

AR（拡張現実）を用いた震災資料保管庫構造物 の新たな展示方法の検討

服部匡洋¹・幸左賢二²

¹ (一財) 阪神高速先進技術研究所 調査研究部 橋梁・構造研究室

² (一財) 阪神高速先進技術研究所テクニカルアドバイザー

要約

近年 AR や VR を用いてさまざまな情報を可視化する技術が開発されてきている。兵庫県南部地震から 30 年が経ち、当時震災を経験した方々が少なくなる中で、これらの新たな技術を震災資料保管庫の案内等で補助的に活用することで、被災構造物の特徴や破壊メカニズムに関する理解をより深められる可能性がある。そこで、本検討では被災構造物 1 基を対象に 3 次元モデルを構築し、そのモデルや解析結果の AR 表示を行い、AR 表示の新たな展示方法としての適用性を検討した。

キーワード: AR (拡張現実), 3 次元モデル, FEM, 解析結果, 可視化

1. はじめに

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震から 30 年が経過した。未曾有の都市直下型地震に見舞われ、構造物の落橋や倒壊を受けた阪神高速では、この経験を後世に伝えるため、1999 年 10 月より震災資料保管庫を開設し、被災構造物を体系的に保管することで被災構造物を通した地震エネルギーの大きさを体感するだけでなく、構造物の損傷・破壊メカニズムや、震災等当時の関係者の対応、震災を教訓とした新たな技術等の取り組みについても紹介している。

兵庫県南部地震が発生した直後から、阪神高速や研究機関、大学等により、損傷・破壊した構造物の被害分析が実施され、技術的知見として道路橋示方書¹⁾や設計基準第 2 部²⁾等に反映されてきた。これらの被害分析については、長大橋やピルツ橋脚区間を対象としたものが多く、一般高架橋を対象とした事例は少ない。また、震災資料保管庫に実際にある被災構造物の区間を対象として実施されたものはない。さらに、RC 橋脚のせん断破壊や鋼製橋脚の座屈などの損傷についても、実験による検証は実施されているものの、橋脚または橋梁全体系を対象とした再現シミュレーションの事例は限られている。

また、近年シミュレーション結果を AR・VR を用いて表示させる技術が開発されてきており、これらを震災資料保管庫の案内等で活用することで、被災構造物の損傷メカニズムに関する理解が深まると考えられる。図-1 に AR 技術を用いた構造物の展示イメージを示す。震災資料保管庫にある構造物は、構

造物の一部を切り出して展示している。視察者が損傷を受けた構造物や AR 表示用のマーカー等にタブレットあるいはスマートフォン（以下、スマホ）をかざすと、画面上に構造物の 3D モデルが表示され、構造物の寸法や配筋状況を示すことができれば、構造物の全体像をより直感的に理解できると考えられる。また、予め実施した FEM 解析等により得られた変形図やひび割れ図、鉄筋ひずみのコンター図を併せて示すことができれば、損傷メカニズムに対す

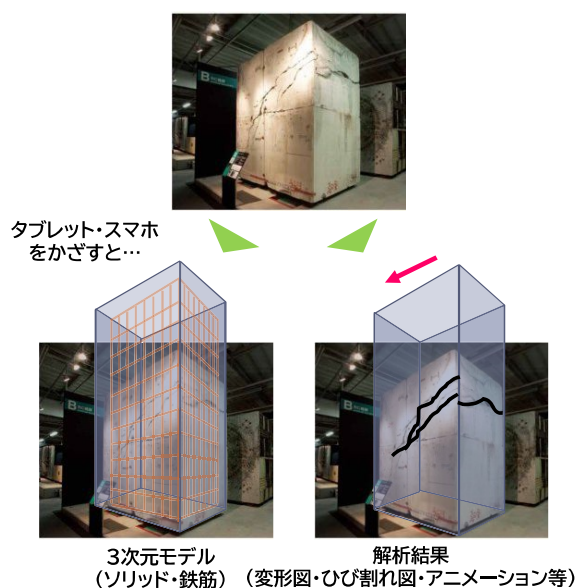


図-1 損傷を受けた構造物の AR 展示イメージ

るより理解が深まると考えられる。

以上を踏まえ、兵庫県南部地震での被災構造物の再現シミュレーションを実施するとともに、その 3 次元モデル及びシミュレーションを AR 表示させるツールの開発を行う。

なお、本稿では、損傷を受けた構造物の 3 次元 FEM モデルの作成とその試解析結果を用いた AR 表示の実現性と課題について報告する。

2. 対象構造物の選定

表-1 に 1995 年兵庫県南部地震以降に、被害原因の分析として解析的検討が実施された事例を示す。表-1 より、635 m に渡って倒壊したピルツ橋脚や、支承の損傷に伴い大きく桁移動した六甲アイランド橋、ペンデル支承が損傷し桁端部で浮き上がりが生じた東神戸大橋などの長大橋を対象に実施されたものが多く、一般高架橋を対象とした事例はあるものの、それほど多くないことがわかる。

表-2 に震災資料保管庫に展示されている構造物

(RC 橋脚・鋼製橋脚)を示す。震災資料保管庫では、鋼上部構造、RC 橋脚、鋼製橋脚、支承の 4 つのグループに分けて展示されているが、本検討は構造物の 3 次元モデルを作成し、配筋状況や解析結果を AR 表示させることを目的とするため、一般的な動的解析で実施されるような梁要素での全体系の解析ではなく、実構造物をより詳細にモデル化する FEM 解析を実施し、表示させることが適切と考えた。このため、広く 3 次元 FEM 解析が実施されている RC 橋脚を本検討の対象とした。

また、兵庫県南部地震における RC 橋脚の被害の特徴の 1 つとして、軸方向鉄筋の段落とし部での曲げせん断破壊が挙げられるが、特に“段落とし部”や“曲げせん断破壊”，視察者にはなじみのない土木用語であり、AR 表示を説明の補助として用いるのに適すると考えられる。このため、震災資料保管庫での同様の破壊形式に区分されている神 P-629 を対象に選定した。図-2 に神 P-629 の兵庫県南部地震直後の被害状況と震災資料保管庫での展示状況を示す。震災資料保管庫では横置きで展示されている。

表-1 1995 年兵庫県南部地震で損傷・破壊した構造物の再現解析事例

No.	論文・文献名	執筆者	発刊元	年度	対象
1	大震災を乗り越えて	阪神高速道路公団	阪神高速道路公団	1997	神P-126～142(ピルツ橋脚)
					西P-167
					神P-39～43
					西宮港大橋
					東神戸大橋
					六甲アイランド橋
2	東神戸大橋の兵庫県南部地震時の応答シミュレーション	山崎・Ganev・石崎・北沢	第24回地震工学研究発表会講演論文集	1997	東神戸大橋
3	兵庫県南部地震による鋼ローゼ橋の被害原因の動的応答解析による検討	頭井・北田・中井・加賀山	鋼構造論文集第5巻第18号		六甲アイランド橋
4	兵庫県南部地震による阪神高速3号線高架橋崩壊被害のメカニズム解析	西川・目黒	第24回地震工学研究発表会講演論文集	1997	神P-39～43
5	兵庫県南部地震における鋼製ピン支承の破壊プロセスに関する実験的考察	大塚・山平・増田・栗木	鋼構造論文集第7巻第28号	2000	(特定できず)
6	1995年兵庫県南部地震における3径間連続高架橋の被害分析	阿部・柳野・藤野・橋本	土木学会論文集No.668	2001	(特定できず)
7	兵庫県南部地震における鋼桁損傷要因の分析と耐震性向上策の検討	山平・大塚	土木学会論文集No.669	2002	(特定できず)
8	大規模地震における落橋メカニズムと落橋防止構造の効果に関する分析	堺・連上・星隈	土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.67	2011	神P-39～43
9	阪神・淡路大震災時における阪神高速道路3号神戸線の挙動解析	吉見・磯部	計算工学講演会論文集	2019	神P-126～142(ピルツ橋脚)

表-2 震災資料保管庫に展示されている構造物 (RC 橋脚・鋼製橋脚)

(a) RC 橋脚				(b) 鋼製橋脚			
対象	橋脚番号	橋梁形式	破壊形式	対象	橋脚番号	橋梁形式	破壊形式
B-1	神P-73	単純桁	基部の曲げせん断破壊	C-1	神P-353	単純桁	局部座屈
B-2	神-36	5径間連続	基部の曲げせん断破壊	C-2	神P-609	単純桁	われ
B-3	神P-236	単純桁	基部の曲げ破壊	C-3	神下P-580	単純桁	局部座屈・われ
B-4	神P-629	単純桁	段落としの曲げせん断破壊	C-4	神下P-584	単純桁	局部座屈・破断われ
B-5	神P-32	3径間連続	せん断破壊	C-5	神P-6	単純桁	座屈
B-6	神P-54	単純桁	基部の曲げせん断破壊	C-6	神P-371	単純桁	基部のき裂



(a) 損傷状況



(b) 展示状況

図-2 対象構造物（神 P-629）の損傷状況及び震災資料保管庫での展示状況

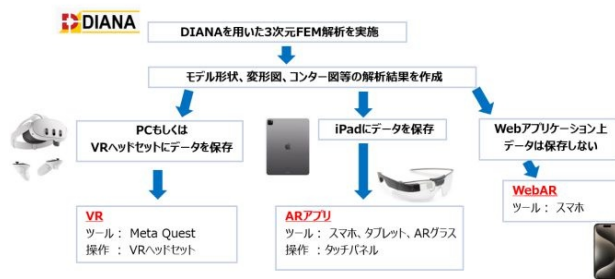


図-3 考えられる AR 表示方法

表-3 AR 表示方法の比較

種類	メリット	デメリット
ARアプリ	- WebARに比べると精度が高く、動画やアニメーション、CG、音声といったコンテンツが表示できる。 - 事前にアプリをダウンロードしておけば、指定の場所に行き、空間にカメラをかざすだけでAR体験ができる。	アプリをダウンロードする手間がかかる。あるいはデバイスを用意しておく必要がある。
WebAR	アプリをダウンロードする手間がかからないので来客者のハードルが低い。	- FEM解析結果をステップごとに表示・切り替えるには不向き。 - OSやスマートフォンの種類によっては非対応になる。

3. AR 表示方法の検討

(1) AR 表示までの流れ

図-3 に考えられる AR 表示方法を示す。本検討では、汎用解析プログラム DIANA を用いた 3 次元 FEM 解析を実施する。モデル形状や変形図、コンター図等の解析結果を XR（VR：仮想現実，AR：拡張現実，MR：複合現実）表示するには、図-3 に示す主に 3 つの選択肢が考えられる。1 つ目は VR ヘッドセットを用いる、あるいは PC 上のデスクトップモードで操作する VR（仮想現実）表示である。2 つ目は予め iPad などのタブレットにアプリをインストールして用いる AR 表示である。3 つ目はスマホを Web アプリケーションに接続した WebAR である。その他にも AR グラスなどのデバイスを用いた MR 表示などがある。

(2) AR 表示ツールの特徴

AR アプリとは、スマホやタブレットなどのデバイスを使用するユーザーに対して、AR 体験を提供するアプリケーションである。また、WebAR とはアプリを使わずに QR コードや URL を読み込んで利用するタイプのサービスである。

表-3 にそれぞれの AR 表示方法の特徴を示す。AR アプリは WebAR に比べると精度が高く、動画や

アニメーション、CG、音声といったコンテンツが表示可能である。また、事前にアプリをダウンロードしておけば指定の場所で空間にカメラをかざすだけで AR 体験ができることがメリットである。しかし、アプリをダウンロードする手間がかかること、デバイスを用意しておく必要があることが課題である。一方、WebAR はアプリをダウンロードする手間がかからないため、視察者が用いるハードルが低いのが特徴である。しかし、コンテンツとして作成できる容量が AR アプリほど大きくできない。

本検討は、震災資料保管庫を視察する個人が所有するスマホに構造物や FEM 解析結果を表示することが目的であるため、視察者が手軽に利用できる WebAR を用いた可視化について検討する。

(3) AR 表示での位置合わせ

AR においては、現実と仮想の表示を合わせる必要があり、次のような位置合わせ方法がある。

a) マーカー型

QR コードのようなマーカーを AR カメラで認識する。また、マーカーではなく、写真や絵を読み込んで AR を呼び出すことも可能である。

b) 空間認識型

AR カメラを通じて、アプリが自動でカメラを捉えている空間の奥行や広さを計算し、空間に沿うよ

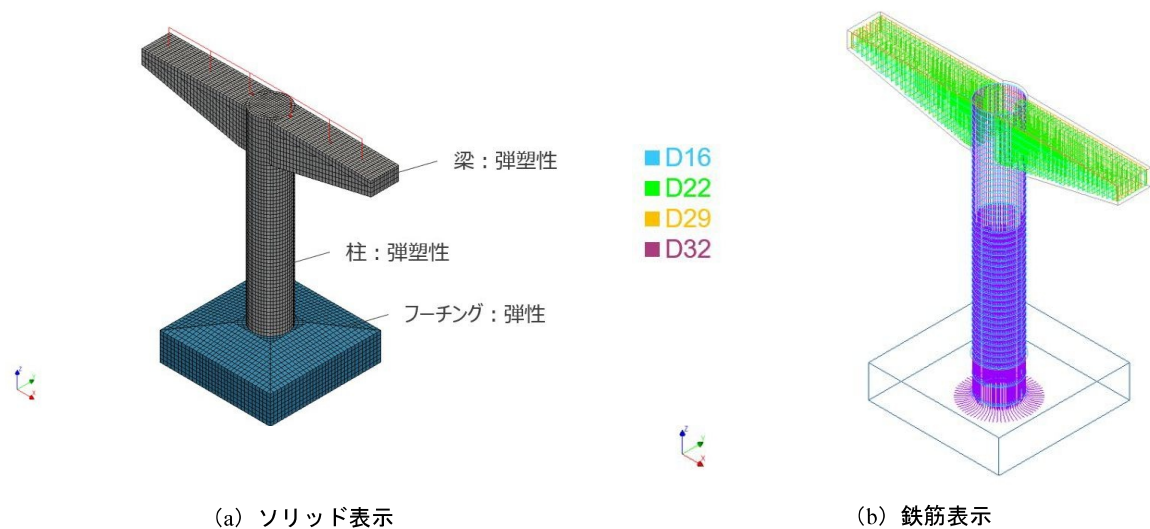


図-4 3次元FEM解析モデル

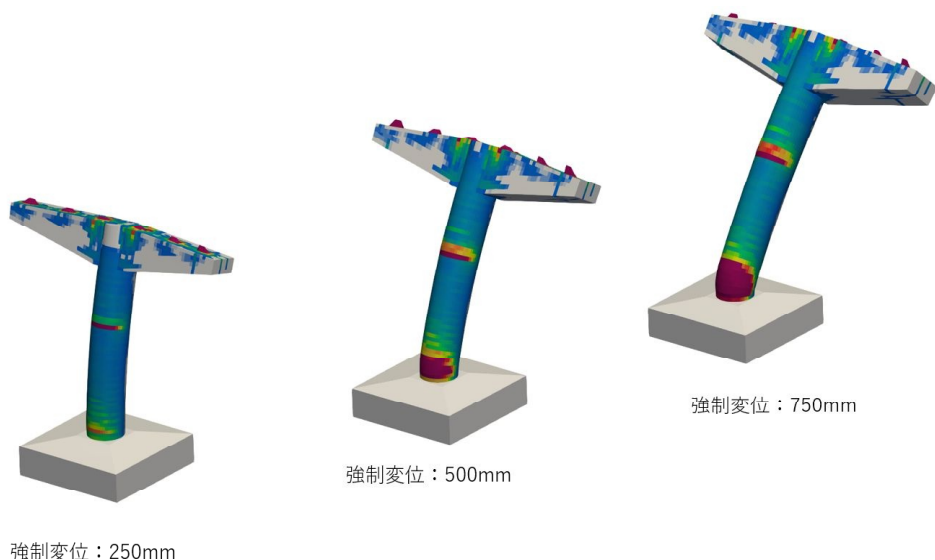


図-5 3次元FEM解析結果の一例（ひび割れひずみ：変形倍率20倍）

うな形でARオブジェクトを表示する。

c) GPS型

スマホの位置情報サービスを活用してARコンテンツを表示するアプリで、地図アプリなど、ユーザーの位置情報を有効活用する分野で用いる。

震災資料保管庫は広く、室内であるため、空間認識型やGPS型は不向きである。従って、本検討ではマーカー型を用いることとする。

4. 3次元FEM解析の概要

(1) 解析モデルの概要

図-4に3次元FEM解析モデルを示す。本検討では、神P-629の柱1基を解析対象とした。梁・柱・フーチングはソリッド要素でモデル化し、梁及び柱に対しては軸方向鉄筋と横拘束鉄筋を埋め込み鉄筋

要素によりモデル化した。また、梁及び柱については材料非線形性を考慮した。杭基礎は集約ばねによりモデル化した。コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度は設計基準強度を用い、コンクリートのひび割れモデルは直行固定ひび割れモデルとし、また、本検討は試行段階であるため、荷重は上部構造から作用する慣性力を模擬するため、強制変位により静的荷重を作用させた。

(2) 解析結果の概要

図-5、図-6には橋軸方向加震時の3次元FEM解析結果の一例を示す。図-4に示したように柱の軸方向鉄筋の段落とを考慮している。図-5にはひび割れひずみのコンター図を示しており、ひび割れ幅の大きさと対応する。図-5より段落とし部付近でひび割れひずみが大きくなっていることがわかる。また、図-6でも段落とし部付近で鉄筋ひずみが大

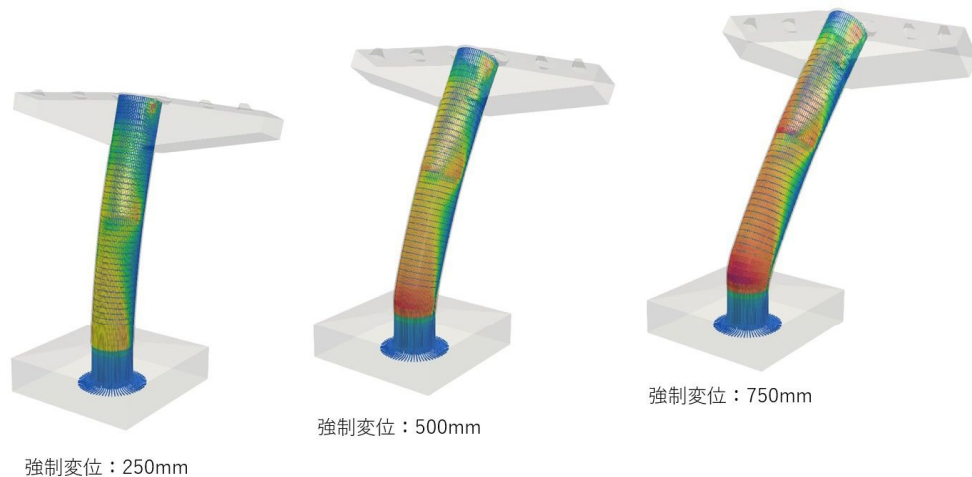
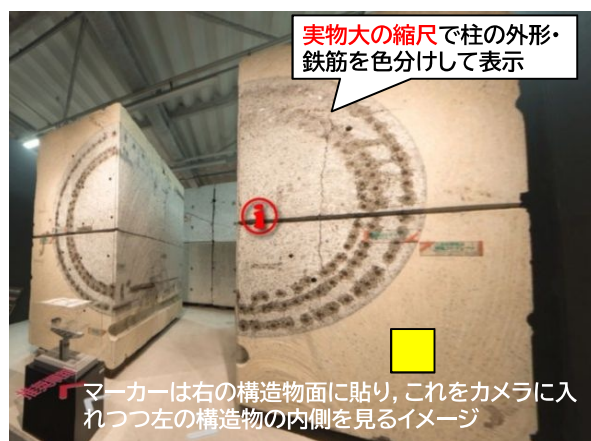


図-6 FEM 解析結果の一例（鉄筋ひずみ：変形倍率 20 倍）



(a) 実物大寸法での表示



(b) 模型寸法での表示

図-7 AR 表示の適用イメージ（（文献 3）に一部追記）

きくなっていることがわかる。一方で、段落とし部の損傷よりも基部での損傷が卓越しており、今後 3 方向同時の動的解析を行う、モデル化を改良する等、解析の再現性を高めていく必要がある。

5. AR 表示の試行

(1) AR 表示の適用イメージ

図-7 に震災資料保管庫における AR 表示の適用イメージを示す。図-7 に示すとおり、本検討では、構造物を実物大寸法で表示する案と模型寸法で表示する案の 2 案について検討する。前者では、スマホを展示構造物にかざすと、構造物に実物大の 3 次元モデルや配筋図が重ねて表示されるとともに、変形やコンター図がアニメーションで表示されることを想定する。後者は、構造物の前に展示してある模型に 3 次元モデルや解析結果が投影されることを想定する。

(2) 実物大寸法での表示

図-8 に実物大寸法での表示の試行結果を示す。図-8 には 3 次元 FEM 解析モデルで作成した配筋状況を示しており、展示している構造物が横置きされていることを考慮し、横置きした状態で柱基部から頂部側を向いている。図-8 より軸方向鉄筋の段落とし部がかろうじて認識できるものの、鉄筋が込み合うなど全体像がわかりづらい。今回の方法では位置合わせのためのマーカーをスマホの画角に入れておかなければ 3 次元モデルが表示できないため、対象物が大きい場合には表示させる範囲を絞る、あるいはマーカーを大きくする等、改善の余地が必要と考えられる。

(3) 模型寸法での表示

図-9 に模型寸法での表示の試行結果を示す。図-9 では 3 次元 FEM 解析結果で得られた変形図やひび割れひずみ図、鉄筋ひずみ図を示している。模型寸法では配筋や解析結果の全体像を把握しやすいことがわかる。また、アニメーションで表示させること

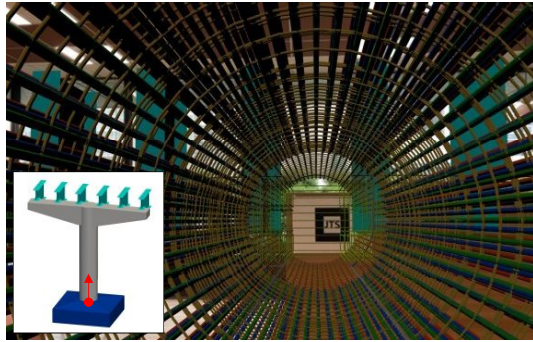


図-8 実物大寸法での表示の試行



(a) ひび割れひずみ



(b) 鉄筋ひずみ

図-9 模型寸法での表示の試行

も可能であることを確認しており、模型にスマホをかざすと模型が変形しはじめたり、段落とし部に損傷が生じることを AR で表示することも可能であることを確認した。

6. おわりに

本検討では、震災資料保管庫に展示されている構造物の1つである神 P-629 を対象に、3次元 FEM 解析を実施し、実物大寸法及び模型寸法での AR 表示の試行を行った。本検討により得られた知見を以下に示す。

- ・ 3次元 FEM 解析を用いて神 P-629 の段落とし部での曲げせん断破壊の再現解析を試みた結果、段落とし部でのひび割れや鉄筋ひずみの増大を再現できた。一方で、段落とし部での損傷よりも基部の損傷が卓越する結果となり、今後再現性を高めるため、動的解析の実施やモデル化の改善が必要と

考える。

- ・ 3次元モデルや解析結果の AR 表示を試み、配筋状況や変形図及びひび割れ図等のアニメーションを AR で表示することが可能であることを確認した。ただし、実物大寸法で表示する場合の表現には課題が残っており、今後表示範囲を絞る等の改善が必要である、

本検討については、今年度も引き続き研究を実施し、震災資料保管庫での実装を目指す。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.
- 2) 阪神高速道路(株)：設計基準第2部構造物設計基準（橋梁編）第5編耐震設計，2021.
- 3) カンサイドボクスタイル：バーチャル震災資料保管庫，<https://kansai-doboku-style.com/shinsaihokanko/>（2025年4月7日閲覧）