

2次元非線形有限要素を用いた動的解析によるRC橋脚横梁部の損傷の再現性

土屋智史¹・矢部正明²・秦 吉弥³

¹正会員 (株)コムスエンジニアリング (〒113-0023 東京都文京区向丘1-1-17 タカサキヤビル6階)

²正会員 (株)長大 構造事業本部 (〒505-0821 茨城県つくば市東平塚730)

³正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震によって橋梁に生じた被害の中に、写真-1に示すようにT型RC橋脚の横梁付け根部で損傷が生じた事例があった。T型RC橋脚の横梁付け根部で損傷が生じた橋は、福島県郡山市の国道4号あさ野バイパスが国道49号を跨ぐ箇所に架かる橋長280m、幅員9.75mの亀田大橋²⁾である。亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷の原因は、横梁の鉄筋量が少なかったために、その耐力が小さかったことが報告されている³⁾。文献3)では、橋梁の耐震設計において一般的に用いられている非線形梁要素を用いた解析モデルを用いて、T型RC橋脚を構成する各構造要素間の耐力の大きさをプッシュオーバー解析で明らかにしている。また、近隣で観測された地震動を用いて動的解析を行い、亀田大橋の地震応答を求めている。しかしその動的解析は、文献3)でも記述されているように、2011.3.1114:46東北地方太平洋沖地震の際に亀田大橋にどのような地震応答が生じたかを明らかにするための動的解析ではなく、亀田大橋の耐震補強前後の地震応答の変化に着目したものである。文献3)では、耐震補強前後の地震応答の変化から、亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷の原因を推定している。

本報告では、亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷を動的解析によって直接的に再現できないかを検討した。これは、動的解析が橋に生じた損傷を再現できることを示すことによって、動的解析の妥当性を確認するのが目的である。

橋の耐震設計作業の中で行われる動的解析は、設

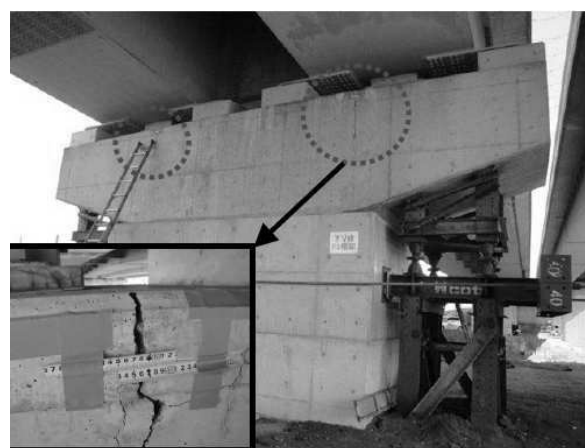
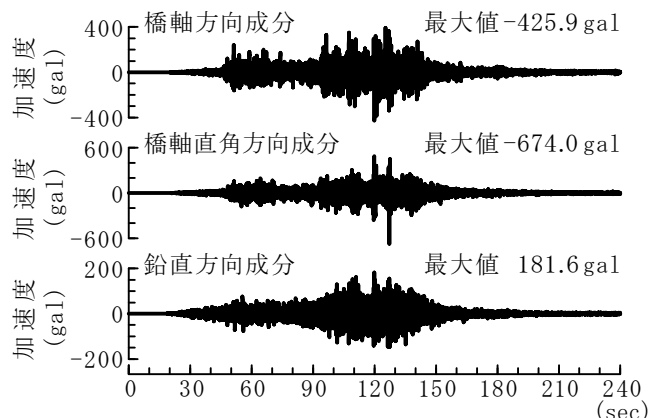


写真-1 亀田大橋横梁付け根部の損傷¹⁾

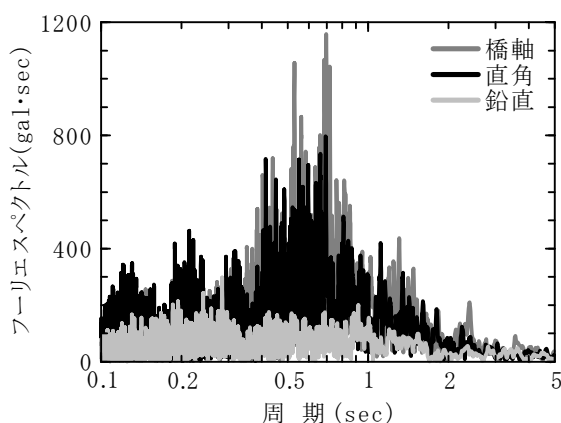
計基準等で規定された設計地震動という設計荷重に対する地震応答であり、その地震応答は設計基準で規定された設計クライテリア以下に留まることを前提に、動的解析が現実を模擬できているかを問われることはほとんどない。しかし、橋の対地震動に対する実力評価や、設計地震動の強度を超える地震動が作用した場合に橋がどのような状態となるかを予測するための参考指標の提示を動的解析に期待するのならば、動的解析には、地震動によって橋に生じる損傷をある程度模擬できる力が必要である。本報告は、誰が解析しても同じ解が得られるという動的解析の均質化ではなく、動的解析の実力を示す（＝質の高い動的解析を行う）ことによって、危機耐性に配慮した耐震設計に有用な情報を発信できるようにするという、性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会動的解析WGの活動の一環として実施されたものである。



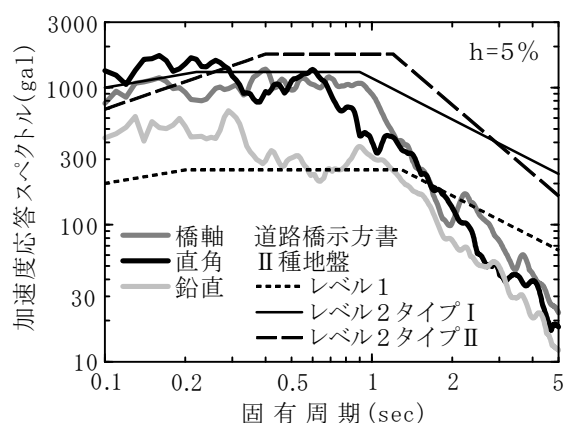
(1) 亀田大橋の橋軸方向と橋軸直角方向



(2) 亀田大橋周辺地盤上で推定された加速度波形



(3) フーリエスペクトル



(4) 加速度応答スペクトル

図-1 亀田大橋架橋地点周辺地盤上の 2011.3.1114:46 東北地方太平洋沖地震による地震動⁴⁾

2. 検討方針

亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷は、文献3)で用いられているような梁要素では、その損傷を直接表現することはできない。RC構造としての非線形性を考慮できる有限要素を用いる必要がある。著者らは、亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じたひび割れの深さに関する情報を保有していないので、文献3)に示された亀田大橋の構造条件を参考に、2次元非線形RC要素を用いて、亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷（ひび割れの発生位置）を再現できるかを検討した。用いた解析コードは、WCOMD⁶⁾である。

2011.3.1114:46東北地方太平洋沖地震の際に亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷を再現するためには、亀田大橋の架橋地点周辺の地盤上に生じた地震動を動的解析の入力地震動とする必要がある。本報告では、秦らによって既存強震観測点（JMA郡山等）と亀田大橋周辺地盤上のサイト増幅特性の類似性を考慮して推定された地震動⁴⁾を図-1に示す2次元非線形RC要素モデルに作用させた。

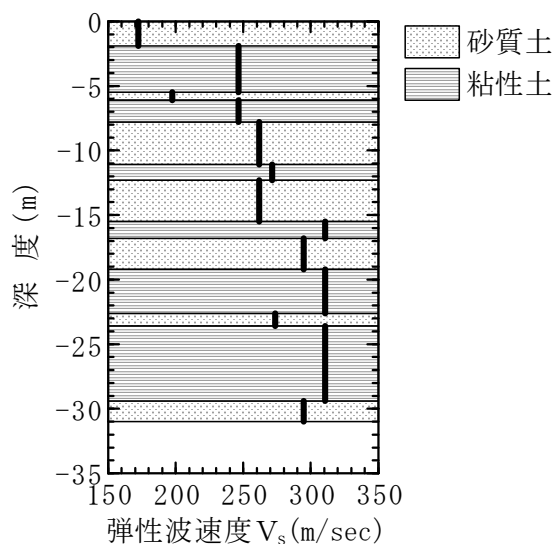
3. 入力地震動

図-1は、秦らによって推定された亀田大橋周辺地盤上の地震動を、橋軸方向と橋軸直角方向に座標変換したものである。前述したように動的解析モデルが2次元モデルであることと、亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷から、橋軸直角方向成分と鉛直方向成分を作用させた。

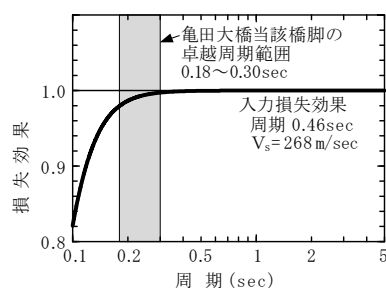
図-1の(4)に示すように、橋軸直角方向成分は、道路橋示方書V耐震設計編に規定されるレベル2地震動を周期0.3秒よりも短周期域でその応答レベルが大きく得られている。本報告では、図-2に示すように、入力損失効果を橋軸直角方向成分に乗じた入力地震動も作成し、入力損失効果を考慮しても、亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部の損傷を再現できるかを検討した。入力損失効果は、室野らが提案する方法⁵⁾によった。

4. 解析条件と載荷条件

図-3 に解析モデルを示す。材料特性は、文献 3)



(1) 亀田大橋周辺地盤の表層地盤条件



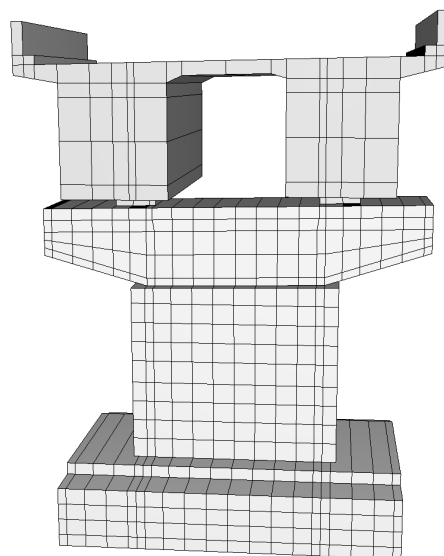
(2) 亀田大橋杭基礎構造の入力損失効果

図-2 入力損失効果のモデル化

を参考に、次のようにした。コンクリート： $f_c=21 \text{ N/mm}^2$ ， $f_t=1.751 \text{ N/mm}^2$ （既設部），主鉄筋： $E_s=200 \text{ kN/mm}^2$ ， $f_y=295 \text{ N/mm}^2$ （既設部），支承部、箱桁部： $E=200 \text{ kN/mm}^2$ の弾性要素（単位体積重量ゼロ），床版部： $E=200 \text{ kN/mm}^2$ の弾性要素（総重量 818.7851 tonf 相当の単位体積重量）

モデル化の概要を以下に示す。

- ・ フーチングと橋脚および横梁は、材料特性や構造形状、配筋に応じた非線形 RC 要素としてモデル化し、支承部と箱桁部および床版部は弾性要素とした。
- ・ 非線形 RC 要素は、鉄筋配置に応じた要素分割を行った。鉄筋は、2 方向の要素鉄筋比としてモデル化し、鉄筋配置部には RC 要素を配置し、Tension Stiffening/Softening を材料構成則に基づいて設定した。その他の領域には無筋コンクリート要素を適用した。
- ・ 橋脚基部部では、鉄筋の伸びだし等の局所変形を考慮する。ただし、巻き立て補強部は、フー



※黄緑色が非線形 RC 要素，橙色が弾性要素

図-3 2次元非線形 RC 要素による亀田大橋のモデル

チングに定着していない。

- ・ かぶりコンクリートの剥落，主鉄筋の座屈や破断は考慮していない。
- ・ 上部構造における 2%の横断勾配を考慮した。

解析では、STEP=2 までに自重と鉛直下向き荷重を載荷し、それ以降に加地震動を作用させた。地震動は、主要動部 20～200 秒間の波形を作用させた。

鉛直下向き荷重は、支持するべき上部構造重量（死荷重反力）を 1044.37 tonf とし、橋梁全体の固有値解析より得られた橋軸直角方向の固有振動モードの有効質量比より求まる 818.7851 tonf を差し引いた値を 2 か所の支承に配分したものである（112.79245 tonf×2）。

5. 亀田大橋の地震応答と損傷の再現性

図-4は、床版中央位置水平変位の応答波形と橋軸直角方向水平変位と鉛直方向変位のリサージュを示したものである。地震開始後約42秒でひび割れが発生し、約52秒で横方向鉄筋が初降伏し、約120秒で縦方向鉄筋が初降伏した直後に橋軸直角方向の正側最大応答変位が生じ、その約8秒後に橋軸直角方向の負側最大応答変位が生じている。リサージュ図より、鉛直方向変位は、明らかに、上部構造が橋軸直角方向に大きく変位することによって生じていることがわかる。

図-5は、最大主ひずみ分布を示したものである。主ひずみは、引張を正として表示しているため、図

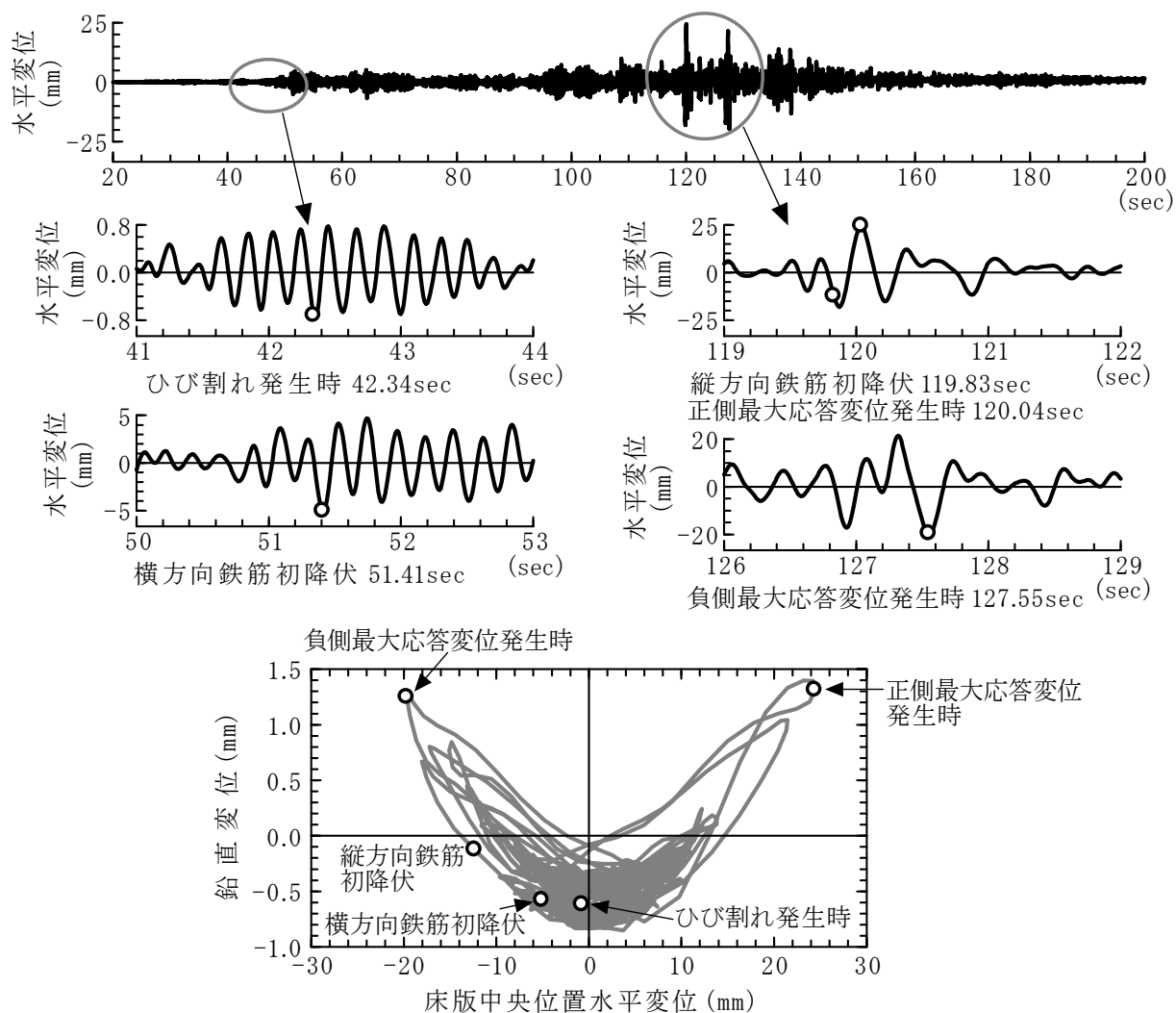


図-4 2011.3.1114:46 東北地方太平洋沖地震による亀田大橋の地震応答（上部構造応答変位に着目）

より、上部構造が橋軸直角方向に大きく変位した際には、橋脚基部の端部と横梁付け根部に、引張ひずみが生じることがわかる。横梁付け根部の引張ひずみは、押込み側では橋脚躯体と横梁の面に沿うように躯体の内側に進展しており、引抜き側では橋脚躯体の巻立て部と横梁の境界部を起点に上側に進展していることがわかる。地震動作用終了時の残留引張ひずみは、橋脚基部端部よりも、横梁付け根部の方が大きいことがわかる。

また、入力損失を考慮した地震動による応答の方が、横梁付け根部に大きな引張ひずみや地震動作用終了時の残留引張ひずみを生じさせていることがわかる。

6. まとめ

既存強震観測点と亀田大橋周辺地盤上のサイト増

幅特性の類似性を考慮して推定された地震動を2次元非線形RC要素でモデル化した亀田大橋に作用させることによって、亀田大橋のT型RC橋脚の横梁付け根部に生じた損傷を再現できることがわかった。損傷の再現性は、入力損失効果が無視した場合よりも考慮した場合の方が高かった。

橋の耐震設計に用いる動的解析の妥当性の検証は、橋を対象とした集中的な地震観測システムによって観測された橋の地震応答、それも、地震動強度が強い地震動によって励起された橋の地震応答の観測記録を動的解析で再現することで実現できる。しかし、わが国で橋の地震観測が集中的に行われている事例は極僅かである。そのような状況下では、地震動強度が強い地震動によって励起された橋の地震応答の観測記録を得ることは奇跡に近い。事実、2016年熊本地震では、地震動強度が大きかった地域で、橋の地震応答を観測したという報告は現れていない。こ

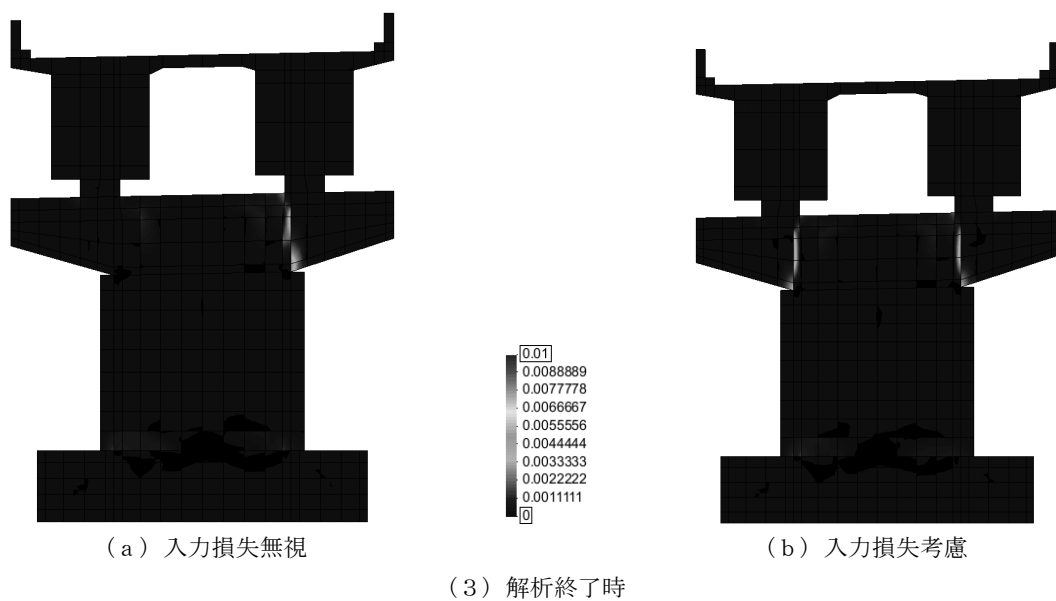
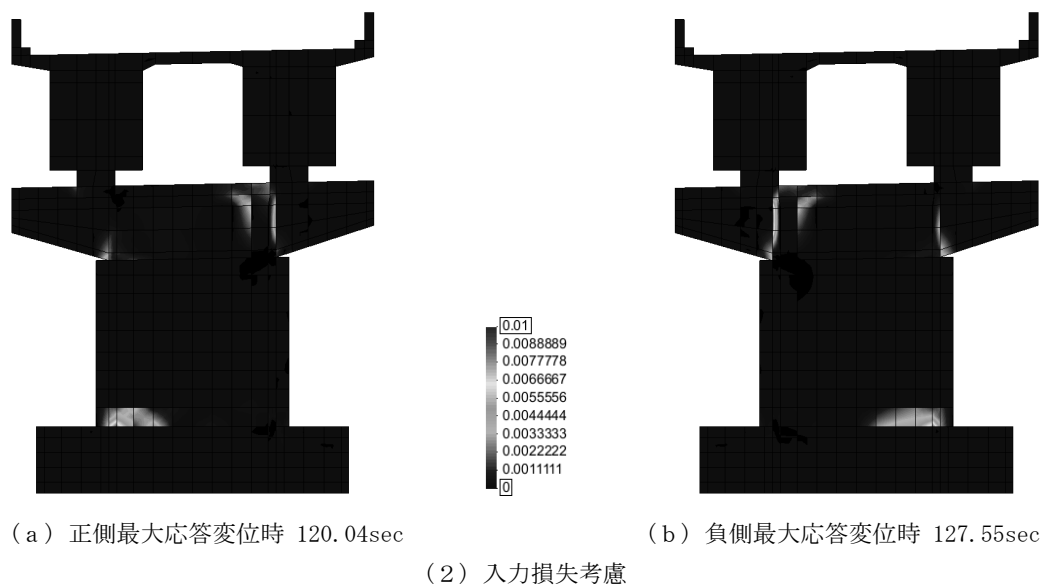
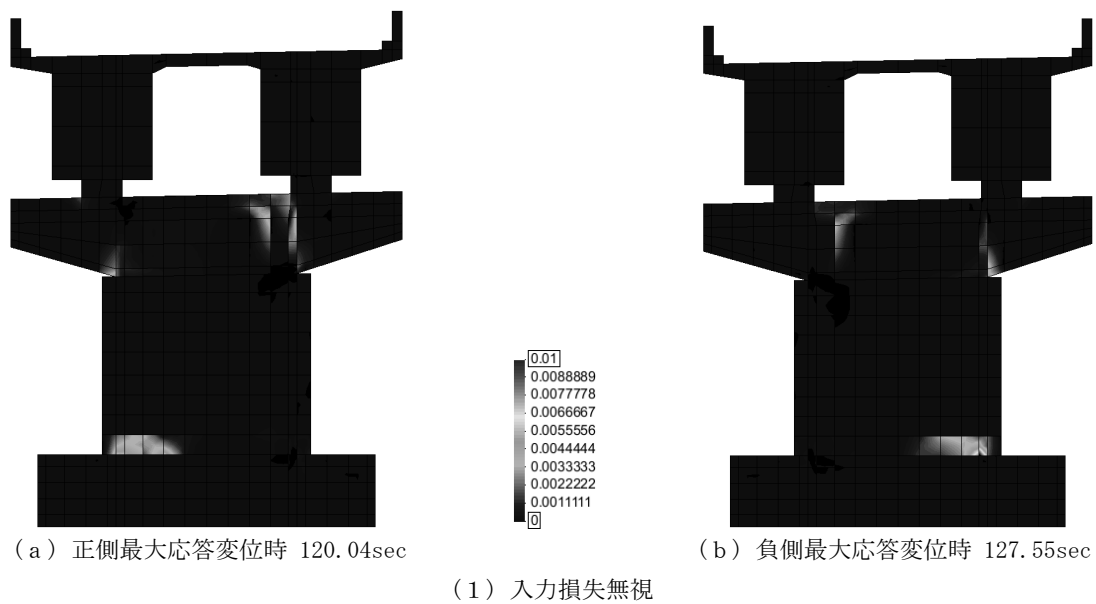


図-5 2011.3.1114:46 東北地方太平洋沖地震で亀田大橋に生じた損傷状態（最大主ひずみ分布）

のような状況下でできる橋の耐震設計に用いる動的解析の妥当性検証は、地震動によって橋に生じた損傷を動的解析によって再現できることを示すことである。橋に生じた損傷を動的解析によって再現できることの示した方には様々な方法がある。文献3)のように、橋の耐震設計で通常用いられる動的解析モデルを用いて、それより得られる地震応答と竣工図書から推定した耐力の大小関係から、橋に生じた損傷を類推することもできるが、本報告で行ったように、架橋地点の地震動を推定し、それを損傷を表現できる2次元非線形RC要素で作成した動的解析モデルに作用させるという方法もある。前者の方法は、入力地震動や解析モデルを高度化することなく、質の良い技術者がそれらの足りなさを補いながら説明性を確保している。後者の方法は、入力地震動の推定や動的解析モデルに高度な技術の要素が必要となるが、第3者への説明のし易さは、前者よりも圧倒的に優れていることがわかる。

謝辞：国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループの星隈順一上席（現国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長）には、亀田大橋の構造諸元についてご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室・危機管理技術研究センター地震防災研究室、独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター：東北地方太平洋沖地震による橋梁の被災調査概要報告，調査日：平成23年3月12日～3月18日，pp.7
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料第646号，土研資料第4202号，pp.403-406，2011.
- 3) 篠原聖二，張広鋒，星隈順一：柱躯体部が耐震補強されたT形RC橋脚における横梁の地震時損傷メカニズム，土木学会構造工学論文集Vol.60A，pp.316-325，2014.
- 4) 秦吉弥，矢部正明，土屋智史，中村晋：臨時余震観測に基づく2011年東北地方太平洋沖地震による亀田大橋での強震動の評価，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.493-498，2015.
- 5) 室野剛隆，坂井公俊：短周期の卓越した地震動が橋梁・高架橋の耐震設計に与える影響評価，鉄道総研報告，Vol.26，No.11，pp.5-10，2012.
- 6) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.
- 7) 土木学会コンクリート委員会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.439-494，591-609，2013.
- 8) 白鳥正樹，塚越誠一，吉田有一郎，中村均，堀田亮年，高野直樹：工学シミュレーションの品質保証とV&V，丸善出版，2013.