

鉄道 RC 高架橋相互の線路直角方向の衝突現象の評価

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○徳永 宗正 渡辺 勉 中田 裕樹 曾我部 正道

1. 目的 鉄道分野では、複数路線を有する駅部においては、駅部ホームや前後の高架橋が線路直角方向に近接して配置される場合がある。また、駅部の改良工事や高架化事業等のために既設の高架橋に隣接して、新設の高架橋を別途配置する例も多く報告されている。このような近接した高架橋間の遊間は一般的に 10~300mm 程度であることから、線路直角方向の地震時挙動を考えた場合、L1 地震時でも高架橋応答の位相差によっては、高架橋の張出スラブが相互に衝突し、上部工に損傷が発生する可能性や、構造物全体系の応答変位が増幅する可能性もある。本論文では高架橋相互の衝突を考慮した高架橋の地震時応答の評価を目的として、一般的な鉄道ラーメン高架橋を対象に詳細な数値解析により、高架橋の上部工相互の衝突による上部工の損傷および接触剛性の評価を行った。

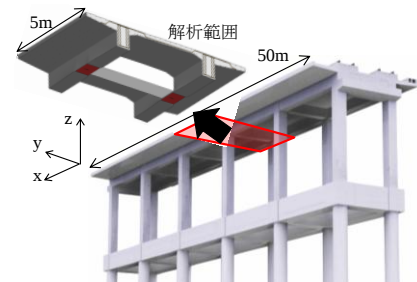


図-1 対象高架橋概念

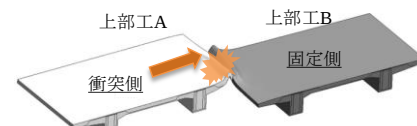


図-2 解析イメージ

2. 解析手法 図-1, 2に、対象高架橋の外観、解析イメージを示す。

標準的な調整桁式ラーメン高架橋¹⁾を対象に、図-1に示す上部工範囲を二つモデル化した。上部工の遊間は0.01mmとした。

図-3に、解析モデル図を示す。図-1に示す解析対象のコンクリート部と鉄筋部は3次元有限要素を用いて忠実にモデル化した。境界条件に関しては、初速度を与える上部工Aは全節点を自由とした。上部工Bには、y方向全体系固有振動数が1Hzとなる剛性を持つ線形ばねを配置した。付加質量として、スラブ上の軌道やダクト壁、高欄等の質量をモデル化した。

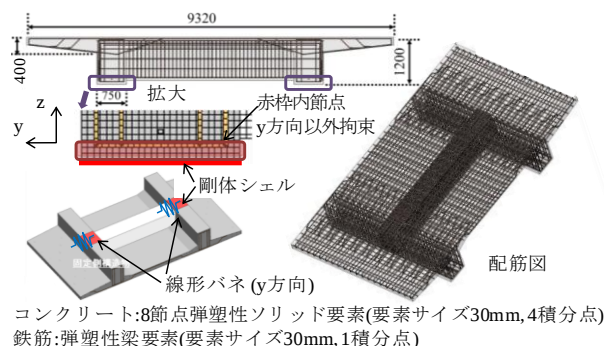


図-3 解析モデル図

表-1 材料諸元

	単位	コンクリート	鉄筋
単位重量	ρ (kN/m ³)	23	77
ポアソン比	γ	0.2	0.3
弾性係数	E_c, E_s (N/mm ²)	26500	200000
圧縮強度	f_c (N/mm ²)	27	-
引張強度	f_t (N/mm ²)	2.1	-
降伏応力	σ_y (N/mm ²)	-	345

表-1に材料諸元、図-4に鉄筋およびコンクリートの相当応力 σ 相当ひずみ ε の関係を示す。鉄筋要素の降伏条件はVon-Misesの降伏条件に従うものとし、ひずみ速度効果の影響を考慮した。コンクリート要素の構成則にはLS-DYNAに組み込まれているWinfrithコンクリートモデル²⁾を用いた。コンクリート要素はOtossenの破壊基準に従うものとし、ひずみ速度効果の影響を考慮した。コンクリートと鉄筋の付着はコンクリート要素の節点とその要素に干渉する鉄筋要素の節点の加速度、速度が一致する拘束条件を設け、完全付着を仮定した。

表-2に、解析ケースを示す。衝突角度 θ_0 は0.01radで、線路方向に5m離れた地点が50mmの位相差を持って線路直角方向に応答した場合を想定している。また、衝突速度 v_0 は1m/sでL1地震動程度、2~3m/sでL2地震動程度を想定している。

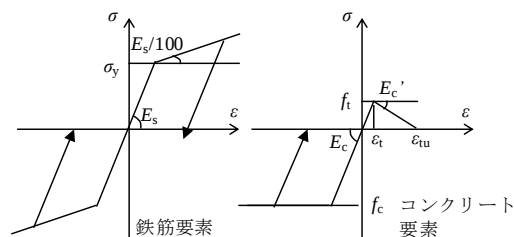


図-4 応力-ひずみ関係

表-2 解析ケース

解析 ケース名	衝突角度 θ_0 (rad)	衝突速度 v_0 (m/s)
F_v1	0	1
F_v2	0	2
F_v3	0	3
R_v1	0.01	1
R_v2	0.01	2
R_v3	0.01	3

3. 解析結果 図-5に、衝突後($t=50\text{ms}$)のひび割れ分布図および圧壊部を示す。ひび割れ幅は、引張応力と G_f をもとに算出されるもので、ひび割れ幅が維持管理上一定の管理基準^{4,5)}となる0.2mm以上のものを図中黒線で示した。相当塑性ひずみが概ね ε_c となる 1000μ を超えた箇所を着色部とし、図中のコンターにおいて着色がない領域は弾性応答した領域である。終局圧縮ひずみを 2000μ と仮定する⁶⁾と水色から赤色の着色を示す領域で圧壊を生じたことになる。図から、 $\theta_0=0\text{rad}$ の場合には、張出スラブが鉛直上方向にたわむことにより付け根部にひび割れが発生しており、接触部の微小な領域で圧壊していること

キーワード：鉄道ラーメン高架橋、コンクリート、衝突解析、相互作用、有限要素解析

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 構造力学研究室 TEL:042-573-7290

が確認できる。また、 $\theta_0=0.01\text{rad}$ の場合には、両上部工の接触部近傍で若干のひび割れが確認でき、圧壊領域が大きく広がっていることが確認できる。

図-6 に、衝撃力と相対変位の時刻歴を示す。衝撃力は、張出スラブと縦梁の境界から鉛直断面上の全要素の y 方向の力の和として算出した。相対変位は、評価断面間の相対変位として算出した。図から、衝突速度に依存して最大衝撃力、圧縮方向の最大相対変位が共に大きくなっていることが確認できる。 $\theta_0=0\text{rad}$, $v_0=3\text{m/s}$ の場合、最大相対変位は 5mm 程度であり、最大衝撃力は 40MN 程度と比較的大きな値を示していることが確認できる。この相対変位は衝突後に張出スラブが上方にたわむことで主に発生している。 $\theta_0=0.01\text{rad}$, $v_0=3\text{m/s}$ の場合、最大相対変位は 20mm 程度の大きな値となっている。一方、最大衝撃力は $v_0=3\text{m/s}$ の場合で 18MN であり、 $\theta_0=0\text{rad}$ の場合より小さい値を示している。

図-7 に、衝撃力-相対変位関係を示す。 $\theta_0=0\text{rad}$ の場合は接触時に急激に衝撃力が立ち上がり、その後はほぼ一定の剛性を示すのに対し、 $\theta_0=0.01\text{rad}$ の場合は接触後徐々に剛性が大きくなっている。また、 $\theta_0=0\text{rad}$ の場合は載荷時剛性と除荷時剛性に大きな差が見られず、エネルギー吸収量が小さいことから、コンクリートおよび鉄筋の損傷度も小さいことが分かる。一方、 $\theta_0=0.01\text{rad}$ の場合はエネルギー吸収量が大きいことから、コンクリートおよび鉄筋の損傷度が比較的大きいことが分かる。

図-8 に、接触剛性-相対変位を示す。接触剛性は衝撃力と相対変位の各ステップの差分を除することで算出した。図から $\theta_0=0\text{rad}$ の場合は、相対変位が微小な領域では 540MN/mm 程度の接触剛性を示しているが、それ以上の領域では 10MN/mm 程度に漸近している。これは、接触した瞬間にはコンクリート要素相互の接触に基づく接触剛性が支配的となるが、相対変位が大きくなるにつれて、張出スラブの上反りに起因する y 方向の変形が支配的となり接触剛性が小さくなっているものと推定される。一方、 $\theta_0=0.01\text{rad}$ の場合は、相対変位が微小な領域では 0.1MN/mm 程度の非常に小さい接触剛性を示しているが、それ以上の領域では 1MN/mm 程度に漸近しており、 $\theta_0=0\text{rad}$ と比較して非常に小さい接触剛性となっている。これは、 $\theta_0=0.01\text{rad}$ の場合、接触面積が小さい上部工 A の角部が接触すること、相対変位に伴い接触面積が増加することに起因すると考えられる。

4. まとめ ①上部工相互の接触による上部工の損傷は、衝突速度、衝突角度に依存して変化し、衝突速度が 3m/s の場合に接触部近傍で圧壊し、張出スラブの付け根においてひび割れの損傷が発生する可能性がある。②上部工相互の接触剛性は、接触角度や食い込み量に依存して大きく変化し、0.1~500MN/mm 程度となる。③上部工相互の接触剛性を評価する際には、接触部の変形および張出スラブの上反りによる変形を同時に考慮する必要がある。

参考文献 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）照査例 RC ラーメン高架橋，2008。
2) Broadhouse, B.J. and G.J. Attwood; Finite Element Analysis of the Impact Response of Reinforced Concrete Structures using DYNA3D, Proceedings of Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT) 12, University of Stuttgart Germany Elsevier Science Publishing, 1993。
4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'12[基礎編]，2012。5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物維持管理標準・同解説（構造物編），丸善 2008。6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - コンクリート構造物，丸善，2004。

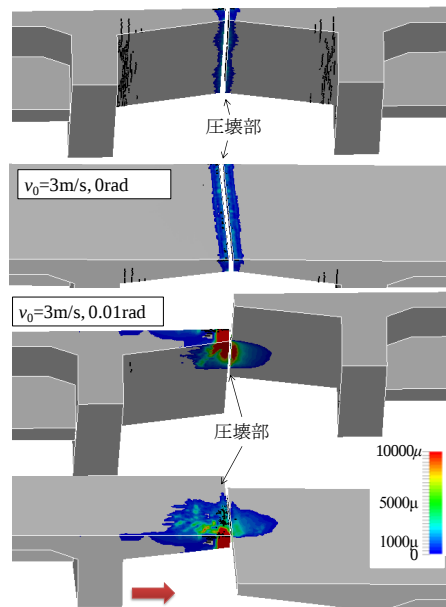


図-5 接触後の相当塑性ひずみ分布 (t=50ms)

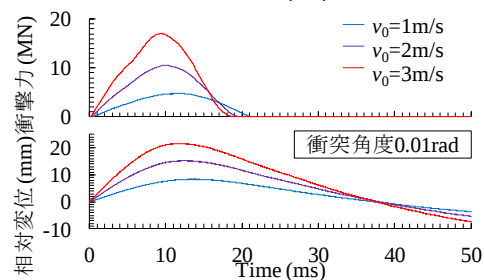
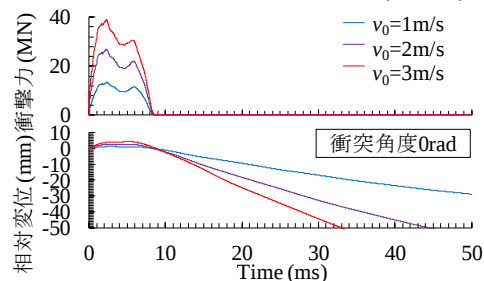


図-6 衝撃力と相対変位の時刻歴波形

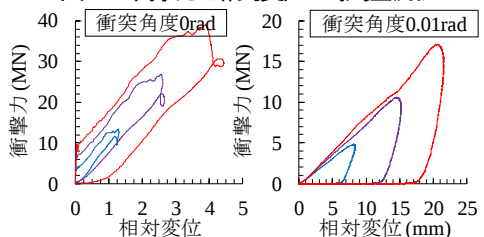


図-7 衝撃力相対変位関係

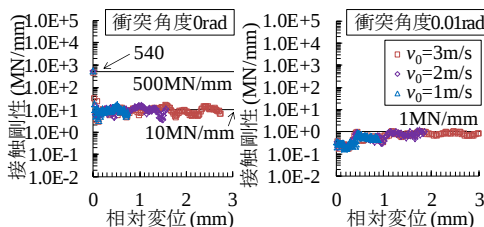


図-8 接触剛性