.0 の場合、柱基部の最大応答塑性率 μ_{max} は 12.88 と大きい。波形倍率を小さくしていくと応答は徐々に低下し、倍率 0.6 では μ_{max} は 3.16 となる。したがって、観測されたイラン波形の 0.6 倍程度の場合に実際の損傷状況と整合するが、図-4 の応答履歴から分かるように、最大応答は一回の履歴ループで生じていることから、波形倍率 1.0 の地震波が作用した可能性も高い。次に、兵庫県南部地震波形を用いた結果では、波形倍率 1.0 の場合、柱基部の最大応答塑性率 μ_{max} はイラン波形と比べて大きいものの、波形倍率を 0.4 まで小さくすると μ_{max} は 3.39 となり、実際の損傷程度と一致する結果となる。

3. 橋梁の被害

3.1 構造諸元と被害状況

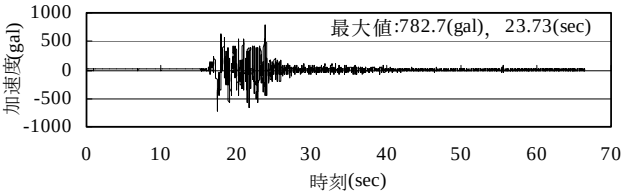
バム市周辺の3箇所のRC橋梁について調査した結果、「バムの要塞」近くの橋梁にのみ被害が認められた。本橋は 14 径間の単純桁であり、上部工は RC 桁、下部工は壁式 RC 橋脚である。また、支承構造の詳細は不明であるが、薄いゴムパッドに桁が支持されていることを想定する。損傷状況としては、桁が橋軸直角方向西側（断層直角方向）に 20mm 程度移動し、片側の橋台にはひび割れ損傷が認められた。

3.2 非線形時刻歴応答解析による分析

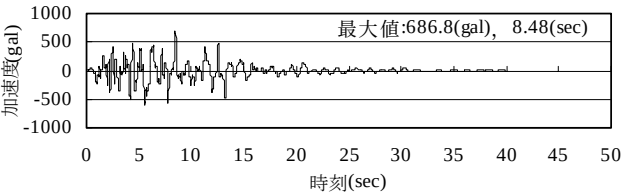
図-5 に示す解析モデルを用いて、橋軸直角方向に着目した非線形時刻歴応答解析を行った。この中で、支承部の摩擦モデルについては、既往の実験結果を参考に、上部工死荷重反力 R_d の 40% を桁が滑り始める、すなわち支承の降伏耐力と設定した。また、鉛直地震動を考慮するケースとして、最大水平応答時の鉛直加速度が 442gal であることから、支承の降伏耐力が $0.18R_d$ ($0.4 \times R_d \times (442\text{gal}/980\text{gal})$) の場合についても解析を行った。解析の結果、表-3 に示すように、鉛直地震動を考慮する場合はイラン地震波形の 0.6 倍、兵庫県南部地震波形の 0.4 倍以上で支承の降伏耐力に達し、実際の損傷と同様に RC 桁が移動する結果が得られたことから、上記の給水塔と同程度の地震動が作用したものと考えられる。

4. まとめ

- (1) 給水塔を対象とした解析結果から、給水塔の降伏水平震度は $k_{hy}=0.37$ 程度であり、実際の損傷からバム市における地震波形の 0.6 倍程度以上、兵庫県南部地震波形の 0.4 倍程度以上の地震力が作用したものと推定される。
- (2) 橋梁を対象とした解析により、橋軸直角方向の桁の移動を概ね再現できる結果が得られた。



(a)イラン・バム地震波形 (3168-2L)



(b)兵庫県南部地震波形 (JR 鷹取駅(N-S))

図-3 入力地震波形

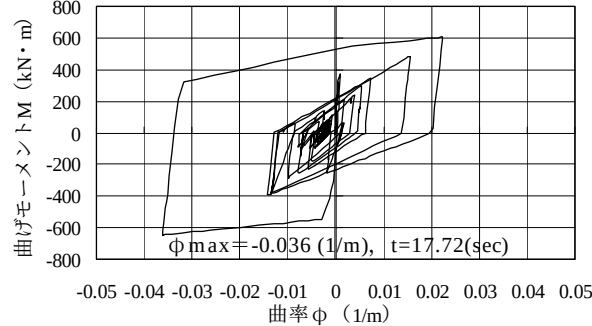


図-4 柱基部の曲げモーメント-曲率応答履歴図

表-2 最大応答結果

入力地震動	波形倍率	最大応答加速度 (gal)	最大応答変位 (m)	最大応答塑性率 μ_{max}
イラン・バム地震波形	1.0	522	0.11	12.88
	0.8	490	0.07	7.20
	0.6	425	0.05	3.16
	0.5	262	0.04	2.38
兵庫県南部地震波形	1.0	667	0.26	33.78
	0.5	486	0.16	9.41
	0.4	437	0.05	3.39
	0.3	376	0.03	2.05

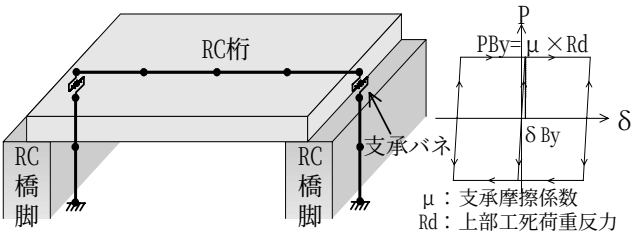


図-5 解析モデル図

表-3 支承部の降伏判定（橋軸直角方向）

入力地震動	波形倍率	支承部の降伏判定	
		鉛直地震動考慮無し	鉛直地震動考慮有り
		$PBy=0.4R_d$	$PBy=0.18R_d$
イラン・バム地震波形	1.0	○	○
	0.8	○	○
	0.6	×	○
	0.5	×	×
兵庫県南部地震波形	1.0	○	○
	0.5	○	○
	0.4	×	○
	0.3	×	×