

論文 鉄道 RC 高架橋相互の線路直角方向の衝突現象の評価

徳永 宗正^{*1}・曾我部 正道^{*2}・中田 裕喜^{*3}・渡辺 勉^{*1}

要旨：鉄道分野では、駅部付近等で高架橋が線路直角方向に近接して配置される場合があり、地震時には高架橋同士が衝突し損傷する可能性が考えられる。本論文では、一般的な鉄道ラーメン高架橋を対象に、高架橋相互の衝突現象の評価を目的に数値解析を行った。その結果、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 1m/s の場合には比較的軽微な損傷で済むが、衝突速度が 2m/s 以上の場合には接触部近傍の圧壊と張出スラブの付け根のひび割れが発生する可能性があること、接触剛性を評価する際には、接触角度に大きく依存する接触部の変形、張出スラブの上反り変形を考慮する必要があること等が明らかとなった。

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

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、桁相互の衝突や桁と橋台の衝突による損傷等が確認され、その後桁間衝突および緩衝装置に関する研究が行われてきた。これら既往の研究は橋軸方向の衝突を対象としている。一方鉄道分野では、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。

ところが、高架橋の張出スラブのように比較的部材厚が薄く変形が発生しやすい部材相互の衝突は、過去にあまり検討されていない。加えて実務設計でも詳細な検討はなく、遊間が小さい場合には緩衝材を遊間に設ける対策がなされる程度である。

図-1 に本研究フローを示す。これまで述べた背景から、本研究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いる。本論文では第 1 ステップとして、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目的に検討を行った。

2. 検討手法

2.1 対象高架橋

図-2 に、対象高架橋の外観を示す。対象高架橋は標

準的な調整桁式ラーメン高架橋¹⁾である。解析においては、計算コストの縮小のため、赤線で囲んだ線路方向に 5m の範囲の上部工のみをモデル化対象範囲とした。

2.2 解析手法

(1) 解析モデル

図-3 に、解析イメージを示す。鉄道高架橋の線路直角方向の衝突を考えた場合、張出スラブが相互に衝突すると想定されることから、図-2 に示す上部工範囲を二つモデル化し、図-3 に示す上部工 B の柱部を固定し、上部工 A の全節点に初速度を与えることで衝突解析を行

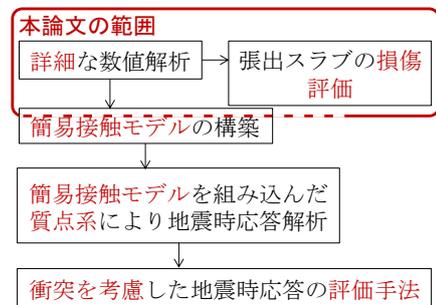


図-1 研究フロー

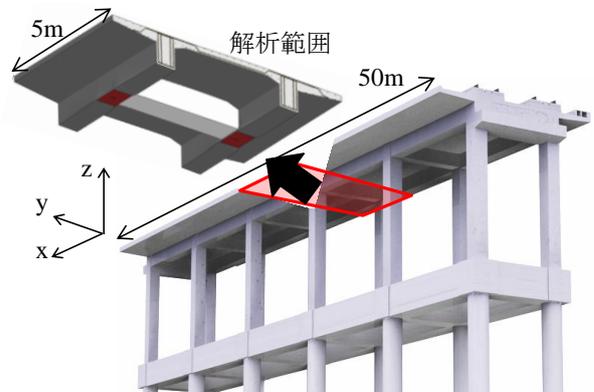


図-2 対象高架橋概念

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造力学 研究員 工修 (正会員)

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造力学 室長 工博 (正会員)

*3 公益財団法人鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

った。上部工 A, B の遊間は 0.01mm とした。

図-4 に、解析モデル図を示す。図-2 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。コンクリートはメッシュサイズ 30mm の 8 節点弾塑性ソリッド要素、鉄筋はメッシュサイズ 30mm の弾塑性梁要素によりモデル化した。本解析モデルの総節点数は 1198358、梁要素数は 122118、ソリッド要素数は 861336 である。梁要素の積分点は 4 点、ソリッド要素の積分点は 1 点とした。

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、縦桁と横桁の交差部の本来柱が設置されている箇所に剛体シェル要素を作成し、その剛体部中央に上部工 B の 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。また、剛体シェルに与えた拘束による局所的な変形集中の発生を抑制するため、図中赤枠部のコンクリートおよび鉄筋に対して、y 方向併進自由度以外を完全拘束した。

図-5 に、張出スラブ部に付加した質量の設置位置および大きさを示す。実際にはスラブ上には軌道やダクト壁、高欄等が存在するが、高架橋相互の衝突現象の安全側の評価のため、剛性は考慮せず質量のみをモデル化した。モデル化方法は、剛性を持たない要素(シェル、ビーム)に対して所定の質量となるよう質量密度を調整し、重力により上部工に対して負荷した。

(2) 材料モデル

表-1 に材料諸元、図-6 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。

図-6(a)に、鉄筋要素の相当応力 σ -相当ひずみ ϵ の関係を示す。鉄筋要素は図に示すように、降伏応力に達した以降は初期剛性の 1/100 の剛性でひずみ硬化を示すバイリニア型の応力-ひずみ関係を有し、除荷時剛性は初期剛性で弾性復帰するものと仮定した。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。

図-6(b)に、コンクリート要素の相当応力 σ -相当ひずみ ϵ の関係を示す。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。図に示すように、圧縮域ではバイリニア型の応力-ひずみ関係を有し、除荷時の剛性は初期剛性で弾性復帰するモデルである。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。圧縮強度を 27N/mm^2 としたため、 $\epsilon_c = 1018\mu$ となった。引張域に関しては、引張強度に達するまでは線形に応力が増加するものとし、その後は線形に応力が低下していくような軟化挙動を示すモデルとした。なお、引張強度を 2.1N/mm^2 としたため、 $\epsilon_t = 79\mu$ となっ

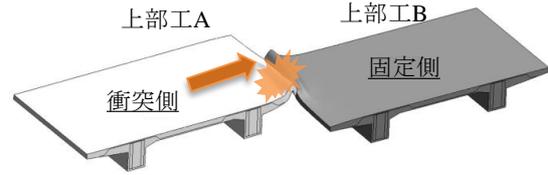


図-3 解析イメージ

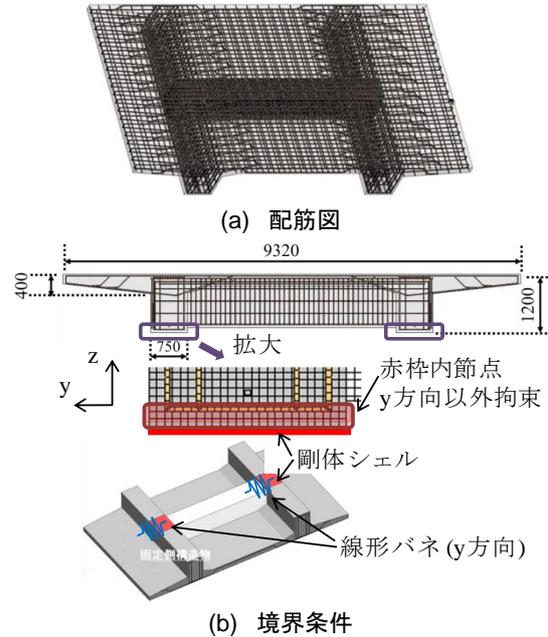


図-4 解析モデル図

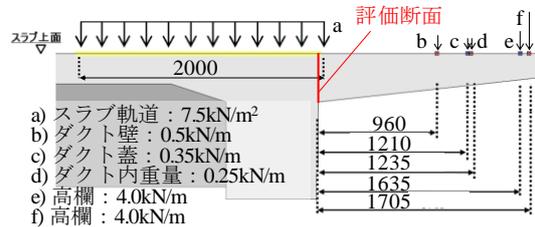


図-5 付加質量

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

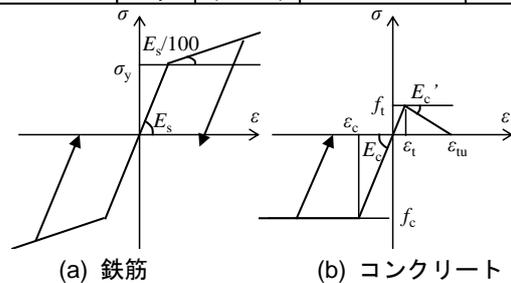


図-6 応力-ひずみ関係

た。また、このモデルにおける引張終局ひずみは、式(1)

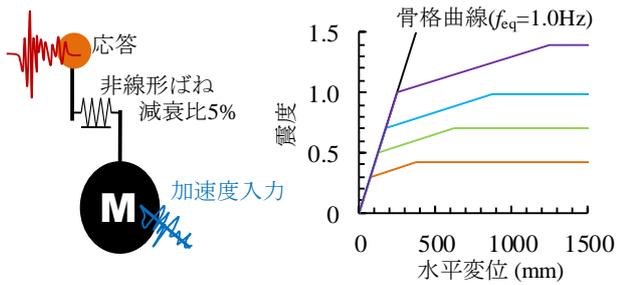
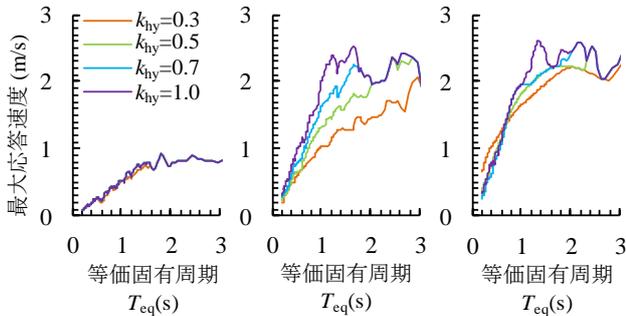


図-7 1自由度系の地震応答解析モデル図



(a) L1地震動 (b) L2spc1地震動 (b) L2spc2地震動

図-8 地震動規模と構造物の最大応答速度の関係

表-2 解析ケース

解析ケース名	衝突角度 (rad)	衝突速度 (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

により算出した。

$$\varepsilon_{tu} = 5 \left(\frac{G_f}{f_t h} - \frac{f_t}{2E_c} \right) \quad (1)$$

ここで、 G_f は引張破壊エネルギー、 f_t は引張強度、 h は要素最小長さ、 E_c はコンクリート要素の弾性係数である。本解析では、 $G_f = 0.1\text{N/mm}$ 、 $h=30\text{mm}$ としたため、 $\varepsilon_{tu} = 7940\mu$ となった。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。

(3) 解析ケース

図-7、8に、別途行った1自由度系の地震応答解析の解析モデルおよび得られた最大速度をそれぞれ示す。入力地震動はG3地盤用のL1地震動およびL2スペクトルI、II地震動³⁾(以下、それぞれ「L1、L2spc1、L2spc2」とした。構造物応答は1自由度の非線形ばねで表現し、降伏震度 k_{hy} は0.3、0.5、0.7、1.0、 k_{hmax} は $1.4k_{hy}$ 、等価固有周期 T_{eq} は0.1~3.0秒とした。図から、弾性挙動するL1地震時には当然ながら最大応答速度は k_{hy} に依存して変化していない。実際の衝突速度は構造物の相対速度であるから必ずしも対応するわけではないが、衝突速度の

1m/sは概ねL1地震動、2m/sは概ねL2地震動の最大応答速度相当であることが確認できる。

表-2に、解析ケースを示す。解析パラメータは衝突角度と衝突速度の2種類とし、衝突角度は0、0.01radの2通り、衝突速度は1、2、3m/sの3通りとした。衝突角度0.01radは、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。衝突角度0radの場合は、線路方向に上部工A、Bの位置をずらさないフルラップ衝突とした。衝突角度0.01radの場合は、実際には横梁の拘束により生じない中間スラブの変形を避けるため、上部工AがBの中央位置に衝突するオフセット衝突とした。実際の衝突を想定した場合、衝突角度は0~0.01程度となると考えられることから、上記のフルラップ衝突とオフセット衝突で実現象の両極端なケースを再現できると考えた。

(4) 数値解析法

数値解析には、汎用有限要素プログラムLS-DYNA(ver.971d)⁴⁾を用いた。用いたコンピュータはDELL Precision T7600で、プロセッサは2.30GHz Intel Xeon、メインメモリは32GB、OSはWindows7 Pro-SP1である。上部工A、B間の接触はペナルティ法により考慮した。減衰は衝撃応答を過少に評価しないことを考慮しモデル化していない。解析時間は、上部工A、Bが衝突後に互いに完全に離反するのに十分な時間として50msと設定した。全ての解析ケースに対して概ね5時間程度の解析時間を要した。

3. 検討結果

3.1 上部工の損傷

高架橋相互の衝突による上部工の損傷を定量的に評価するため、衝突後に残留したコンクリートのひび割れ分布および相当塑性ひずみに着目した。

図-9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^{5,6)}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⁷⁾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-9(a)より、衝突角度0radで衝突速度が1m/sの場合は、ひび割れおよび圧壊部はほとんど確認できないことが分かる。

図-9(b)より、衝突角度0.01radで衝突速度が1m/sの場合は、ひび割れはほとんど確認できないが、両上部工の接触部近傍で圧壊していることが確認できる。

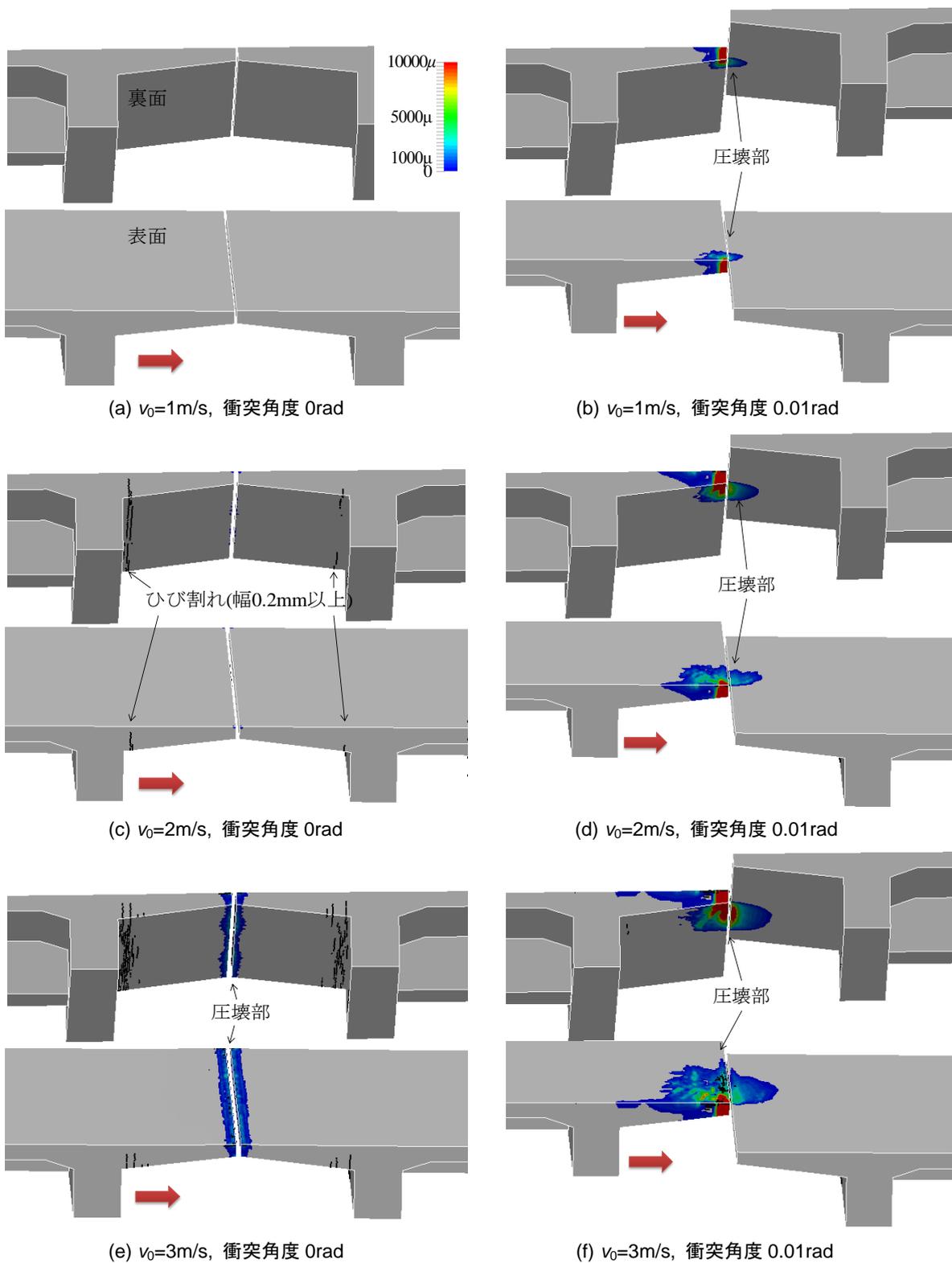


図-9 接触後の相当塑性ひずみ分布 (t=50ms)

図-9(c)より、衝突角度 0rad で衝突速度が 2m/s 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が確認できる。

図-9(d)より、衝突角度 0.01rad で衝突速度が 2m/s 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、圧壊部の領域が 1m/s と比較して大きくなっていることが確認できる。

図-9(e), (f)より、衝突速度が 3m/s の場合には、2m/s の場合と比較して、ひび割れと圧壊部の領域と程度が大きくなっている。

以上から、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 1m/s の場合には比較的軽微な損傷で済むが、衝突速度が 2m/s 以上の場合には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。

3.2 接触部の接触力-変位関係

図-10 に、衝撃力と相対変位の時刻歴を示す。衝撃力は、図-5 に評価断面として示すように、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。各ケースにおいて、上部工 A と上部工 B の衝撃力の時刻歴は概ね一致することを確認しており、図中には上部工 B の結果を示している。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(以下、単に「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。

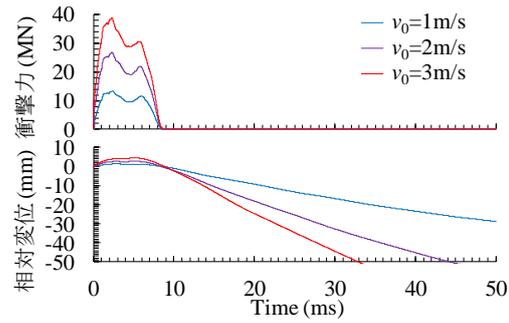
図-10(a)から衝突角度 0rad の場合は、いずれの衝突速度においても接触継続時間が 10ms 程度である。ここで接触継続時間は、相対変位が 0 以上となり食い込みが発生している時間長さである。 $v_0=3\text{m/s}$ の場合の、最大衝撃力は 40kN 程度と比較的大きな値を示しており、最大相対変位は 5mm 程度であることが確認できる。この相対変位は衝突後に張出スラブが上方にたわむことで主に発生している。

図-10(b)から衝突角度 0.01rad の場合は、接触継続時間が 40ms 程度であり、衝突角度 0rad の場合と比較して接触衝突時間が長くなっており、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 18kN であり、衝突角度 0rad の場合と比較して小さい値を示している。

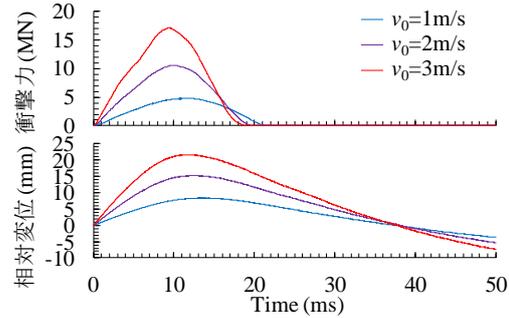
図-11 に、衝撃力-相対変位関係を示す。衝突角度 0rad の場合は接触時に急激に衝撃力が立ち上がり、その後ほぼ一定の剛性を示すのに対し、衝突角度 0.01rad の場合は接触後徐々に剛性が大きくなっていることが確認できる。また、衝突角度 0rad の場合は荷重時剛性と除荷時剛性に大きな差が見られず、エネルギー吸収量が小さいことから、コンクリートおよび鉄筋の損傷度も小さいことが分かる。一方、衝突角度 0.01rad の場合は履歴曲線の弧が大きくエネルギー吸収量が大きいことから、コンクリートおよび鉄筋の損傷度が比較的大きいことが分かる。

3.2 接触剛性

構造物の地震応答解析では、衝突箇所に接触ばねを配置し衝突現象をモデルする場合が多く、川島により接触ばねの剛性を算出する式として式(2)が提案されており、多くの研究で用いられている⁸⁾。

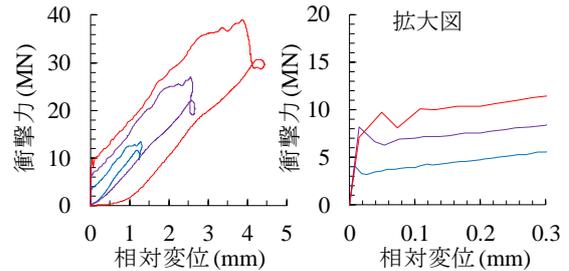


(a) 衝突角度 0rad

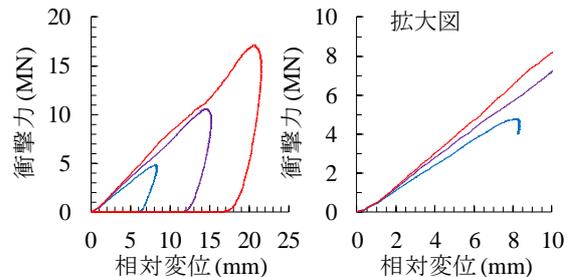


(b) 衝突角度 0.01rad

図-10 衝撃力と相対変位の時刻歴波形



(a) 衝突角度 0rad



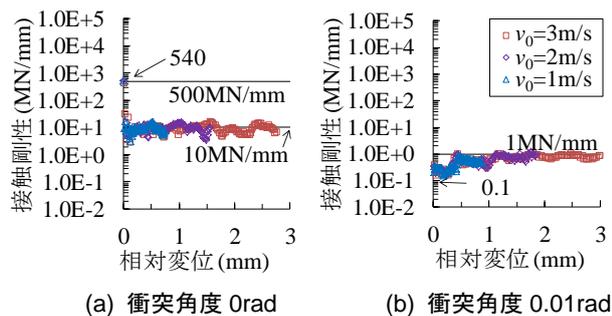
(b) 衝突角度 0.01rad

図-11 衝撃力-相対変位関係

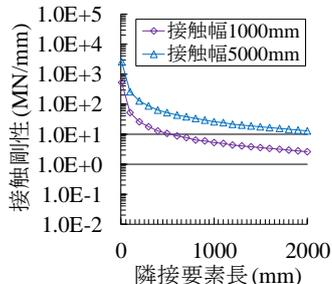
$$k = \frac{EA}{L/n} \quad (2)$$

ここで、 n は要素数、 E はヤング率、 A は断面積、 L は部材長である。式(2)で表される接触剛性 k は、接触ばねに隣接する 1 棒要素の軸剛性 EA を接触部に隣接する要素の長さ $l (=L/n)$ で除した軸剛性に相当する。式(2)は、軸剛性が等しく、要素数が等しい桁相互の解析において提案されていることから、本論文の数値解析とは条件が等しいわけではないが、参考に比較対象とする。

図-12 に、本論文の数値解析で得られた接触剛性-相



(a) 衝突角度 0rad (b) 衝突角度 0.01rad



(c) 式(2)

図-12 接触剛性

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差分を除することで算出した。図-12(a)から衝突角度 0rad の場合は、相対変位が微小な領域では 540kN/mm 程度の接触剛性を示しているが、それ以上の領域では 10kN/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、図-12(b)から衝突角度 0.01rad の場合は、相対変位が微小な領域では 0.1kN/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 1kN/mm 程度に漸近しており、衝突角度 0rad と比較して非常に小さい接触剛性となっている。これは、衝突角度 0.01rad の場合は上部工 A の角部が接触することから接触面積が小さくなること、相対変位が大きくなるにつれて接触面積が増加することに起因すると考えられる。

図-12(c)に、式(2)により算出した接触剛性を示す。E は 26.5kN/mm²、A は張出スラブの高さ 200mm と接触幅 1000mm、5000mm の 2 通りの積とした。L/n の隣接要素長は 10~2000mm の間でパラメータとした。図から、接触幅を 1000mm とした場合接触剛性は 2.7~530kN/mm、接触幅を 5000mm とした場合接触剛性は 13~2650kN/mm となっていることが分かる。この剛性は、特に接触幅が 1000~2000mm 程度となる接触角度 0.01rad の解析結果と比較すると非常に剛性が大きい。これは、式(2)が断面保持を仮定した 1 次元の線形接触を対象としているためであり、本解析で考慮した材料非線形や張出スラブの軸圧縮、上反り等は考慮されていないためと考えられる。

以上から、上部工相互の接触剛性は接触角度に依存して大きく変化すること、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ことが明かとなった。

4. まとめ

本論文では、一般的な鉄道ラーメン高架橋を対象に、高架橋相互の衝突現象の評価を目的に数値解析を行い、以下の結論を得た。

- (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 1m/s の場合には比較的軽微な損傷で済むが、衝突速度が 2m/s 以上の場合には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.
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 耐震設計，丸善，1999。
- 4) John O Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 川島一彦：動的解析における衝突のモデル化に関する一考察，土木学会論文報告集，第 308 号，pp123-126，1981。