2022年度 土木学会関西支部技術賞候補発表会

大阪モノレールの
地震時における地震被災度推定システムの開発

大阪モノレール株式会社

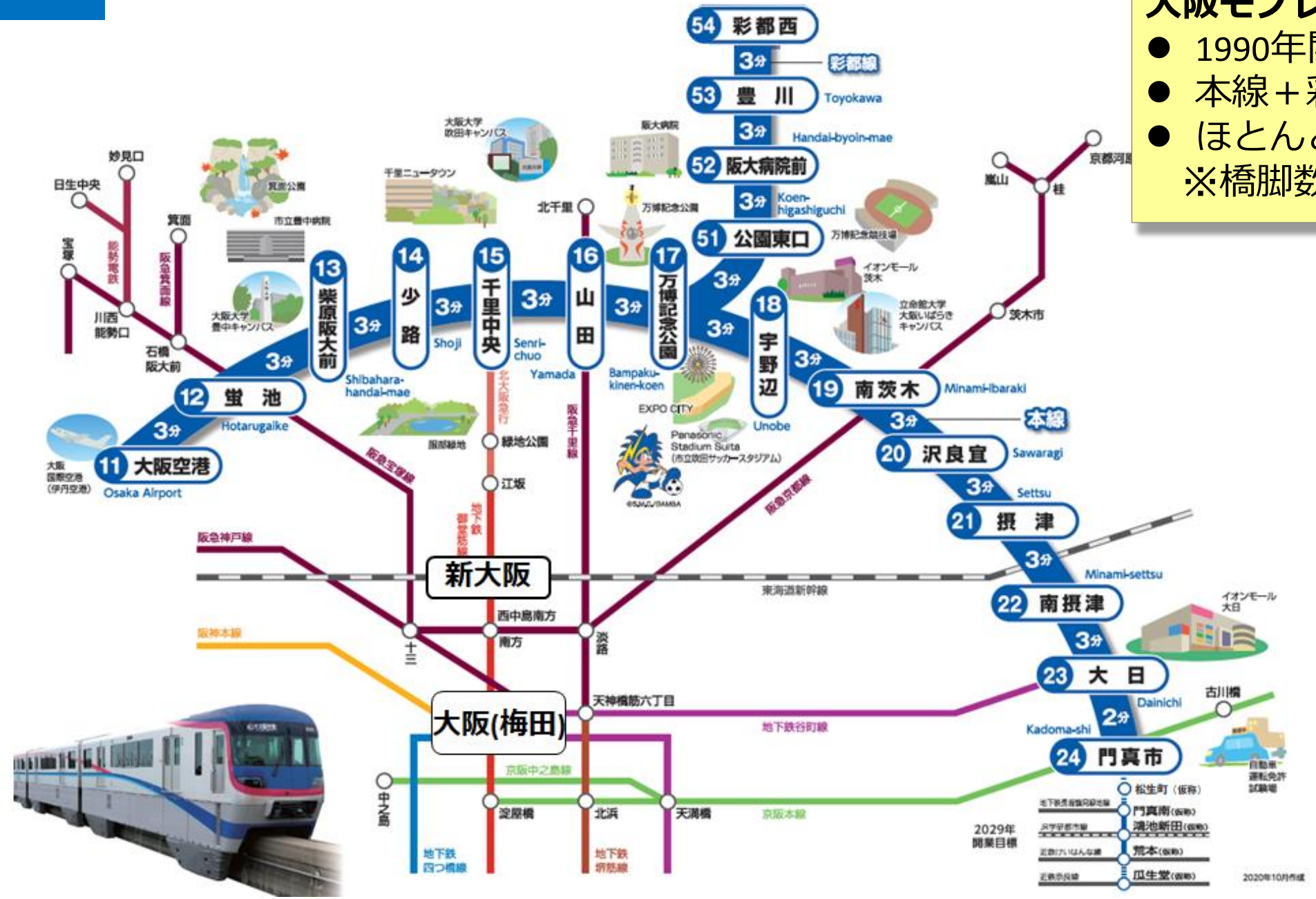
CTi 未来につづく 安全・安心を

建設技術研究所 大阪本社

1 はじめに －大阪モノレールについて－

大阪モノレール

- 1990年開業の跨座式モノレール
- 本線＋彩都線の総延長28km
- ほとんどの区間が高架部
  ※橋脚数約1200基、耐震補強済



2 地震被災度推定システム開発の経緯（１／２）

2018年6月18日
大阪府北部地震発生

大阪ノレール沿線で
震度６弱を観測

発災直後	全列車を緊急停止
1時間後	乗客の避難完了
6日後	全線運行再開
12日後	平常ダイヤでの運行再開

ほぼ全区間において
都市の上空を高架橋で走行しており地上から直接アクセスできない

乗客の避難

駅まで移動・降車することを基本

施設の点検

工作車を用いて行う

全線運行再開までに時間を要した

2 地震被災度推定システム開発の経緯（２／２）

工作車を用いた施設点検

「工作車」は、「車両」と同じ1本の軌道上を通る

「点検」～「車両回送」の一連の流れに
必然的に時間が掛かる

全区間一律・同レベルの点検ではなく、
点検の重点化・優先順位の設定を行う

作業効率向上　⇒　早期運行再開

早期に地震被災度を把握できる「地震被災度推定システム」を開発

3 地震被災度推定システムの目的と対応

目　的	対　応
工学的指標による 被害状況把握と列車移動判断・点検計画策定を支援するシステムの開発	大阪北部を震源とする地震の教訓を踏まえ， ・システムに要求する性能の整理・設定 ・要求性能を満たすシステムの構成（速報・詳報） 【新しい技術】【成し遂げた技術】【喜ばれる技術】

設定した要求性能を満たす地震被災度推定システムのあり方

①被害の概略把握	即時性の確保　～速報システム～　【新しい技術】 作用と抵抗の指標で被災度評価　【使える技術】
②-1列車の移動判断 ②-2効率的な点検計画の策定	推定精度の確保　～詳報システム～ 非線形動的解析による被災度評価【新しい技術】 地震波形の作成，モデル化方法　【使える技術】

4 要求性能の設定とシステム構成

（1）新しい技術（②独自性）

大阪北部を震源とする地震の教訓を踏まえて、**地震被災度システムに求める要求性能**を以下のとおり設定

項目	①被害の概略把握	②-1 列車の移動判断の支援（乗客員の安全確保） ②-2 点検の重点化の支援（点検の効率化）
要求性能	構造物の損傷程度の概略の把握が可能なレベル	より高い推定精度による橋脚・支承・モノレール車両の損傷程度の推定が可能なレベル

地震発生後可能な限り早期に把握

早期の乗客員の避難、点検初動体制の構築に活用

速報と詳報の2段階の地震被災度推定システムを開発する**基本方針を策定**

速報システムの開発

詳報システムの開発

4 要求性能の設定とシステム構成

（1）新しい技術（②独自性）

要求性能を満たすために
速報と**詳報**の2つの主軸
で構成する方針

速報：**即時性**重視
地震強度で評価
＜5分以内を実現＞

詳報：**推定精度**重視
動的解析で評価
＜30分以内を実現＞

地震発生

全列車緊急停止

地震計で観測された地震波を取得

速報

観測点のＳＩ値を算出

クリギング法から各橋脚位置の作用地震強度SI_S値を算出

各橋脚の抵抗地震強度SI_R値と比較し損傷程度を推定

特徴
- 即時性 ◎（5分以内）
- 精度 ○
- 対象：橋脚

○初動判断を支援
・損傷程度や場所の概略把握

詳報

橋脚位置の地震波形に変換

各橋脚位置で非線形動的解析により損傷程度を推定

特徴
- 即時性 ○（30分以内）
- 精度 ◎
- 対象：橋脚、支承、車両

○列車の移動判断を支援
・最寄り駅までの移動
（退行可否含む）
○点検の重点化を支援
・点検の優先順位を設定
・被災有無に応じた点検の実施

5 被災度推定方法の新しい取組み

（1）新しい技術（②独自性）

- 要求性能で定めた項目のうち，特に，「列車の移動判断の支援（乗客員の安全確保）」を満たすためには，緊急停止した車両の前進・後退を含む工学的な推定結果を踏まえた移動判断が必要
- 速報・詳報ともに，約1,000基ある橋脚に対して1基ごとの被災度を推定

区間	支柱番号	橋梁名		支柱諸元			活荷重	地震被災度推定結果						
								支柱(横軸方向/直角方向)				支承(直角方向)		
								応答変位(※残留変位照査)				せん断/引張照査		
		起点	終点	支柱種別	支柱形式	支柱高(m)		応答変位(mm)	許容変位(mm)	被災度判定※	【参考】終局変位	作用力(kN)	耐力(kN)	被災度判定
宇野辺～南茨木	P609	B-608	B-609	RC	単柱	10.5	無	64.1	213.7	損傷なし	288.19	273.7	2116.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P610	B-609	B-610	RC	単柱	11.0	無	69.5	213.7	損傷なし	288.19	188.3	2116.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P611	B-610	B-611	RC	単柱	12.0	無	77.8	255.0	損傷なし	337.98	149.7	2116.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P612	B-611	B-612	RC	単柱	13.0	無	78.5	258.2	損傷なし	335.53	165.8	2116.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P613	B-612	B-613									160.5	2116.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P614	B-613	南茨木分岐橋									277.6	641.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P615	南茨木分岐橋	南茨木分岐橋	RC	単柱	10.3	無	60.3	209.4	損傷なし	295.30	2562.8	4319.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P616	南茨木分岐橋	南茨木分岐橋	RC	単柱	10.5	無	67.2	237.3	損傷なし	327.74	1044.6	641.0	被災あり
宇野辺～南茨木	P617	南茨木分岐橋	B-617	RC	単柱	11.2	無	77.4	237.4	損傷なし	320.08	255.1	641.0	損傷なし
宇野辺～南茨木	P618	B-617	B-618	RC	単柱	16.3	無	74.8	332.1	損傷なし	438.32	363.3	2116.0	損傷なし
南茨木～沢良宜	P625	B-624	京都線跨線橋	RC	単柱	13.3	有	127.5	288.2	損傷なし	379.39	2239.3	2116	被災あり
南茨木～沢良宜	P626	京都線跨線橋	B-626	RC	単柱	13.6	有							損傷なし
南茨木～沢良宜	P627	B-626	B-627	Mt	単柱	15.0	有							損傷なし
南茨木～沢良宜	P628	B-627	沢良宜橋	Mt	単柱	14.5	有							損傷なし

橋脚一本ごとの解析結果（詳細）を確認

被災ありの橋脚を赤色で表示

6 速報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

速報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

観測点の**ＳＩ値**算出

↓

クリギング法により
各橋脚位置のSI_S値を算出

↓

各橋脚の抵抗SI_R値と比較
し被災程度を推定

特徴

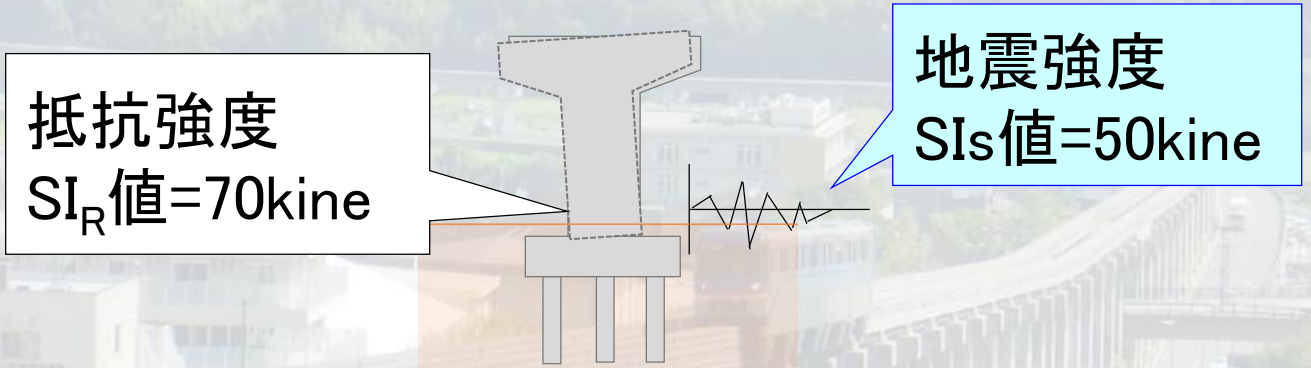
- **即時性 ◎(5分以内)**
- **精度 ○**
- **対象：橋脚**

初動判断を支援

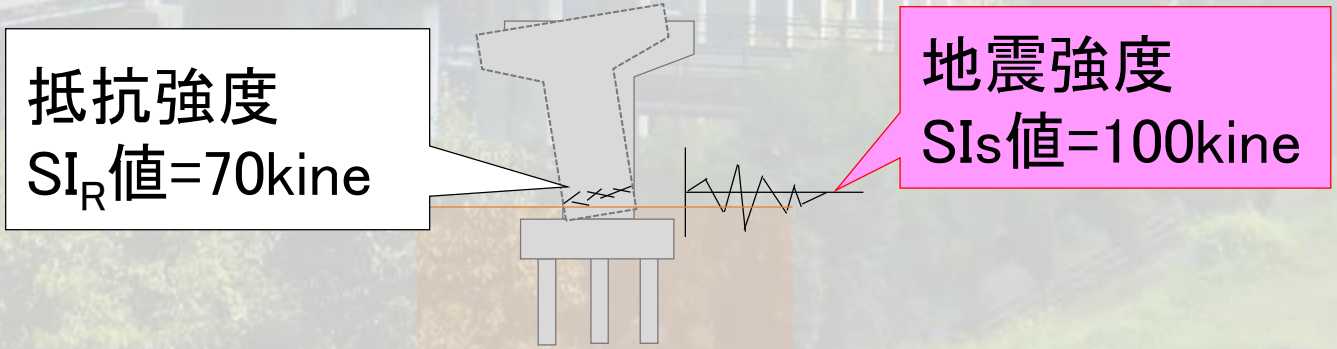
・損傷程度や範囲の概略把握

速報の概要 橋脚位置に作用する地震強度（SI_S値）と，予め設定した橋脚の抵抗強度（SI_R値）の大小関係から**橋脚の被災度を推定**

被災していない場合の概念図



被災している場合の概念図



6 速報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

速報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

観測点の**ＳＩ値**算出

↓

クリギング法により
各橋脚位置のSI_S値を算出

↓

各橋脚の抵抗SI_R値と比較
し被災程度を推定

特徴

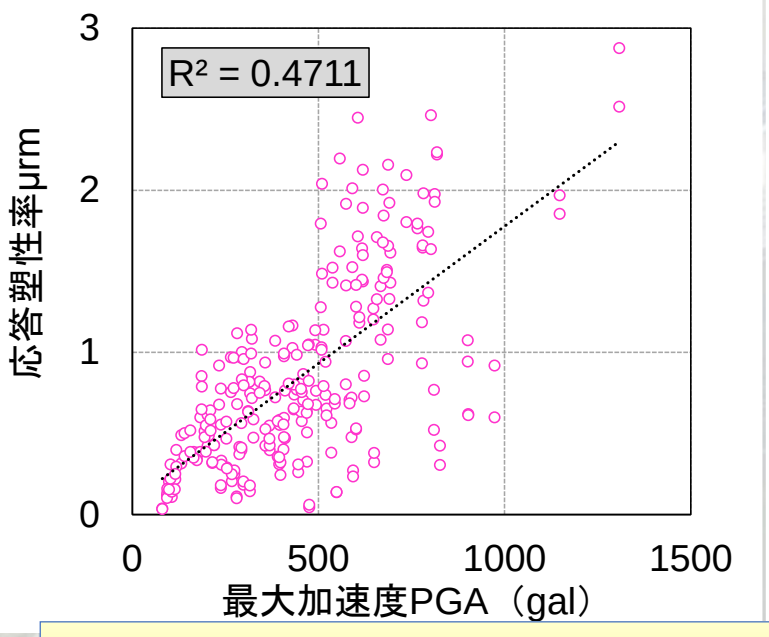
- **即時性 ◎(5分以内)**
- **精度 ○**
- **対象：橋脚**

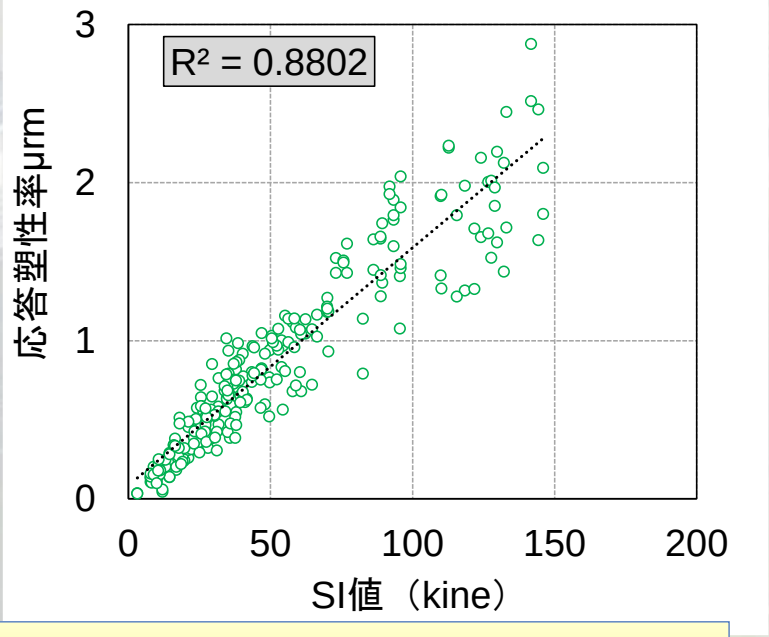
初動判断を支援

・損傷程度や範囲の概略把握

◆地震強度として最大加速度，SI値等がある
橋脚損傷との相関がよい地震強度指標は？

◆国内外の108波を収集、所要降伏震度スペクトルを作成し，波形毎に平均応答塑性率 μrm を算出





SI値の相関性が最も高いSI値を採用

6 速報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

速報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

観測点の**ＳＩ値**算出

↓

クリギング法により
各橋脚位置のSI_S値を算出

↓

各橋脚の抵抗SI_R値と比較
し被災程度を推定

特徴

- **即時性 ◎(5分以内)**
- **精度 ○**
- **対象：橋脚**

初動判断を支援

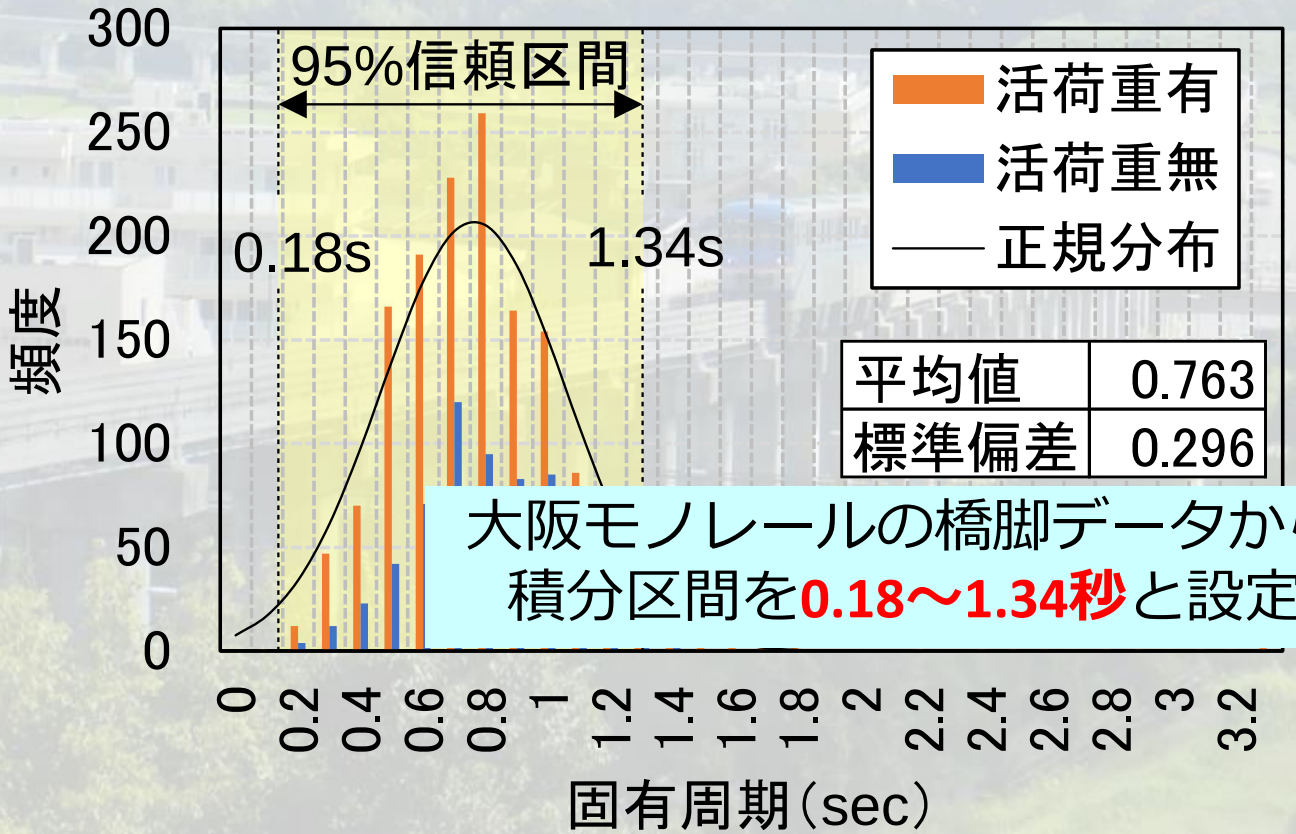
・損傷程度や範囲の概略把握

◆SI値の積分周期帯は，保有する橋脚の固有周期の分布から独自に設定

$$SI = \frac{1}{2.4}\int_{0.1}^{2.5} SV\,dT \quad (h = 0.2)$$

1.16⇒ 2.4　0.1 ⇒0.18　2.5 ⇒1.34

SV：速度応答スペクトル、T：固有周期、h：減衰定数



大阪モノレールの橋脚データから
積分区間を**0.18～1.34秒**と設定

6 速報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

速報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

観測点の**ＳＩ値**算出

↓

クリギング法により
各橋脚位置のSI_S値を算出

↓

各橋脚の抵抗SI_R値と比較し被災程度を推定

特徴

- **即時性 ◎(5分以内)**
- **精度 ○**
- **対象：橋脚**

初動判断を支援

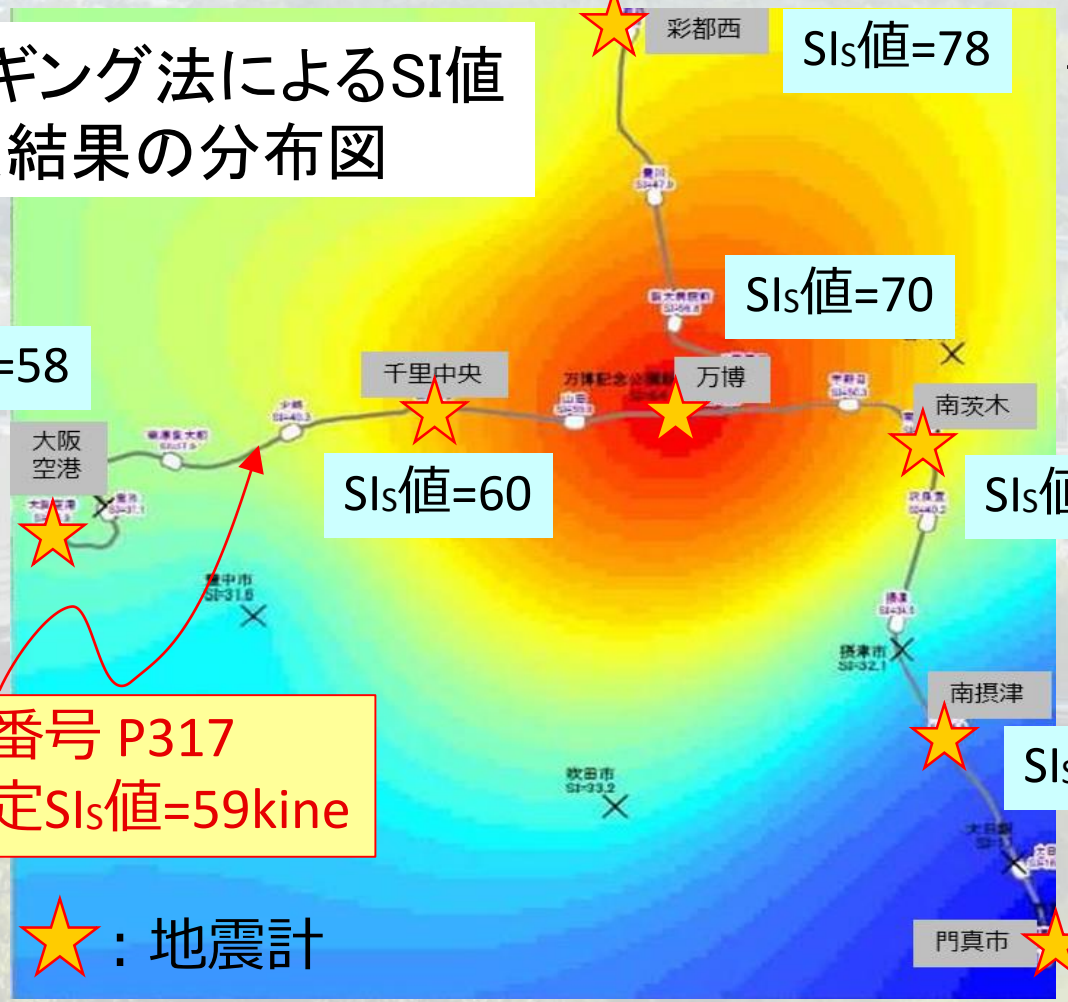
・損傷程度や範囲の概略把握

■橋脚位置に作用する地震強度SI_S値の評価

大阪モノレールが保有する地震計(7箇所)のSI値を算出し，クリギング法で推定

クリギング法によるSI値推定結果の分布図

単位:kine



橋脚番号 P317
⇒推定SIs値=59kine

6 速報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

速報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

観測点の**ＳＩ値**算出

↓

クリギング法により
各橋脚位置のSIS値を算出

↓

各橋脚の抵抗SI_R値と比較し被災程度を推定

特徴

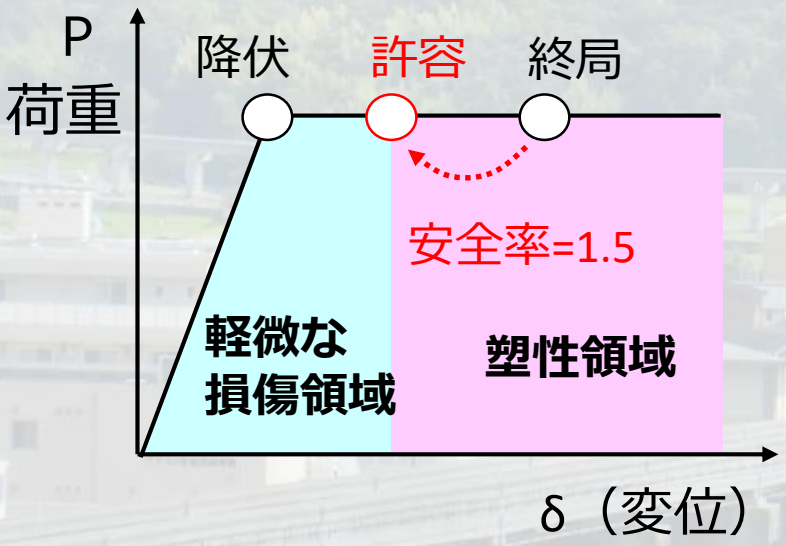
- **即時性 ◎(5分以内)**
- **精度 ○**
- **対象：橋脚**

初動判断を支援

・損傷程度や範囲の概略把握

■橋脚が抵抗できる地震強度SI_R値の評価

許容変位に到達する時の地震波のSI値で，
レベル2地震6波の平均値と設定



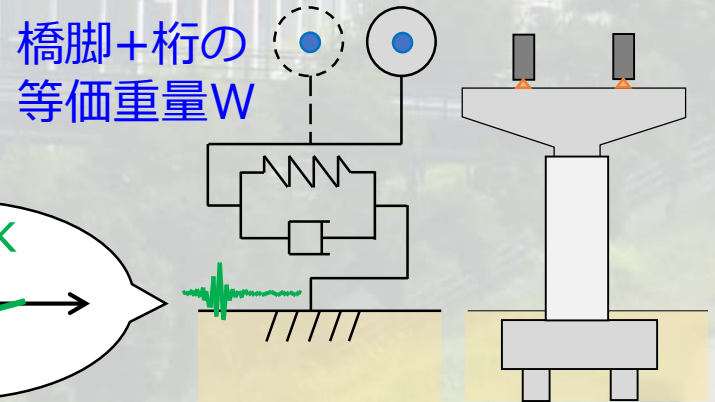
地震波形ｋに任意倍率αをかけて入力

↓

許容変位に到達する際の地震波のSI値を算出

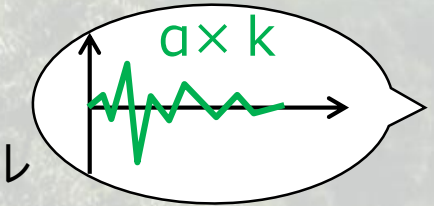
↓

全6波の許容変位に到達するSI値の平均をSIR値



モデルの概要

・1質点系
・完全バイリニア型
・剛性比例型減衰モデル



7 詳報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

詳報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

橋脚位置の地震波形に変換

↓

各橋脚位置で非線形動的解析により損傷程度を推定

特徴
- 即時性 ○(30分以内)
- 精度 ◎
- 対象：橋脚、支承、車両

○列車の移動判断を支援
・最寄り駅までの移動
(退行可否含む)

○点検の重点化を支援
・点検の優先順位を設定
・被災有無に応じた点検の実施

詳報の概要 橋脚とモノレールで構成するモデルの**非線形動的解析**より、**橋脚・支承・モノレール車両台車枠の被災度を推定**

ただし、全橋脚に対して非線形動的解析を行うには、3つの課題を解決する必要がある

解決すべき技術的課題

✔① 観測地点と橋脚位置の地盤による影響
✔② 震央からの距離減衰による影響
✔③ モノレール車両の振動性状の把握

7 詳報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

詳報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

橋脚位置の地震波形に変換

↓

各橋脚位置で非線形動的解析により損傷程度を推定

特徴

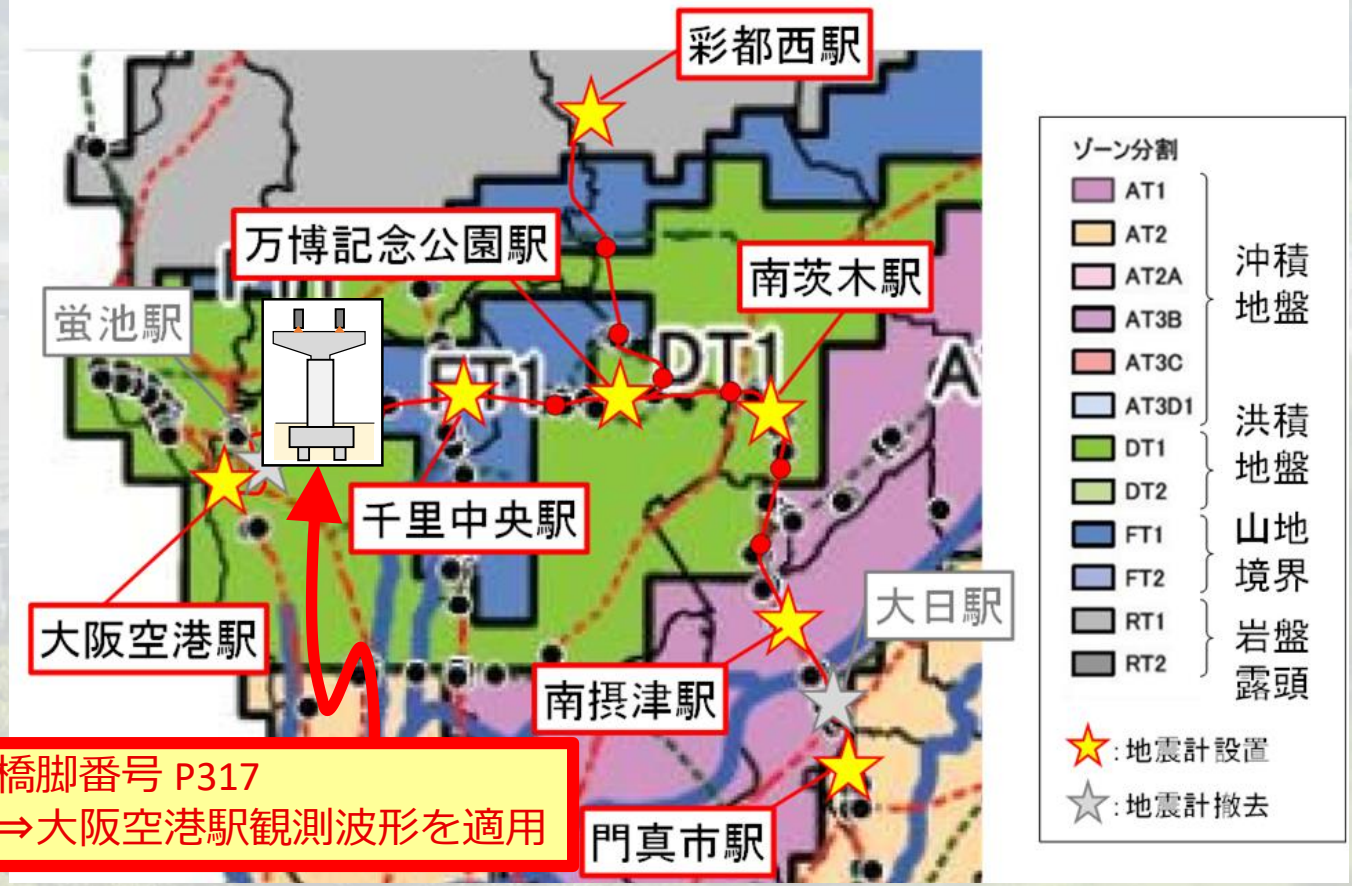
- 即時性 ○(30分以内)
- 精度 ◎
- 対象：橋脚、支承、車両

○列車の移動判断を支援
・最寄り駅までの移動
(退行可否含む)

○点検の重点化を支援
・点検の優先順位を設定
・被災有無に応じた点検の実施

①観測地点と橋脚位置の地盤による影響

同地盤区分に属する橋脚に、同地盤区分上で観測された地震波を用いる



橋脚番号 P317
⇒大阪空港駅観測波形を適用

7 詳報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

詳報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

橋脚位置の地震波形に変換

↓

各橋脚位置で非線形動的解析により損傷程度を推定

特徴

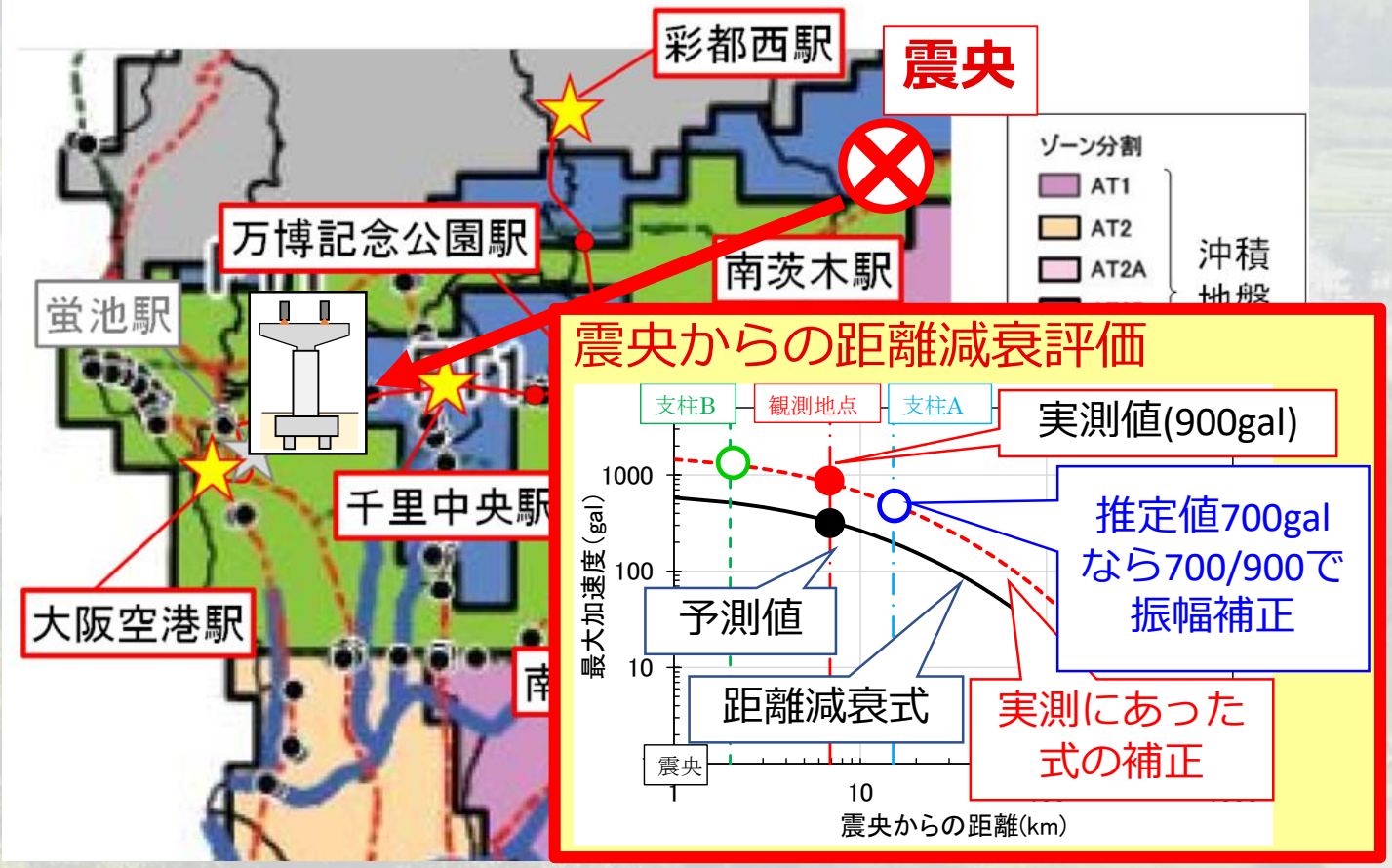
- 即時性 ○(30分以内)
- 精度 ◎
- 対象：橋脚、支承、車両

○列車の移動判断を支援
- 最寄り駅までの移動(退行可否含む)

○点検の重点化を支援
- 点検の優先順位を設定
- 被災有無に応じた点検の実施

② 震央からの距離減衰による影響

震央の位置情報を取得し，観測地点～橋脚位置の関係から、距離減衰式にて振幅調整



7 詳報システムについて

(2)使える技術(①汎用性)

詳報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

橋脚位置の地震波形に変換

↓

各橋脚位置で非線形動的解析により損傷程度を推定

特徴

- 即時性 ○(30分以内)
- 精度 ◎
- 対象：橋脚、支承、車両

○列車の移動判断を支援
・最寄り駅までの移動
(退行可否含む)

○点検の重点化を支援
・点検の優先順位を設定
・被災有無に応じた点検の実施

② 震央からの距離減衰による影響

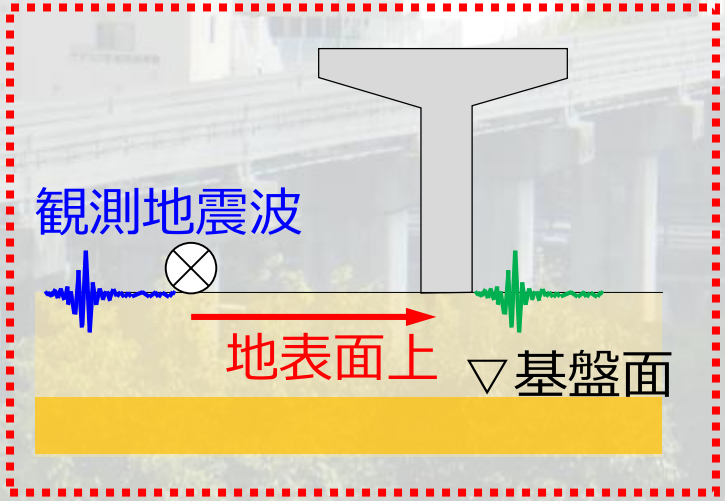
距離減衰方法として,「工学的基盤面上」と「地表面上」が考えられる

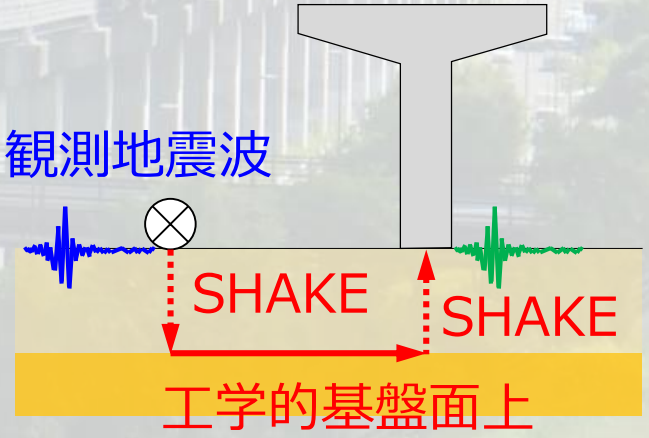
既往記録を用いた検討(SHAKE)

地震計を5km以内に配置し「地表面上」を採用

採用

⊗：地震計





7 詳報システムについて

（1）新しい技術（②独自性）

詳報システムの評価フロー

地震計で**観測された地震波**を取得

↓

橋脚位置の地震波形に変換

↓

各橋脚位置で非線形動的解析により損傷程度を推定

特徴

- 即時性 ○（30分以内）
- 精度 ◎
- 対象：橋脚、支承、車両

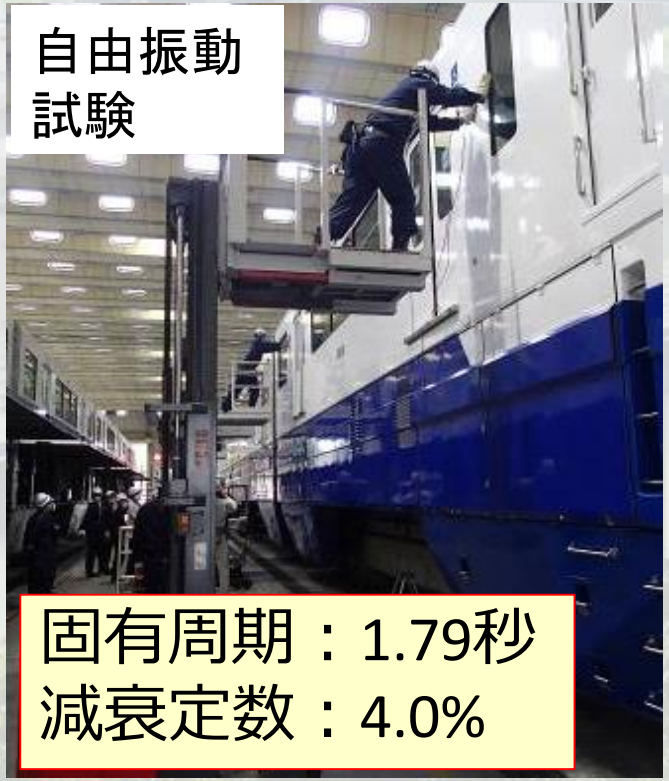
○列車の移動判断を支援
・最寄り駅までの移動（退行可否含む）

○点検の重点化を支援
・点検の優先順位を設定
・被災有無に応じた点検の実施

③モノレール車両の振動性状の把握

モノレール車両を人為的に押す自由振動試験

「減衰定数」「車両ばね定数」「モデル」を検討



固有周期：1.79秒
減衰定数：4.0%

検討より、車両の被災度評価に3質点系モデルを採用

支柱・支承の被災度評価
1質点系

車両の被災度評価
3質点系

8 システムの構築と運用

橋脚番号・橋脚諸元・被災度推定結果など

地震被災度推定システム

推定結果Excel出力

震源地: 大阪府北部　震源の深さ: 約10km　地震の規模: M5.9

システム速報　システム詳報

支柱被災本数 1 本

被災あり

被災時の車両位置情報を登録し
活荷重有りの判定結果を表示

被災している可能性が高い支柱は
ハッチングと被災ありの表示

区間	支柱番号	橋梁名		支柱諸元			車両位置	地震被災度推定結果						
								システム速報				システム詳報		
		起点	終点	支柱種別	支柱形式	支柱高(m)	活荷重	抵抗地震強度 SI_R値	作用地震強度 SI_S値	支柱の被災度判定	(参考)終局時SI値	支承	支柱	車両
宇野辺～南茨木	P586	B-585	B-586	RC	単柱	16.0	無	107.8	60	損傷なし	131.2			
						15.5	無	107.8	61	損傷なし	131.2			
						8.0	無	95.9	62	損傷なし	116.2			
						8.0	無	95.9	62	損傷なし	116.2			
						8.0	有	95.9	63	損傷なし	116.2			
						9.0	有	100.2	64	損傷なし	127.9			
宇野辺～南茨木	P602	B-601	B-602	RC	単柱	9.0	有	100.2	64	損傷なし	127.9			
	P603	B-602	B-603	RC	単柱	9.5	有	83.7	65	損傷なし	93.5			
	P604	B-603	B-604	RC	単柱	9.5	有	83.7	65	損傷なし	93.5			
	P605	B-604	B-605	RC	単柱	9.5	有	83.7	66	損傷なし	93.5			
	P606	B-605	B-606	RC	単柱	9.5	有	104.5	66	損傷なし	126.7			
宇野辺～南茨木	P607	B-606	奈良橋	RC	単柱	8.7	有	103.7	66	損傷なし	128.9			
宇野辺～南茨木	P608	奈良橋	B-608	RC	単柱	8.8	有	98.4	67	損傷なし	114.8			
宇野辺～南茨木	P609	B-608	B-609	RC	単柱	10.5	無	101.1	67	損傷なし	129.2			
宇野辺～南茨木	P610	B-609	B-610	RC	単柱	11.0	無	101.1	68	損傷なし	129.2			
宇野辺～南茨木	P611	B-610	B-611	RC	単柱	12.0	無	105.7	68	損傷なし	136			
宇野辺～南茨木	P612	B-611	B-612	RC	単柱	13.0	無	112	69	損傷なし	134			
宇野辺～南茨木	P613	B-612	B-613	RC	単柱	13.5	無	112	69	損傷なし	134			
宇野辺～南茨木	P614	B-613	南茨木分岐橋	RC	単柱	10.3	無	77.4	69	損傷なし	88			
宇野辺～南茨木	P615	南茨木分岐橋	南茨木分岐橋	RC	単柱	10.3	無	74	70	損傷なし	81.4			
宇野辺～南茨木	P616	南茨木分岐橋	南茨木分岐橋	RC	単柱	10.5	無	70.4	71	被災あり	81.1			
宇野辺～南茨木	P617	南茨木分岐橋	B-617	RC	単柱	11.2	無	112	71	損傷なし	123			
宇野辺～南茨木	P618	B-617	B-618	RC	単柱	16.3	無	103.3	72	損傷なし	122.5			
南茨木～沢良宜	P625	B-624	京都線跨線橋	RC	単柱	15.6	無	83.8	75	損傷なし	96.5			
南茨木～沢良宜	P626	京都線跨線橋	B-626	RC	単柱	13.6	無	128.5	75	損傷なし	150.8			
南茨木～沢良宜	P627									損傷なし	233.8			
南茨木～沢良宜	P628									損傷なし	228.7			
南茨木～沢良宜	P629									損傷なし	358.5			
南茨木～沢良宜	P629									損傷なし	345.3			
南茨木～沢良宜	P630									損傷なし	124.2			
南茨木～沢良宜	P630	沢良宜橋	沢良宜橋	Mt	門型	13.8	無	123.8	73	損傷なし	162.4			
南茨木～沢良宜	P631	沢良宜橋	B-631	Mt	単柱	13.8	無	287.6	72	損傷なし	345.4			
南茨木～沢良宜	P632	B-631	B-632	Mt	単柱	19.1	無	252.3	71	損傷なし	320.2			
南茨木～沢良宜	P633	B-632	B-633	Mt	単柱	14.7	無	189	71	損傷なし	229.8			

9 地震被災度推定システムの活用

（3）成し遂げた技術（③使命感の程度）
（4）喜ばれる技術（①地域への貢献度）

！震度4以上の地震が発生すると全列車を緊急停止！

- 移動の判断ができるまでの間、乗客員は高所で閉じ込められることになる
- 避難までの時間が長引くほど余震への不安や体調不良者の発生につながるため、できる限り早く･安全に避難させることが管理者の命題
- 年間約5千万人の通勤･通学･観光移動等の交通手段であり、地震発生後には一刻も早い復旧と運行再開が望まれる

地震被災度推定システムの推定結果を
「初動体制の構築」「列車の移動判断」「点検の重点化」に活用

地震災害時の鉄道ネットワークの強化に寄与

地震時における乗客員の安全確保や早期運行再開を実現し
安全で安定した旅客輸送に貢献