

地震により傾斜した鉄道 RC ラーメン橋台の地震時挙動に関する基礎的検討

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○小野寺 周 正会員 田附 伸一

1. はじめに

2022 年 3 月に発生した福島県沖地震では、新幹線 RC ラーメン橋台の柱が損傷して傾斜し、復旧ならびに運転再開に時間を要した。鉄道の輸送機能の喪失が社会活動に及ぼす影響の甚大さを踏まえると、徐行運転のような輸送機能の一部を早期に回復させる目的で構造物の復旧方針を検討することが重要である。ただし、そのためには被災後の構造物が十分な性能を有していることを確認する必要がある。以上を踏まえ、被災事例に基づいて傾斜した RC ラーメン橋台の地震時挙動に関する検討を行った。

2. 対象構造物および解析モデル

対象とした 2 層 RC ラーメン橋台の諸元および線路方向の構造一般図を表 1 および図 1 に示す。図中の右側の柱は 40m の PC 桁、左側の柱は 8m の RC 桁を支持している。本検討では、被災により右側の下層柱が損傷して右側へ傾斜した後、その状態で柱の断面修復および鋼板巻き補強により復旧した場合を想定した。

解析モデルとして、傾斜がない状態で復旧したケース (Case0) と 1 度、3 度、5 度の傾斜が残留した状態で復旧したケース (Case1, 3, 5) を設定し、2 次元のフレームモデルを構築した。一例として Case0 と Case3 のモデル図を図 2 に示す。Case1, 3, 5 は Case0 に対して左側の下層柱基部を中心に傾斜分だけ節点を回転移動させた。このとき柱と梁は直交した状態を保持しており、右側の下層柱の部材長が短縮している。

RC 部材は $M-\phi$ 関係の梁要素でモデル化した。柱は断面修復により被災前と同等の剛性、耐力に回復したと仮定し、設計標準¹⁾に準拠した非線形特性を設定した。このとき鋼板巻き補強による変形性能の向上効果を考慮した。また、いずれの部材もモーメントと軸力の相関を考慮した。基礎と地盤の相互作用は非線形ばね要素でモデル化した。後述の解析では基礎の変形は上部構造と比較して十分小さい結果となっている。

さらに実際の復旧事例を参考として、傾斜に伴う軌道沈下を補整するための軌道スラブコンクリート分の荷重増加を考慮し、傾斜 1 度あたり 448kN の上載荷重を右側の支承位置に設定した。

3. プッシュ・オーバー解析による挙動の把握

自重状態の初期断面力を算定した後、プッシュ・オーバー解析を実施した。左右非対称な構造条件となることから、左右それぞれの方向に慣性力を作用させた。以降は右方向に作用させた場合 (右載荷) はケース名の末尾に“-R”，左方向 (左載荷) は“-L”を付記する。

右載荷、左載荷の構造天端での水平震度-水平変位関係を図 3、図 4 に示す。図中には柱が損傷レベル 3 の限界に達する点をプロットしており、この変位を終局変位とする。右載荷の場合、図 3 より傾斜角が大きいくほど構造全体としての剛性が低下している。一方、左載荷では図 4 よ

表 1 構造諸元

構造形式	2 層 RC ラーメン橋台
径間数	線路方向：1 径間 線路直角方向：1 径間
基礎形式	場所打ち杭 ($\phi=1500\text{mm}$)
上部工形式	右側：PC 桁 ($L=40\text{m}$) 左側：RC 桁 ($L=8\text{m}$)
軌道形式	スラブ軌道

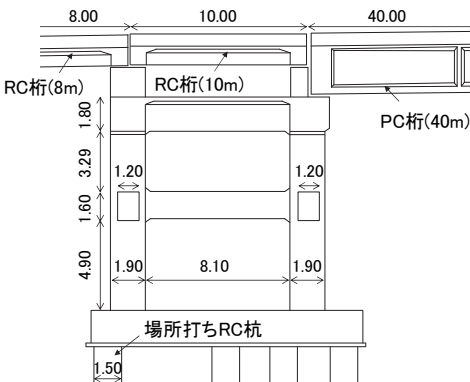


図 1 構造一般図 (線路方向, 単位: mm)

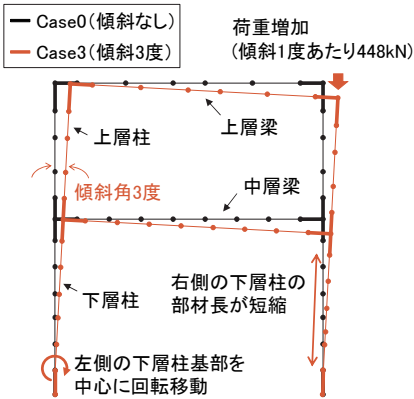


図 2 解析モデルの一例 (基礎は非表示)

キーワード 鉄道 RC ラーメン橋台, 残留傾斜, 地震復旧, 地震時挙動
連絡先 〒141-0031 東京都品川区西五反田三丁目 5 番 8 号
東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター

り剛性低下の程度は小さい。左右の構造全体としての折れ点震度 k_{heq} 、等価固有周期 T_{eq} 、終局変位を表 2 にまとめるが、 k_{heq} の左右差は Case0 では 0.04 である一方、Case1, 3, 5 ではそれぞれ 0.06, 0.11, 0.15 まで拡大し、傾斜の増加に伴って非対称な特性がより明確となる。また、いずれの方向も終局変位は傾斜角が大きいほど小さくなる傾向にある。

左右の差異について、図 5 に示す自重状態での初期モーメント分布から考察する。Case0 は概ね左右対称的な分布形状である一方、Case1, 5 は柱基部に一方方向にモーメントが発生し、慣性力を受けた場合と類似の分布形状となっている。これは傾斜によって上載荷重や自重が偏心し、柱の軸線と直角方向に力が作用するためである。これに傾斜に伴う荷重増加の影響が加味される結果、右載荷では初期モーメントに慣性力によるモーメントが加算されることで水平震度が低下する。一方、左載荷では相殺されるため水平震度の変化は小さい。

4. 地震応答解析による応答値の推定

傾斜による地震時挙動の変化を把握するために、表 2 の T_{eq} 、 k_{heq} を用いて 1 自由度系モデルによる地震応答解析を実施した。左右の k_{heq} を折れ点とする非対称なバイリニア型の骨格曲線を設定し、 T_{eq} は左右での差異が小さいため平均値を用いた。履歴特性や減衰定数は設計標準¹⁾を参考に設定した。入力地震動は標準 L2 地震動のスペクトル I、II (G3 地盤)¹⁾を用い、符号を反転させた計 4 ケースとした。

最大応答変位を表 3 に示すが、傾斜が大きいほど最大応答変位は増加する傾向にある。一例としてスペクトル I の場合、Case0 に対する応答の増加割合は Case1, 3, 5 でそれぞれ 0%, 11%, 31% である。

また、スペクトル I に対して Case0, 1 では波形が反転すると最大応答の正負も反転する一方、Case3, 5 ではいずれも正側（右側）で最大応答を生じており、構造の非対称性が顕著な場合は傾斜した方向に応答が進展する傾向が確認できる。ただし、すべてのケースにおいて最大応答変位は表 2 の終局変位には至らず、仮に 5 度の残留傾斜がある場合でも柱の安全性は喪失しない。

5. まとめ

被災により傾斜した状態で復旧した鉄道 RC ラーメン橋台を想定し、プッシュ・オーバー解析および地震応答解析により地震時挙動を検討した。その結果、傾斜によって柱基部に初期モーメントが付加されることで構造全体として左右の剛性に非対称性が生じ、傾斜した方向へ変形が生じやすくなることが分かった。また、標準 L2 地震動に対する最大応答変位は傾斜がない場合と比較して増加する傾向にあるが、傾斜角が 5 度までの条件では柱の安全性は喪失しないことを確認した。

参考文献 1) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計、丸善、2012。

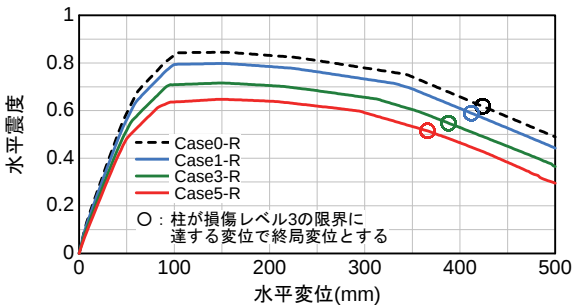


図 3 水平震度－水平変位関係（右載荷：Case*-R）

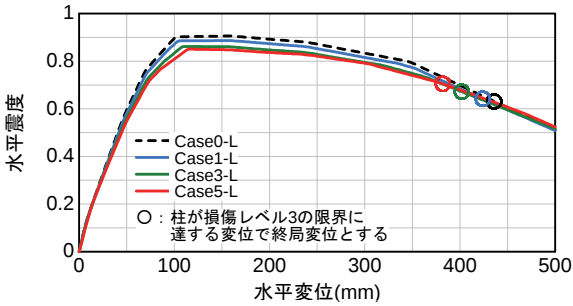


図 4 水平震度－水平変位関係（左載荷：Case*-L）

表 2 振動特性および終局変位

ケース	Case0		Case1		Case3		Case5	
作用方向	右	左	右	左	右	左	右	左
折れ点震度 k_{heq}	0.67	0.71	0.63	0.69	0.56	0.67	0.51	0.66
等価固有周期 $T_{eq}(s)$	0.57	0.57	0.58	0.58	0.61	0.59	0.63	0.60
終局変位(mm)	424	436	412	424	388	402	366	382

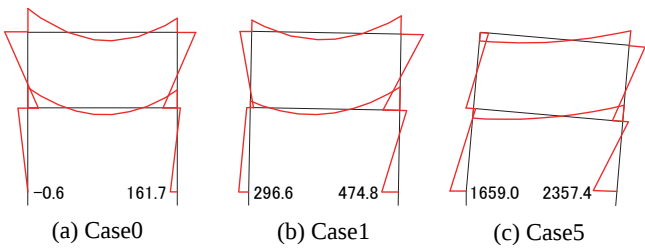


図 5 初期モーメント分布（単位：kN・m）

表 3 最大応答変位（符号は正が右方向、単位は mm）

地震動	Case0	Case1	Case3	Case5
スペクトル I	-157.8	-157.1	+173.0	+207.2
スペクトル I（反転）	+173.5	+181.6	+197.4	+210.8
スペクトル II	-226.4	-234.3	-244.6	-249.8
スペクトル II（反転）	+239.8	+255.8	+283.1	+306.8