

地震時における構造物群の挙動解析

構造物技術研究部 コンクリート構造
副主任研究員 宇野 匡和

1. はじめに

地震時の車両走行安全性に対しては、構造物の横方向の振動変位のみならず、構造物の群としての挙動も重要となる。図1に地震時に生じる変位の概念図を示す。一般に、連続する構造物の形式、高さ、地盤条件は、一様ではなく、異なる振動特性の構造物の境界部には不同変位が生じ、これが軌道変位となり車両の走行安全性に影響を及ぼすこととなる。

連続する構造物群の中で最も大きな比率を占めるのが、図1に示した調整桁で接続される形式のラーメン高架橋である。本研究では、当該構造形式を取り上げその挙動を検討した。

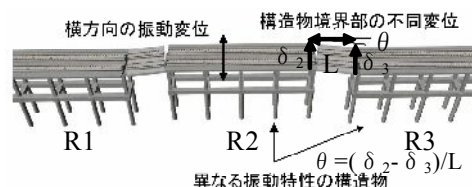


図1 地震時に生じる変位概念図

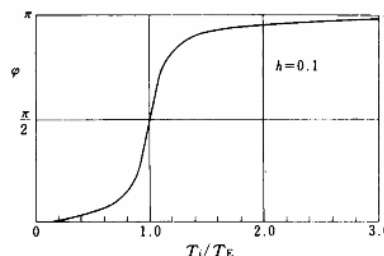


図2 位相角

2. 設計標準における構造物群の挙動評価と課題

鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)(以下設計標準という)における構造物群の挙動評価は、一体とみなせる2~5個程度の振動単位を取り出し、隣接構造物との不同変位を照査するのが一般的である。ラーメン高架橋の場合、構造物群の中から隣り合う2ブロックのラーメン高架橋を取り出し、両者の変位差を求め、角折れと呼ばれる不同変位を算定することとなる。具体的には式(1)により構造物間の位相差を算出し(図2参照)、変位差を求め角折れを算出する。

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{2h_i(T_i/T_E)}{1-(T_i/T_E)^2} \quad \text{ただし、} 0 \leq \phi_i \leq \pi \quad (1)$$

ここに、 T_i は高架橋 R_i の等価固有周期、 T_E は表層地盤の固有周期、 h_i は R_i の減衰定数である。

また式(1)において位相差が少ない場合でも実際には入力や応答のばらつきなどが考えられるため、L1地震時の応答変位の1/2が最低限の応答値として適用されることとなる。これらの応答値を列車速度ごとに設けられた限界値(260km/hでは5/1000rad)と比較して照査が行われる。

上記評価法では調整桁の両端をピン結合と仮定しており、各振動単位の挙動を独立して評価している。しかし、実際には構造物群は調整桁を介して連続しており、その挙動を評価するためには、調整桁の支承条件のモデル化手法を確立することが非常に重要であると考えられる。

3. ストッパー拘束効果による実験検討

3.1 実験概要

構造物の境界部としてラーメン高架橋に多く用いられる鋼棒ストッパーとゴムシューで構成される支承部における拘束効果に着目し実験検討を行った。図3に供試体構造図および载荷図を示す。供試体は、寸法効果の影響を排するため実物大サイズの部分供試体とし、固定側、可動側の計2体を製作

した。

鋼棒ストッパーはφ100を2本配置した。可動側は、さや管とストッパーとの遊間を橋軸方向に片側35mm確保した。表1に載荷ケースを示す。載荷方法は、上部工に対し2本のジャッキの押し引きにてねじり力が生じるように行った。また、1本のジャッキにてストッパーを結ぶ上部工の橋軸直角方向へ載荷した。

3.2 実験結果

図4に各載荷ケースでのストッパー位置での荷重-変位図を示す。固定側(a)では、施工性の観点から設けられる2mmの遊間を超えた後、傾きが急となる。一方可動側(d)では、遊間の35mm間はゴムシューと上部工との摩擦により緩やかに推移し、その後、傾きが急となる。横荷重を載荷した(b),(e)では、ともに横荷重なしの場合と比べ荷重変位曲線の履歴ループが膨らむ傾向にあった。これは、ストッパーが横荷重により上部工と接触し抵抗が増えたためと考えられる。

(c),(f)では、橋軸直角方向に単調載荷しストッパー1本当たりの荷重-変位曲線を推定した。図中には計算上求まる鋼棒ストッパーの曲げ降伏及び最大耐力を併せて示した。なお(c)においては、最大の491kNの時点で反力体が不安定となったため載荷を終了した。いずれも計算上の曲げ降伏耐力を超えた後に変位が増大していることが分かる。写真1に載荷終了後の鋼棒ストッパーの状況を示す。上下部工間に生じた曲げモーメントにより基部が大きく変形していることが分かる。

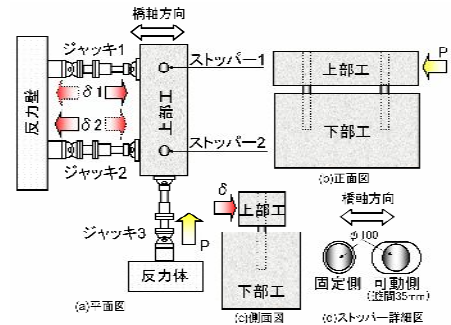


図3 供試体構造図および載荷図

表1 載荷ケース

	ケース	変位	横荷重
固定側	case1	±5mm	-
	case2	±5mm	500kN
	case3	-	P
可動側	case4	±35mm	-
	case5	±50mm	500kN
	case6	-	P

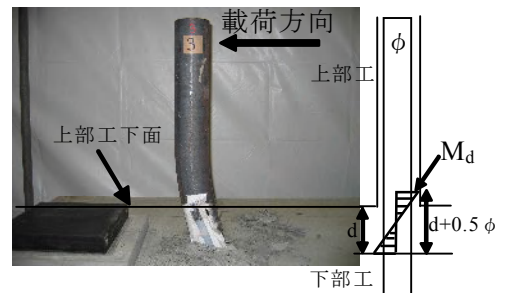
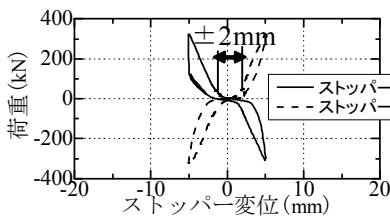
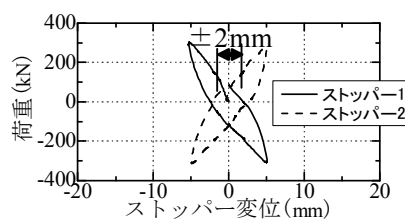


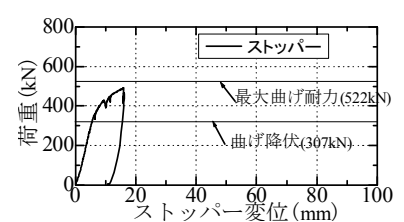
写真1 鋼棒ストッパー



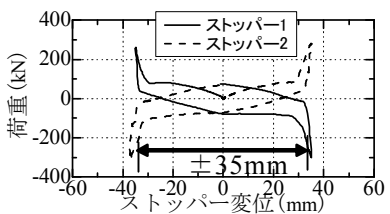
(a) case1: 固定側



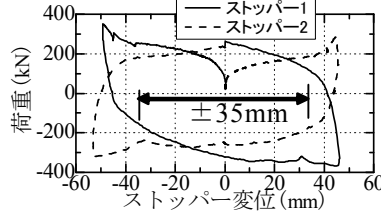
(b) case2: 固定側



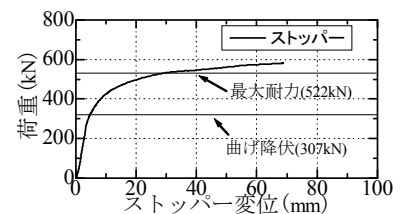
(c) case3: 固定側



(d) case4: 可動側



(e) case5: 可動側



(f) case6: 可動側(載荷方向には固定)

図4 ストッパーの荷重-変位図

4. 構造物群の時刻歴応答解析

4.1 解析概要

調整桁式ラーメン高架橋を対象として、応答解析を行い構造物群の挙動を評価した。図5に対象構造物を示す。解析は三次元フレームモデルで実施し、各部材、地盤の非線形性を考慮した。ただし各非線形性は線路方向及び線路直角方向の特性を合成して三次元特性を表現する手法とした。

表2に調整桁支承の拘束条件を示す。図6に詳細モデルにおけるバネのモデル化の略図を示す。ストッパーバネの骨格線は、詳細1では横荷重無しの場合の実験結果に基づき算出した。支承A・Cは固定側、支承B・Dは可動側とした。詳細モデル1の可動側は線路方向にはストッパーとさや管との遊間35mmを考慮したスリップ型の履歴モデルとした。詳細モデル2の可動側は、詳細モデル1に、上部工との接触の影響を考慮する標準バイリニア型バネを追加したモデルとした。比較のためピン-ピン、固定-ピンについても検討を行った。入力地震動はG3地盤(普通地盤)のL1地震動及びL2地震動スペクトルIIを使用した。

4.2 解析結果

図7に詳細モデル1,2における支承A,Bストッパーバネの線路方向における荷重変位図を示す。図中にはストッパーバネの骨格線を併せて示した。詳細1の可動側である(b)ではストッパーが遊間内で挙動していることが分かる。また(d)では、遊間内の挙動に収まるものの、上部工との接触力が生じていることが分かる。

図8にL1地震動におけるR2高架橋、L2列のC1柱、C4柱上部節点における線路直角方向の時刻歴応答変位を示す。この結果より、詳細1,2は、固定-ピンよりもむしろピン-ピンに近い挙動であることが分かる。詳細1と固定-ピンの最大応答変位は、それぞれC1列で52.1mm, 46.3mm, C4列で54.8mm, 65.0mmとなっている。

図9にL1地震動の支承部におけるラーメン高架橋と調整桁との角折れを示す。固定-ピンでは、固定側の支承Cで角折れは生じておらず、支承Dでも他のモデルと比較して0.0011radと角折れが小さいことが分かる。詳細モデル1と詳細2の最大角折れは0.0044radと0.0039radと僅かであり、一方はピン-ピンでは0.0060radと詳細1の1.4倍程度生じている。

表3に応答値をまとめて示す。表中には、設計標準に従い式(1)の位相角を用いて求めた角折れ、構造物の応答変位 δ を1/2倍して求めた角折れを併せて示した。式(1)による位相差を用いた手法は詳細1に対してはやや危険側の評価となっているが詳細2は包絡していることが分かる。また、詳細1, 2及びピン-ピンによる解析結果は、 $\delta/2$ の規定により包絡されていることが分かる。今後、設計において照査結果が厳しい場合には、本研究のように構造物群全体をモデル化して、適切な地震動入力を行うことにより応答値を低減できると考える。また、構造物上の車両走行性を簡易な構造物モデルに置換して検討していく場合には、調整桁の両端に集約バネを設けるか、ピン結合とすることにより安全側に評価が行えると考えられる。

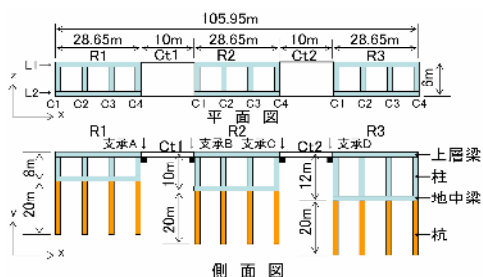


図5 解析対象構造物

表2 調整桁支承の拘束条件

モデル名	回転条件	
	支承 A, C	支承 B, D
詳細1	実験結果	
詳細2	実験結果(横荷重あり)	
ピン-ピン	ピン	ピン
固定-ピン	固定	ピン

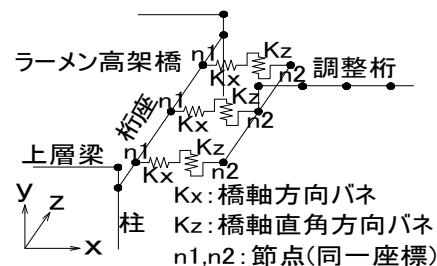


図6 ストッパーのモデル化

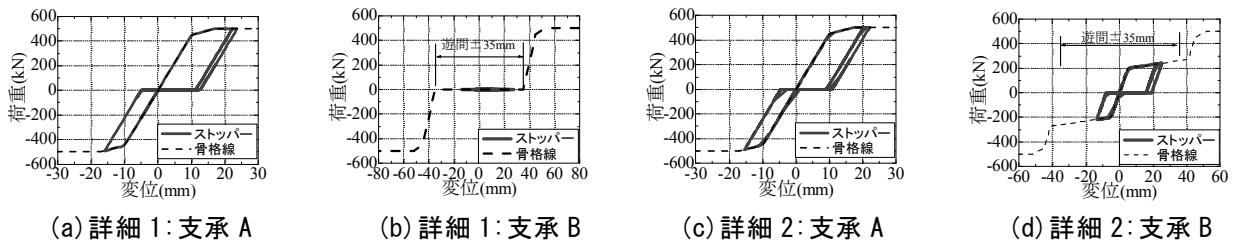


図7 ストッパーの荷重-変位 (L2地震動)

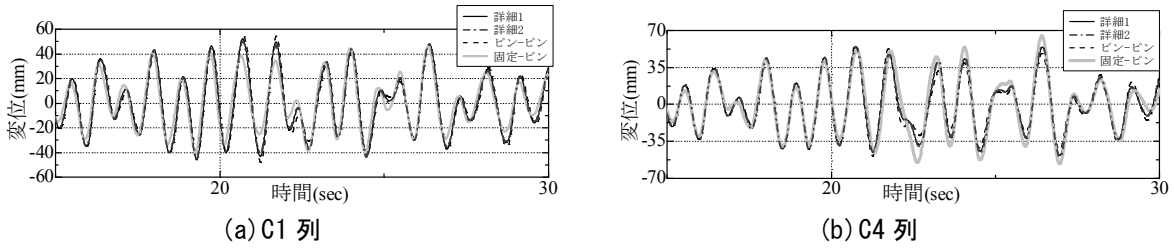


図8 時刻歴応答変位 (L1地震動: R2高架橋, L2列)

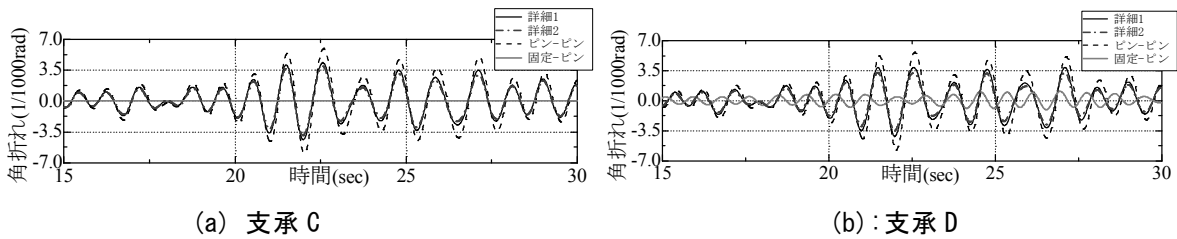


図9 支承部の角折れ (L1地震動)

表3 角折れの応答値 (1/1000rad) (限界値: 260km/hでは5/1000rad)

	設計値		解析値			
	式(1)	$\delta/2$	詳細1	詳細2	ピン-ピン	固定-ピン
支承A	2.8	4.6	2.3	2.0	3.3	-
支承B	2.8	4.6	2.4	2.0	3.3	1.2
支承C	4.0	6.8	4.4	3.9	6.0	-
支承D	4.0	6.8	4.2	3.5	5.8	1.1

5. まとめ

代表的な構造物群である調整桁式ラーメン高架橋を取り上げ、構造物の境界部における接続方法について実験及び数値解析により検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験により、鋼棒ストッパーの荷重-変位曲線のモデル化法を示した。可動側で横荷重を受ける場合の荷重変位曲線への影響について明らかにした。
- (2) 三次元数値解析により、鋼棒ストッパーの拘束力の影響を考慮した場合の挙動は、ピン-ピンとした場合に近いことを示した。
- (3) 設計標準による照査結果が厳しい場合には、本研究のように構造物群全体をモデル化し適切な地震動入力を行うことにより、照査結果を若干緩和できると考えられる。

今後は、桁の橋脚構造についても同様の検討を進めるとともに、入力地震動に位相差を設けるなどして研究内容の深度化を図っていく予定である。