

第 I 部門

モノレール橋脚の耐震補強前後におけるリスク評価

関西大学 大学院

学生員○ 柴田 尚明

パシフィックコンサルタンツ (株)

正会員 藤井久矢

関西大学大学院

学生員 田中新也

関西大学総合情報学部

正会員 古田 均

関西大学環境都市工学部

正会員 堂垣正博

1. まえがき

平成7年1月17日に発生したマグニチュード7.2の兵庫県南部地震は、高速道路や一般道などの橋梁に多大な被害を及ぼした。その後、平成8年度に道路橋示方書Ⅴ耐震設計編が改訂され、耐震設計法とこれに関する細目規定が見直され、既設構造物の多くに耐震補強が施された。

ところで既往の耐震補強では、既設構造物の劣化損傷やその進行度は評価されておらず、現状を健全と仮定して補強設計がなされている。他方、耐震補強設計では、耐力・変位とも許容基準値内となる設計がなされており、ある程度の余裕を有している。

一般にモノレールは、厳しい用地制約と多大な交通量の道路上に建設され、線形が制約されるため偏心した橋脚が多く用いられる。このため、常時、活荷重による疲労を受けており、通常の橋脚よりも突発的なリスクによる影響が大きいものと推察される。

よって、ここでは RC 橋脚の耐震補強前後の既設健全度を考慮し、他の性能因子を含めた耐震性能を検討し、路線としての信頼性を評価する。

2. 本研究の詳細

レベル2地震動を想定し、地震時保有水平耐力法（以下：保耐法）で、次の4ケースの耐震補強前後の耐震性能（耐力と変形性能：許容値までの余裕度）を照査し、リスク評価を行った。

①橋軸方向、タイプⅠ ②橋軸方向、タイプⅡ

③直角方向、タイプⅠ ④直角方向、タイプⅡ

算出した余裕度を既設損傷の許容範囲と考え、補強前の既設構造物の劣化損傷や補強後の損傷の進行に対する維持管理の目安とした。対象はモノレールで最も多い、曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法で耐震補強された RC 橋脚である。その他、考慮するリスク因子として、地盤種別、路線重要度、下部工形式などを考えた。

2.1 耐力の余裕度

耐震補強前後の作用地震荷重と抵抗強度（水平保有耐力）の比を耐力の余裕度として表す。

$$\alpha_s = \frac{P_a}{k_{hc} \cdot W} \quad \dots \dots (1)$$

P_a ：水平保有耐力 $k_{hc} \cdot W$ ：作用地震荷重

2.2 変位の余裕度

また、耐震補強後の許容残留変位と残留変位の比を、変位の余裕度として表す。

$$\delta_s = \frac{\delta_{ra}}{\delta_r} \quad \dots \dots (2)$$

δ_r ：残留変位 (mm) δ_{ra} ：許容残留変位 (mm)

3. 数値解析結果とその考察

橋軸および橋軸直角方向に耐力と変位を検討した偏心構造のモノレール橋脚が多く、橋軸直角方向で耐震補強規模（補強鋼板厚等）が決まる傾向にある。ここでは、タイプⅠ・Ⅱ地震動の橋軸直角方向における耐力と変位の余裕度を図-3.1～3.3に示して考察する。

3.1 解析結果とその考察

既設 RC 橋脚の経年劣化を考えると、余裕度という概念は非常に重要である。耐力に関して、図-3.1と図-3.2より、タイプⅠは平均で1.28程度、タイプⅡは平均で1.06程度の余裕度がある。当該橋脚の多くがタイプⅡで決まることが分かる。数値解析結果から、タイプⅠよりもタイプⅡの平均余裕度が小さいのは、タイプⅡのほうが地震時慣性力が大きいいため、平均余裕度が小さくなることが式(2)から分かる。また、当該地域がタイプⅡで決まるため、タイプⅠは平均余裕度が大きい。

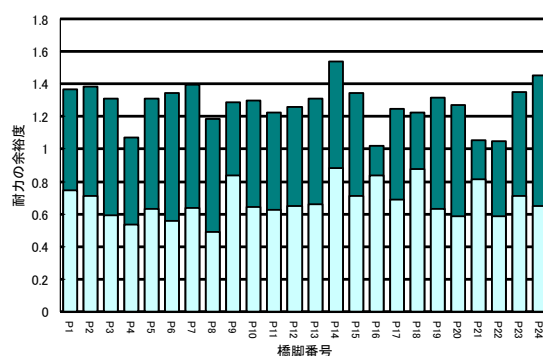


図-3.1 耐震補強前後の耐力の余裕度（タイプⅠ）

キーワード 地震時保有水平耐力 許容変位 余裕度 地震リスク モノレール

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 関西大学 構造システム研究室 TEL06-6368-1121

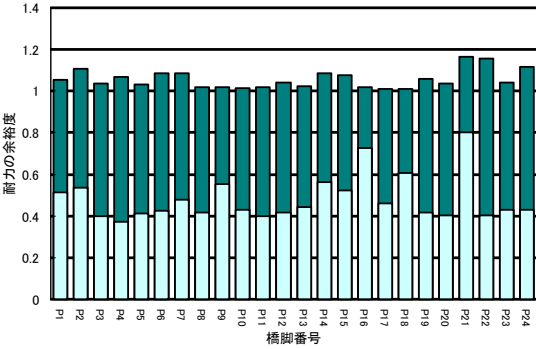


図 - 3.2 耐震補強前後の耐力の余裕度(タイプⅡ)

変位に関して、図 - 3.3 から明らかなように、タイプⅡに対して、平均 1.38 程度の十分な余裕があるものの、橋脚によってばらつきが大きい。また、タイプⅠに対して、耐力と同様、当該地域がタイプⅡによって決まるため、非常に余裕度が大きいタイプⅠは考慮しない。数値解析結果から明らかなように、耐力の平均余裕度に比べて変位の余裕度が大きいのは、モノレールの荷重規定が道路橋と異なっており、かつ上部構造に鉄道が走ることから、極めて厳しい変位制限が設けられている。それゆえ、変位に対して、余裕度の大きい設計がなされているためである。

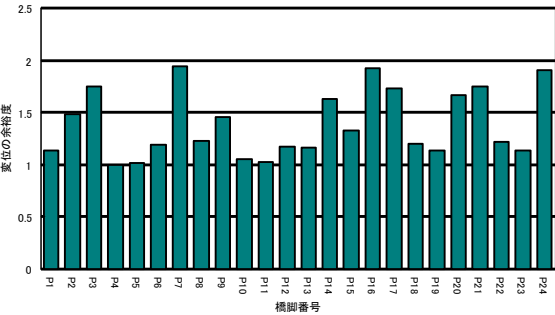


図 - 3.3 耐震補強後の変位の余裕度(タイプⅡ)

3.2 リスク評価の一例

耐力において、表 - 3.1 によってモノレールのリスク評価を行う。

評価するにあたって、リスクに対する条件が適しているものには、3.1 で求めた個々の橋脚の余裕度に 1.1 を乗じ、条件の適していないものには 0.9 を乗じる。兵庫県南部地震のようなタイプⅡ地震動は、地盤が固くなるにつれ、被害が増大することから地盤種別Ⅰとの組み合わせは最もリスクが生じる組み合わせであるので、0.9 を乗じることとした。その結果、表 -

3.2 を得た。上述したように、当該地域がタイプⅡで決まるため、タイプⅠは考慮しない。

表 - 3.1 要素における評価基準

要素	条件	ポイント
耐力の余裕度	平均値以上	1.1
	平均値以下	0.9
路線重要度(利用人数)	少ない	1.1
	多い	0.9
下部工形式	偏心構造以外	1.1
	偏心構造	0.9
タイプⅡと地盤種別Ⅰの組み合わせ		0.9
総合評価	総合評価の平均値以上	○
	総合評価の平均値以下	×

表 - 3.2 タイプⅡにおける総合評価一覧表

タイプⅡ	橋脚番号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
耐力	基準の平均値からの差	-0.01	0.05	-0.02	0.011179	-0.02635	0.026508	0.029956	-0.03938
	判定	NG	OK	NG	OK	NG	OK	OK	NG
要素	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	小	小	小	小	小	小	小	小
	下部工形式	半造形型	造形型	T型	半造形型	造形型	造形型	造形型	造形型
	総合評価	0.94	1.2	1.13	1.16	0.92	1.18	1.18	0.91
タイプⅡ	橋脚番号	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
	基準の平均値からの差	-0.03905	-0.04105	-0.03666	-0.01591	-0.0318	0.027151	0.019684	-0.03971
要素	判定	NG	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅰ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	造形型	造形型	造形型	造形型	造形型	造形型	半造形型	半造形型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
	基準の平均値からの差	-0.04768	-0.04655	-0.00069	-0.02	0.11	0.1	-0.02	0.06
要素	判定	NG	NG	NG	NG	OK	OK	NG	OK
	地盤種別	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
	路線重要度	大	大	大	大	大	大	大	大
	下部工形式	半造形型	半造形型	T型	T型	T型	T型	T型	T型
タイプⅡ	橋脚番号	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24