

論文 自動車の衝突荷重を受ける鉄道 RC ラーメン高架橋の耐衝撃特性

小尾 博俊*1

要旨: 本稿は、道路上を立体交差する鉄道高架橋が自動車の衝突荷重を受けた場合、高架橋の脚柱にはどの程度の損傷が生じるか把握することを目的としてケーススタディを実施したものである。ケーススタディで対象とした高架橋は耐震設計された RC ラーメン高架橋とし、総重量 80kN のトラックが数種類で衝突することを想定した。また、比較のため、高架橋の脚柱を鋼板巻立て補強した場合と衝突荷重を静的な荷重で評価した場合についても検討を加えた。

キーワード: 鉄道 RC ラーメン高架橋, 車両衝突, 耐衝撃特性, ひずみ速度効果

1. はじめに

近年、高架構造が盛んに用いられるようになったため、道路の中に脚柱のある高架橋を数多く見かけるようになった。道路上に脚柱があれば自動車が衝突する恐れがあり、その破損は時として落橋を生じるものであるから自動車の衝突する恐れがある脚柱には、脚柱本体とは独立した強固な防護工を設ける必要がある。しかし、既設の道路を立体交差する場合等で、強固な防護工を設ける余地が確保できない場合には、脚柱自体が衝突荷重に対して十分な耐荷力を有するように設計されなければならない^{1),2)}。

そこで本稿では、既設の道路上を鉄道の RC ラーメン高架橋が立体交差する場合を想定し、高架橋の脚柱に自動車が衝突した場合、脚柱にはどの程度の損傷が生じるか把握することを目的としてケーススタディを実施した。高架橋への衝突は総重量 80kN のトラックとし、衝突速度は 20, 40, 60, 80km/h の 4 ケースとした。また、高架橋の耐震補強工法として一般的な脚柱を鋼板で巻立て補強した場合と、示方書等^{1),2)}で述べられているように衝突荷重を 1,000kN の静的な荷重として載荷した場合に

についても検討を加えた。

2. 鉄道 RC ラーメン高架橋

対象とする高架橋は参考文献3)に設計例として掲載されている鉄道の RC ラーメン高架橋であり、都市部の立体交差等で用いられる最も一般的な構造形式である。図-1 に本高架橋の構造一般図を示す。構造寸法は、全長が 5 径間 50m、幅員 10m、路面からスラブ梁下端までの空間高さが 5m で、基礎部は地中梁の下を径 1m、深さ 21m の場所打ちコンクリート杭で支持している。高架橋は既設道路上を横断しているものとし、車両は高架橋の脚柱に橋軸直角方向から衝突するものと仮定する。後述する衝突解析で用いるモデル化の範囲は、図-1 に示す薄墨色の部分とした。すなわち、中間径間の 1/2 の範囲とし、場所打ちコンクリート杭は省略し、地中基礎梁の底面を固定条件とすることにした。

衝突荷重が作用する位置は、車両高さを考慮し多少の安全を見込んで、路面から 1.8m の高さとした^{1),2)}。また、スラブ軌道、高欄、電柱等の上載荷重(計 486kN)を分布荷重としてスラブ上面に載荷した。

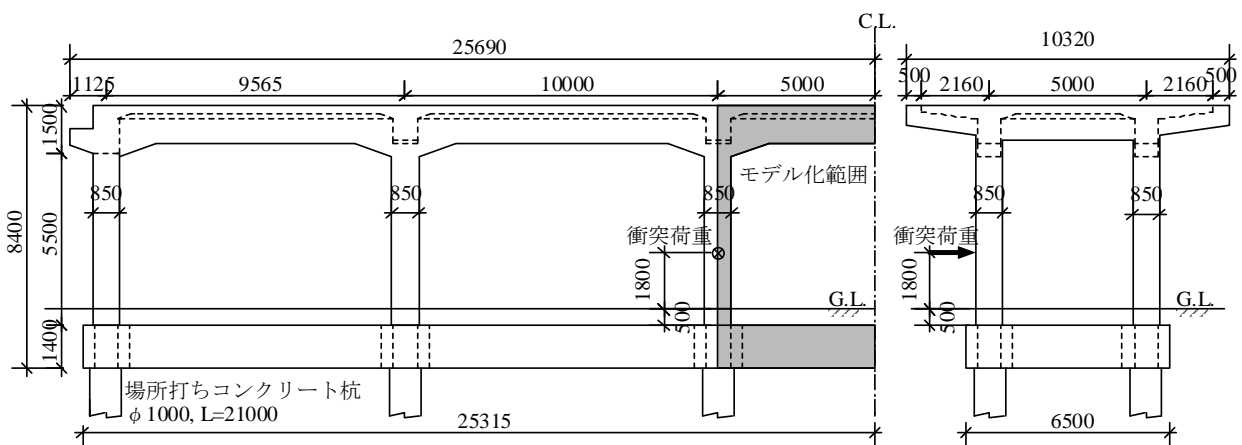


図-1 鉄道 RC ラーメン高架橋の構造一般図 (単位: mm)

*1 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 課長 (正会員)

衝突荷重を受ける脚柱部は断面寸法が 850×850mm で、
 図-2 に示すように、軸方向鉄筋は D32 が 20 本、帯鉄筋は D19 が 125mm ピッチで配筋されている。

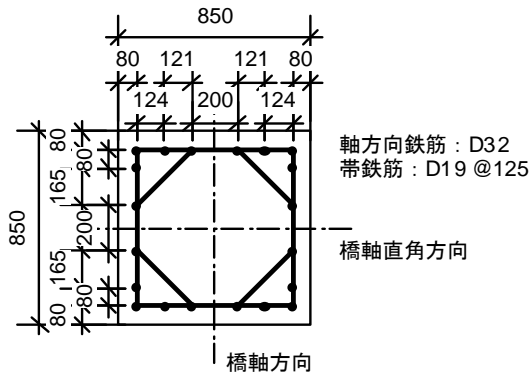


図-2 柱断面の配筋図 (単位: mm)

3. 自動車の衝突荷重

自動車による衝突荷重は参考文献4)に掲載されている、フルラップ前面衝突試験を FEM 解析して得られた結果を用いた。コンクリート障壁へのフルラップ衝突は、車両の衝突時にスピンや横転を起こす可能性がないため、他の衝突形態に比べ高い衝撃力が生じる。そのため、本衝突荷重を用いれば安全側の評価となる。ここで使われている自動車車両モデルは NCAC (National Crash Analysis Center) ⁵⁾より公開されている総重量 80kN のトラックモデルであり、衝突速度は 20, 40, 60, 80km/h の4 ケースを想定した。入力条件となる各速度における衝突荷重の時刻歴を図-3 に示す。衝突荷重の最大値は 20km/h で 1,400kN, 40km/h で 1,900kN, 60km/h で 2,400kN, 80km/h では 5,000kN を超えており、瞬間的には非常に大きな荷重が作用することになる。荷重の継続時間は概ね 0.15~0.20sec であり比較的長い作用時間である。図-4 には、図-3 から得られた力積、および入力エネルギーと衝突速度の関係を示す。力積は衝突速度の増加とともにほぼ線形に増加することが分かる。一方、入力エネルギーは当然のことながら速度の2乗に比例して増加する。

図-5 には各衝突速度における車両の変形状態を示す。速度が 40km/h までは車両に特別大きな変形は見られないが、60km/h になると車両前部が大きく潰れはじめ、80km/h では運転席部分も激しく圧潰し、荷台が前のめりに傾斜している様子が分かる。

なお、脚柱への衝突荷重の作用位置は前述したように、路面から 1.8m の高さを中心に、載荷面積は柱幅と車両前部の大きさを考慮し、幅 850×高さ 1,000mm の範囲に分布荷重として載荷することにした。

4. 解析モデル

車両の衝突は高架橋の中間径間の脚柱で起こること

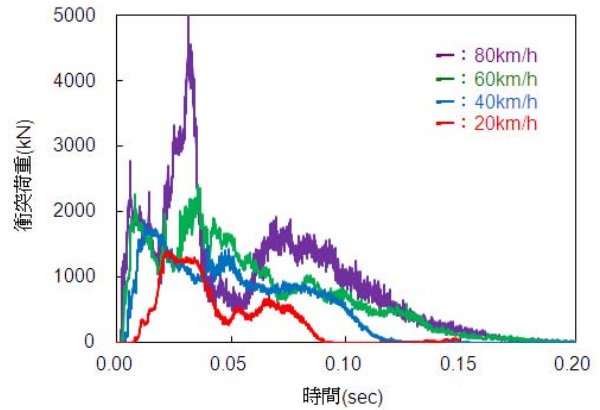


図-3 衝突荷重時刻歴

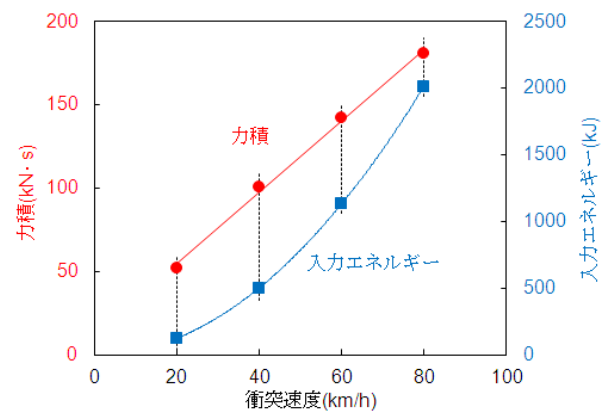


図-4 力積・入力エネルギーと衝突速度の関係

衝突速度 (km/h)	フルラップ 前面衝突時の車両の変形状態
20	
40	
60	
80	

図-5 車両の変形状態

を想定する。したがって、モデル化の範囲は、高架橋の対称性を考慮し中間径間の 1/2 の範囲とする。基礎部は地中梁を場所打ちコンクリート杭で支持する形式であるが、杭径、杭長等から、車両衝突により地中梁の底面が移動することは考えづらいため、杭のモデル化は省略し地中梁の底面を完全固定とした。

高架橋躯体の要素分割と配筋モデルを図-6 に示す。コンクリート要素には 8 節点ソリッドの低減積分要素を用い、鉄筋は 2 節点トラス要素で、巻立て補強鋼板は 4 節点シェル要素でそれぞれモデル化し、コンクリート～鉄筋、鋼板間は完全付着を仮定した。また、上載荷重を再現するため高架橋のスラブ上面には、密度を調整し合計重量が 486kN となるような錘（ソリッド要素）を載せ解析を行っている。なお、本解析モデルの固有周期は 0.30sec であった。

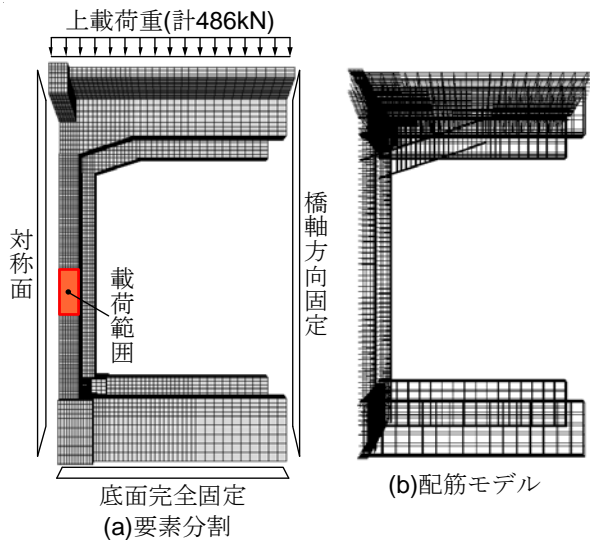


図-6 解析モデル (1/2 モデル)

5. 解析条件

本稿では解析コードとして陽解法に基づく Abaqus /Explicit を用いた。また、数値計算における時間間隔は Courant の安定条件を満足するように自動設定し、減衰定数には質量比例型の 5% 減衰を用いることとした。

躯体コンクリートの材料モデルは、圧縮強度をもとに静的な応力-ひずみ関係を定義し、その後、ひずみ速度効果を取り入れた材料モデルへと拡張した。まず、静的な材料モデルについて、圧縮側は応力の軟化域を含めた簡略化した履歴モデル⁶⁾を用いた。引張側は 1/4 モデル⁶⁾を踏襲し、ひび割れ幅 w を代表的な要素寸法 $L_{ch}=100\text{mm}$ で除してひずみに変換した。このとき、破壊エネルギー G_f は式(1)から 87.7N/m、また、引張強度 f_t は式(2)から 2.07MPa、引張応力が 0 となるときひび割れ幅 w は式(3)から 0.21mm と求まる。

$$G_f = 10 \cdot (d_{\max})^{1/3} \cdot f_c^{1/3} \quad (1)$$

$$f_t = 0.23 \cdot f_c^{2/3} \quad (2)$$

$$w = 5 \cdot G_f / f_t \quad (3)$$

ここで、粗骨材の最大寸法 d_{\max} は 25mm、圧縮強度 f_c は 27.0MPa である。

一方、動的な材料モデルについては、コンクリート標準示方書 構造性能照査編⁷⁾に参考資料として、ひずみ速

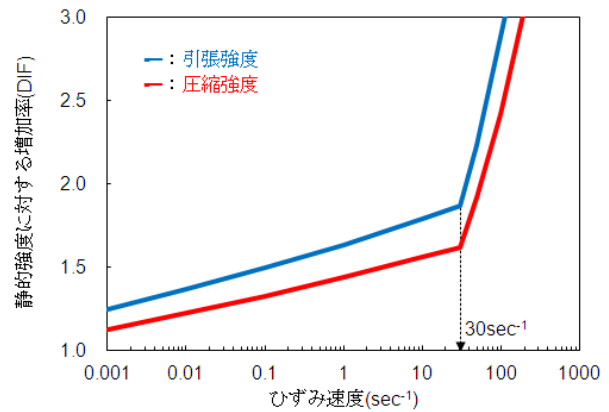


図-7 コンクリートのひずみ速度効果⁷⁾

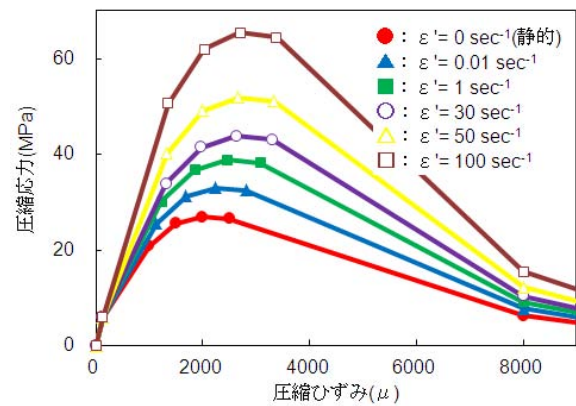


図-8 コンクリートの圧縮強度特性

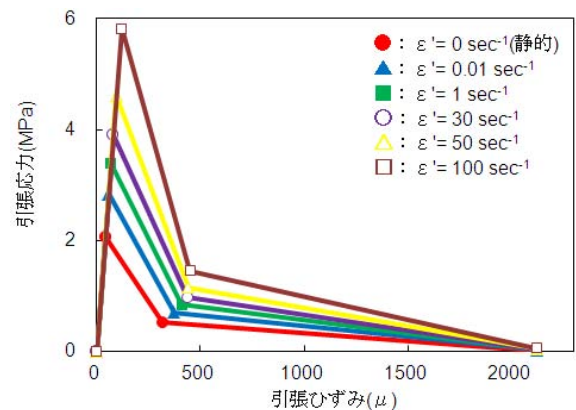


図-9 コンクリートの引張強度特性

度の影響が、ひずみ速度と静的な圧縮強度の関係式として示されている。この関係式に本検討のコンクリートの圧縮強度を代入し図化すると図-7~9のようになる。図-7はひずみ速度の増加がコンクリートの材料強度に及ぼす影響で、縦軸の増加率は一般にDIF(Dynamic Increase Factor)として引用されている。また、図-8と9は各ひずみ速度に応じたコンクリートの圧縮強度および引張強度を示したものである。本解析ではこれらの関係を入力データとすることで、各要素内のひずみ速度に応じた応力-ひずみ関係を評価している。

鋼材については、本検討内でのひずみ速度効果の影響は小さいものと判断し、これを考慮しないこととした。

表-1に本検討で用いた材料定数の一覧を示す。鉄筋の材質はSD345とし、降伏強度が345MPa、引張強度は490MPaであり、巻立て鋼板の材質はSS400とし、降伏強度が245MPa、引張強度は400MPa、また、板厚としては9mmを用いた。

解析ケースは表-2に示すように、衝突速度が20, 40, 60, 80km/hの4ケースと、比較として、衝突速度80km/hのケースで脚柱を巻立て鋼板で補強した場合、さらに、衝突荷重を1,000kNの静的荷重として載荷した場合の計

表-1 材料定数

	コンクリート (静的強度)	鉄筋 SD345	巻立て鋼板 SS400
ヤング率 E(GPa)	26.5	200	200
圧縮強度 f_c (MPa) または 降伏強度 f_y (MPa)	27.0	345	245
引張強度 f_t (MPa) または f_u (MPa)	2.07	490	400
密度 ρ (ton/m ³)	2.3	7.7	7.7
ポアソン比 ν	0.2	0.3	0.3
粗骨材 最大寸法 d_{max} (mm) または 板厚 t(mm)	25	—	9

表-2 解析ケース

No.	解析条件
1	衝突速度 20km/h
2	衝突速度 40km/h
3	衝突速度 60km/h
4	衝突速度 80km/h
5	衝突速度 80km/h + 脚柱を巻立て鋼板で補強
6	静的荷重 1,000kN ^{1),2)}

6 ケースを対象とした。

6. 解析結果

各衝突速度における衝撃力のピーク値は、図-3 より0.01~0.03secに生じているが、載荷点変位のピーク値は図-10に示すように、0.08~0.13secで発生している。各衝突速度とも振幅が非常に小さく、かつ周期の長い波形であることが分かる。速度80km/hのケースでは他のケースに比べ大きな変位量が生じており、最大変位 u_{max} は25.9mmである。ここで、部材角に相当する脚柱の折れ角 θ を u_{max}/L (L は脚柱下端から載荷点までの長さ2,300mm) と定義すると、 $\theta=0.01126$ となる。これは、参考文献3)によれば、L2地震動に対する損傷レベルの照査において、損傷レベル2(場合によっては補修が必要な状態)に相当する程度の損傷である。

また、脚柱を鋼板で補強したケースは、衝突速度が40と60km/hのケースの中間に位置し、静的荷重を載荷したケースは概ね衝突速度40km/hの残留変位量に相当することが分かる。

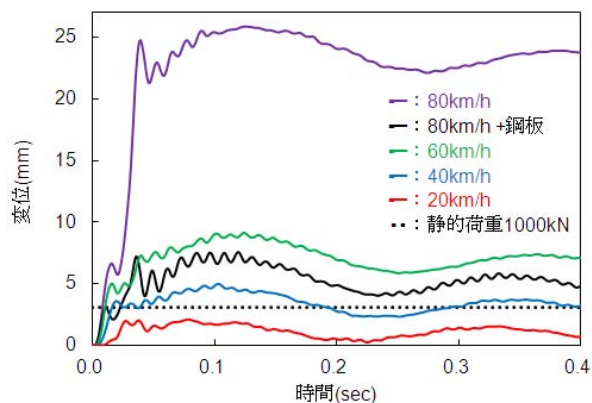


図-10 載荷点変位の時刻歴

図-11にはスラブ位置での変位時刻歴を示す。図から周期は載荷点の時刻歴と似ているが、変位は速度にほぼ比例して増加し振幅の明瞭な波形であることが分かる。

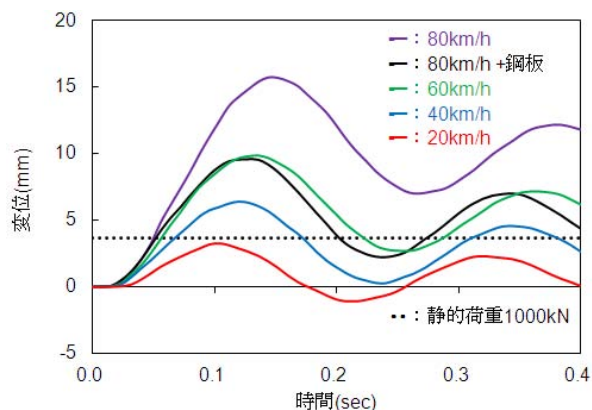


図-11 スラブ変位の時刻歴

衝突速度 20～60km/h では、載荷点変位とスラブ変位はほぼ一致しているものの、速度 80km/h になると両者の差が大きくなっている。このことから速度 60km/h の範囲までは、高架橋の躯体はほぼ弾性的な挙動を示し、80km/h になると載荷点周辺での損傷が進行するものと推察できる。

衝突を受ける柱付け根の軸方向鉄筋ひずみの時刻歴を図-12に示す。図からピーク値の発生時間、振幅および周期といった波形の特徴は載荷点の変位時刻歴によく似ていることが分かる。速度 80km/h のケースのみ塑性ひずみ (>1,725 μ) に達しており、静的荷重のケースは速度 20km/h と 40km/h の中間程度のひずみ値となっている。

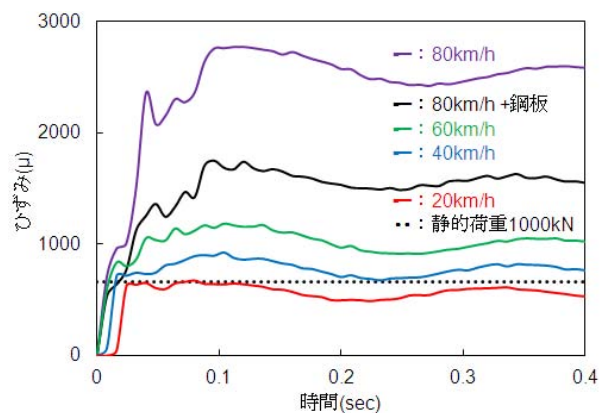


図-12 鉄筋ひずみの時刻歴

図-13には躯体コンクリートのひずみ分布を示す。図は解析モデルを対称面で展開し、出力時間は0.4sec時で、変形は10倍して表示している。衝突速度 20km/h では、脚柱の下端にわずかな損傷が見られる程度である。40km/h になると、脚柱下端の損傷が進行し、載荷点の裏側に曲げによるひび割れが予想される。60km/h では、脚柱の上端および載荷点逆側の脚柱の下端にも損傷が生じる。さらに、80km/h になると、載荷点側の脚柱全域に損傷が広がり、「く」の字に変形している様子が分かる。一方、速度 80km/h で巻立て鋼板による補強を行ったケースでは、脚柱の上下端に塑性ヒンジの形成によると思われる損傷が見られるが、脚柱全体としては速度 40～60km/h 程度の損傷に抑えられている。さらに、車両の衝突を 1,000kN の静的荷重で評価したケースでは、概ね速度 20～40km/h の中間程度の損傷状態であることが分かる。したがって、脚柱に特別な防護対策等を講じない限り、近年の交通事情や車両の大型化等を考慮すると、1,000kN の評価荷重はやや過小ではないと思われる。

図-14には鉄筋のひずみ分布を示す。出力時間は0.4sec時、変形は10倍表示である。ひずみ分布の傾向は躯体コンクリートのそれとほぼ同様に衝突速度が増すに

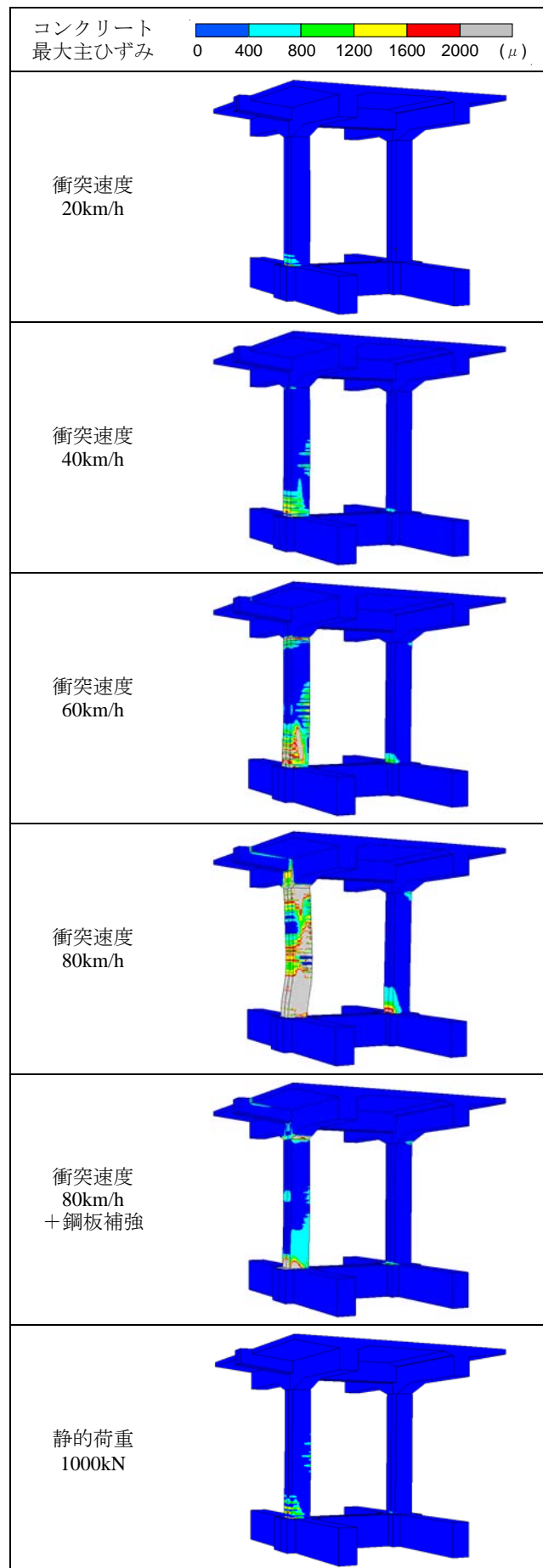


図-13 躯体のひずみ分布 (0.4sec時、変形10倍)

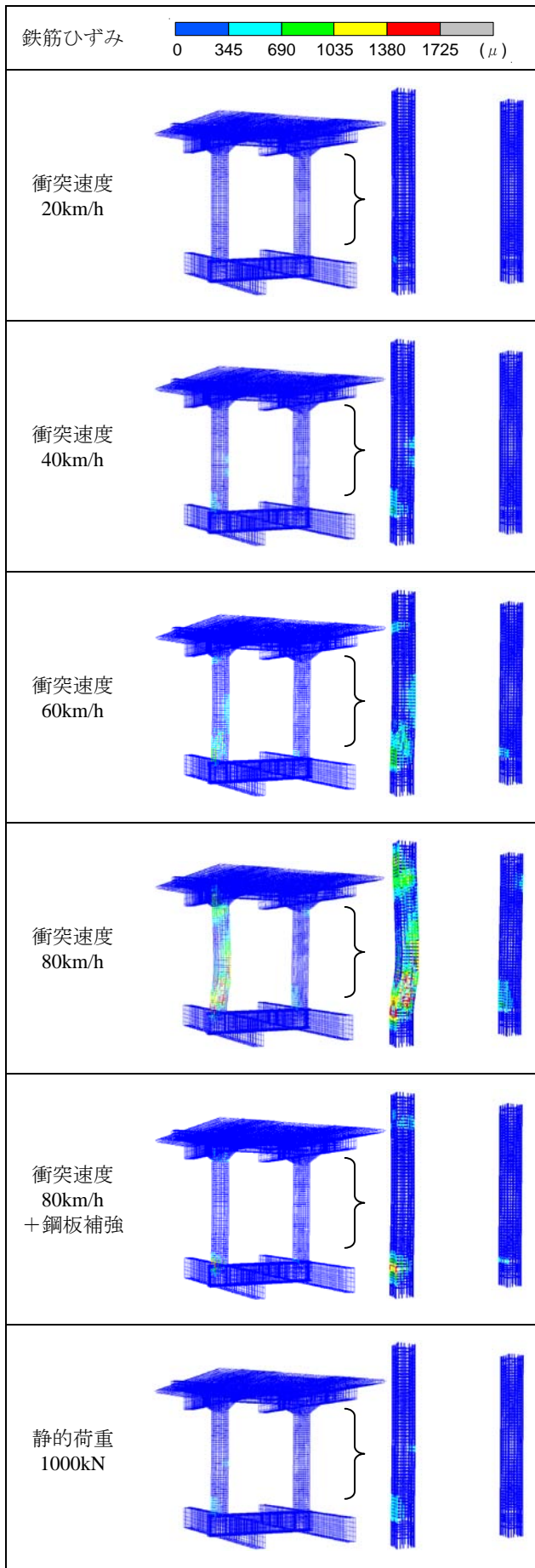


図-14 鉄筋のひずみ分布 (0.4sec時, 変形 10倍)

つれて、載荷点側脚柱の下端、載荷点裏側、載荷点側脚柱の上端および載荷点逆側脚柱の下端、さらに載荷点側脚柱の全域へとひずみが進行していく。また、先にも述べたように、塑性ひずみ以上のひずみが生じているのは速度 80km/h のケースのみである。巻立て鋼板で補強したケースは、載荷点側脚柱の上下端で比較的大きなひずみが生じており、1,000kN の静的荷重で評価したケースでは、概ね速度 40km/h のケースと同程度のひずみが発生している。

7. まとめ

本稿では、既設道路上を立体交差する鉄道 RC ラーメン高架橋を対象に、総重量 80kN の車両が数種類の速度で脚柱に衝突した場合の損傷状態について検討した。以下に本検討の条件内で得られた知見をまとめる。

- (1) 耐震設計された RC ラーメン高架橋は、速度 80km/h の車両衝突に対しても脚柱の鉄筋が降伏する程度の損傷であり、十分な耐衝撃特性を有するものと判断される。
- (2) 脚柱の巻立て鋼板補強は車両の衝突に対しても、損傷を軽減する効果が期待できる。
- (3) 示方書等^{1),2)}で規定されている 1,000kN の静的荷重は、概ね速度 20~40km/h の中間で車両衝突した場合の損傷状態に相当する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，pp.65-67，2002.
- 2) 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，pp.59-60，2004.
- 3) 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，2005.
- 4) 日本建築学会：構造物の耐衝撃設計ガイドラインに関するシンポジウム，pp.59-65，2010.
- 5) National Crash Analysis Center, Ford Single Unit Truck, <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，2007.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，pp.249-251，2002.