

論文 没入型多面ディスプレイを用いた3次元RCひび割れ解析結果のビジュアライゼーション

高橋敏樹^{*1}・前川宏一^{*2}

要旨: 3次元構造解析の高度化に伴って、入力データの作成及び出力結果の処理を行う前処理及び後処理ツールの重要性が増している。本研究では後処理に着目し、CABINと呼ばれる全天周没入型多面ディスプレイを用い、有限要素法による3次元RCひび割れ構造解析結果をバーチャルリアリティー空間内でコンピュータグラフィックスの立体映像として視覚化する手法を提示する。RCラーメン高架橋の動的解析応答のアニメーション及び多方向せん断力を受けるRC柱内でのひび割れの3次元分布を主な視覚化対象として扱う。

キーワード: 構造解析、ひび割れ、視覚化、仮想現実、CABIN

1.はじめに

鉄筋コンクリート構造物を設計するに当たり、その性能照査手法として構造解析プログラムの重要性は増している。RC構造の有限要素解析の研究は2次元解析から始まり、適応対象は3次元解析へと移りつつある^[1]。これは、複雑な構造形状ならびに荷重条件を持つ様々な構造物をそのまま忠実にモデル化する事ができる利点を有する。入出力データは2次元解析においては前処理、後処理共にGUIを用いた操作が可能であるのに対し、3次元解析ではコンソールアプリケーションによる入力データの作成、また出力データの評価が行われている。膨大な入力データの作成、また多次元的な出力データの評価をグラフィックスなしで行うのは難しい状況になりつつある。

本研究ではRC構造3次元有限要素解析プログラム「COM3」^[1]のポストプロセッシングに主眼を置き、視覚化を主とした没入型多面ディスプレイを用いたポストプロセッサーの開発を行った。対象構造物は、3次元動的解析（はり要素使用）の応答のアニメーション表示と、固体要素、ならびに板要素内の導入ひび割れの立体表示を主な対象に選定した。

多次元的な広がりを有するグラフィックスを有効に表示するためのデバイスとして、CABIN

と呼ばれる全天周没入型多面ディスプレイ^[2]を用いる。この小部屋は、体験者がその内部で立体映像により構成されるバーチャルリアリティー空間を体験することが出来るというものである。本研究ではポストプロセッサーを開発し、それにより構造解析の入出力データをVRMLグラフィックデータフォーマットに変換して、CABIN内で立体映像として表示することにより得られる、効果的な後処理について考察する。

2. 視覚化に用いるツールの概要

2.1 CABIN

CABINとは、東京大学 Intelligent Modeling Laboratory (IML) に備えられている全天周没入型多面ディスプレイのことであり^[2]、この装置により立体映像の仮想現実空間が体験できる。CABINのシステム設計と開発は、東京大学大学院機械系研究科広瀬研究室により行われた^[2]。

CABINの概観は図-1にあるように、上下、左右、正面の5面をスクリーンで囲まれた、一辺2.5mの立方体の小部屋である。CABINシステムの構成は図-2のようであり、各スクリーンにはそれぞれ各プロジェクターから映像を背面投影する。各プロジェクターには一台のグラフィックワークステーションが各々接続されており、各プロ

^{*1} 東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤工学専攻, (正会員)

^{*2} 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻, 工博 (正会員)

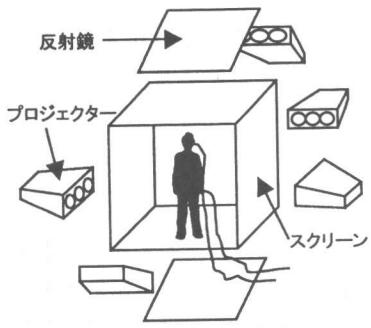


図-1 CABINの概観

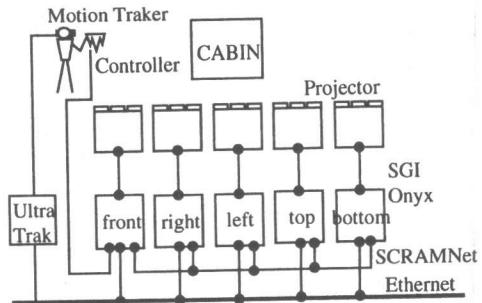


図-2 CABINの構成

プロジェクターの映像を制御している。CABIN の大きな特徴の一つとして、CABIN 内で体験者が自由に 3 次元移動して、視点の位置、向きを変えられることが挙げられる。立体視のために体験者は液晶シャッタ眼鏡を、仮想空間内を移動するためにコントローラーを、また体験者の位置と向いている方向を把握し、それに応じて映像を作り出すために位置センサーが液晶シャッタ眼鏡に取り付けられている。

CABIN には一度に 3 人の体験者が入ることが可能であるが、完全な立体映像を体験できるのは位置センサー付き液晶シャッタ眼鏡の装着者のみである。しかし、位置センサーの非装着者が極端にセンサー装着者と離れるなどの場合を除けば、非装着者でも十分な精度の立体映像を体験できる。

2.2 Virtual Reality Modeling Language (VRML)

CABIN 内でグラフィックスを表示する場合、OpenGL グラフィックスライブラリを用いた C 言語によるデータと、仮想現実空間記述のために開発されたグラフィックスデータフォーマットである VRML データとを用いることができる。前者の方は個々のコンテンツに細かな設定や特殊な操作などを加えることができるが、プログラミングに要する時間は長くなる。それに対し、後者は比較的簡単にデータを作成することができ、また、複数のグラフィックスを連続的に表示してアニメーション化できる事などから、様々な構造解析結果をポストプロセッサーにより即座に作成したいという本研究の目的に合致するため、後者の手法をここでは採用している。

VRML(Virtual Reality Modeling Language)はそれまで HTML を軸とした 2 次元コンテンツが中心であった Web ブラウザ上で、3 次元の仮想現実空間を記述する必要性から開発された仮想現実空間記述のための構造化言語であり、1994 年の秋に VRML1.0 が発表された。本研究におけるポストプロセッサーの開発においては、CABIN 以外の VRML ビューアとして、シリコングラフィックス社の VRML ビューアアプリケーションを使用した。

CABIN では複数の VRML ファイルを連続的に表示することができ、構造解析のアニメーション表示が可能である。また、アニメーション表示すると同時に、CABIN 内の体験者は視点の移動が可能であり、様々な角度から動いているオブジェクトを観察することができる。当然、構造物部材の中にまで仮想空間を旅することができる点に従来からの 2 次元グラフィックスとの根本的な違いがあるのである。

3 ポストプロセッサー

3.1 ポストプロセッサーの概要

本研究におけるソフト開発の中心は、構造解析プログラムの入出力データ及び簡単な設定ファイルから VRML ファイルを自動生成するポストプロセッサーを作り上げることである(図-3)。設定ファイルでは、構造物を表現するポリゴンや線分の色、また、VRML ファイルを作成する解析の計算ステップを選択できる。CABIN でグラフィックスを表示する場合にはグラフィックス中で用いられている総ポリゴン数に制限がある。ア

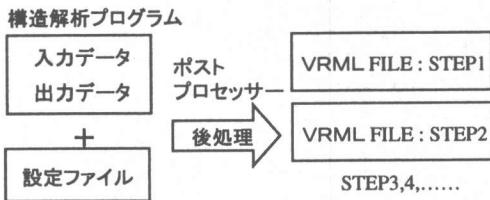


図-3 VRMLファイルの作成

アニメーション表示の場合も同様で、複数のグラフィックスをあわせた総ポリゴン数に制限がある。解析の要素分割が細かくなるほど構造物描画に用いられるポリゴン数は増加して行くが、COM3で用いている分散ひび割れモデルでは、比較的大きな要素と粗い分割で解を得ることができるので、容量上の問題は特に重要ではない。むしろ問題となるのは動的解析の場合であり、計算ステップが非常に多い場合はアニメーション用いるファイル数が多くなるため、全ての計算ステップを表示することは困難になる。そのため、構造物が終局状態に至る加速度の大きな部分のみを表示する場合などにグラフィックス化するステップを選ぶ必要性が生じる。

3.2 構造物の形状の表現

VRML では、基本的に三角形のポリゴンによりオブジェクトを描画する。VRML ファイルの構造は図-4 の様であり、PointSet ノード (HTML のタグのようなもの) で点の座標を指定してゆき、

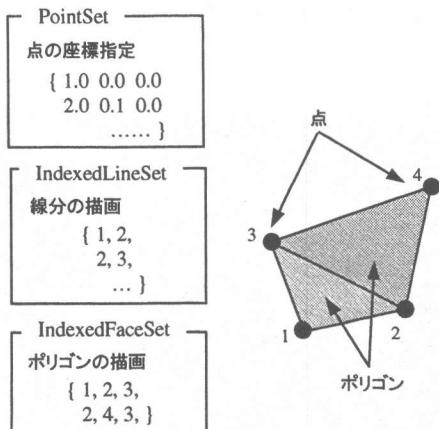


図-4 構造物の描画

IndexedLineSet ノード、IndexedFaceSet ノードにより線分及びポリゴンを描画する。まず構造物を構成するポリゴンに用いられている全ての点をその座標により規定してゆき、その中からポリゴンを形成する三つの点を選び、ポリゴンを作成してゆく。線分の場合には線分の両端の二点を指定する。即ち VRML は有限要素解析の基本幾何データと極めてなじみのよい言語となっているのである。解析前の初期状態における構造物形状に関しては、VRML ファイル中の点の座標データは解析入力データの節点情報から読み取り、ポリゴンを形成する点の番号は要素情報の要素頂点の節点番号から読み取ればよい。

解析後の任意の計算ステップにおける構造物形状は、初期状態において指定した節点の座標を出力ファイル中の節点の変位を用いて補正して使用する。各ポリゴンを形成している点の番号は不变であるため、ポリゴン情報はそのまま使用する。

3.3 導入ひび割れの視覚化

解析プログラムでは 3 次元 RC 固体要素および RC シェル要素において分散ひび割れを考慮している^[1]。構造物の非線形性に大きな影響を与えるひび割れの分布を 3 次元的に視覚化することは、現象理解の大きな手助けとなる。

解析の中でひび割れの有無は各ガウス点ごとに判定され、ひび割れが発生していればその方向がひび割れ面の法線ベクトルで与えられる。この情報から固体要素においてひび割れ面をガウス点上の薄い正方形の板として表現することを試みた(図-5)。ひび割れ幅に関しては、ガウス点での全体座標系でのひずみテンソルからひび割れ面法線ベクトル方向の直ひずみを計算し、その値により板厚を変化させてひび割れ幅の大小を表現するようにした。3 次元交番くり返しを対象範囲としている COM3 では、固体要素中の一つのガウス点で同時に 3 方向のひび割れを考慮することができるが、視覚化においては簡単のため、ひび割れ幅の最も大きなひび割れのみを選択して描画することとしている。

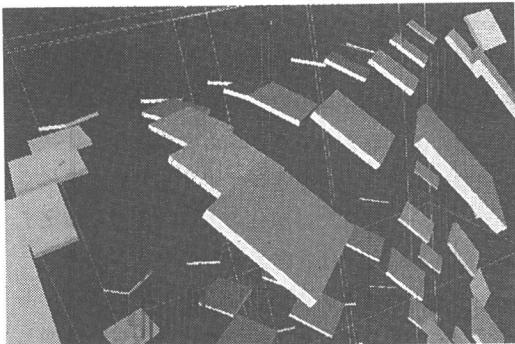


図-5 ひび割れの視覚化

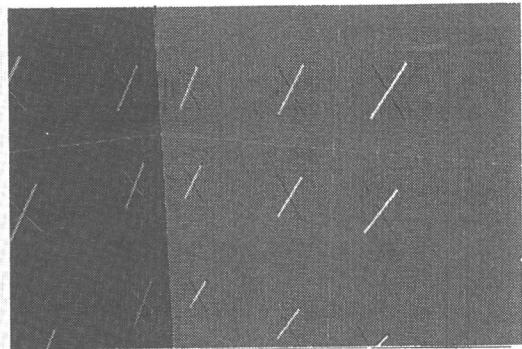


図-6 シェル要素のひび割れ

板要素を用いた解析の場合、ひび割れの方向は各要素の局所座標系での基準軸とひび割れ方向ベクトルとの角度によって規定される。この角度を固体要素と同様に線分としてひび割れを描画する（図-6）。厚さ方向の変形の自由度を縮退させている板要素では、ガウス点で同時に2方向のひび割れを考慮することができ、2方向にひび割れが発生している場合には、ふたつのひび割れを両方とも描画することとしている。固体要素に比べ、板要素の場合には2方向にひび割れを描画しても視覚的にそれほど複雑にならないためである。

4 CABINによる視覚化

4.1 RCラーメン高架橋の動的解析

先述のポストプロセッサーを用いて3径間RCラーメン高架橋の地震時応答解析結果のアニメーション表示を行った。3次元解析において地震波はNS方向、EW方向共に入力するので当然、構造物の地震動応答も複雑なものとなり、アニメーションによる構造物の応答挙動の観察は非常に有

効である。本解析では上部スラブ部分には固体要素を用いているが、橋脚部分には断面内の自由度を縮退した1次元非線形フレーム要素を用いている。入力データの要素情報から線材の有限要素をそのまま視覚化すると橋脚部分は単に線分となってしまう。工学的な解析支援ツールとしてこのシステムを利用する場合は、橋脚部分が線分であっても観察される構造物の地震動応答の様子は十分表現される。しかし、より直感的に現象を把握するために、本ケースでは図-7のように1次元フレーム要素を本来の断面を持った橋脚に、自由度を戻して表現することとした。そこで、フレーム要素中の一つの節点から、柱の頂点となる位置に4つの点を新たに作成し、それらを結ぶポリゴンを描画することにより直方体として橋脚を表現する。また、より現実の構造物の状態に近づけるために地表面形状を更に追加した。コンクリートの質感を出すために、構造物のポリゴンには灰色の模様でテクスチャマッピングを行っている（図-8）。

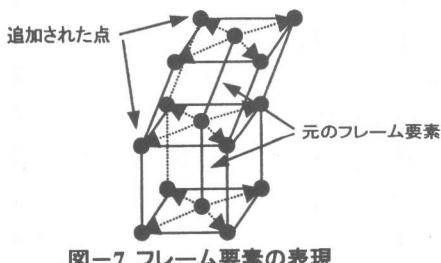


図-7 フレーム要素の表現

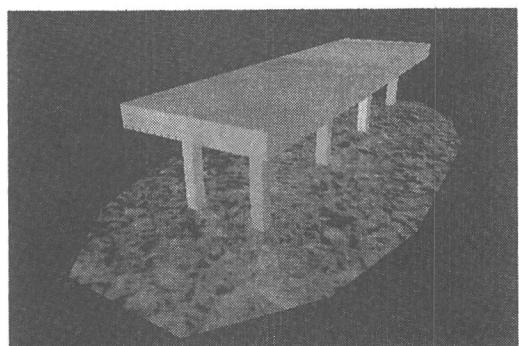


図-8 RCラーメン高架橋

この解析に用いた高架橋は傾斜地に建設されており、橋脚長が各橋脚毎に異なる。そのためCABIN内のアニメーションでは、長橋脚側の橋軸直角方向の揺れが、短橋脚側のそれよりも大きい様子が橋脚上部の視点からよく観察される。また、この非対称に起因するねじり振動のモードが励起していることも体感される。振動中に自由に構造の各位置に連続的に“歩いて”様子を観察することができる。

4.2 RC 中実柱の2方向せん断ひび割れ解析

多方向入力を受けるRC柱内部のひび割れ面の視覚化を行った。図-9に示すように、RC柱にはまずZ方向の軸力とY方向の固定荷重が与えられ、その後X方向の変位を増加させて破壊に至らせる。この様な荷重条件の場合、X方向変位が増加するに従い、せん断面の方向は次第に変化する。ひび割れによる引張軟化は鉄筋に対するひび割れ面の方向に大きく依存するため、解析精度向上のためには鉄筋とひび割れ面との角度に応じ

て、適切な引張軟化曲線を与える必要がある^[3](図-10)。柱内に発生するひび割れの分布やひび割れ面方向を視覚化することはそのための大きな手助けとなる。その結果を示したのが図-11である。図-11はZ方向軸力とY方向の固定荷重が与えられた時点での導入ひび割れの様子であり、柱下部引張側にはすでに曲げひび割れ、および斜めのせん断ひび割れが発生している。図-12はX方向変位が与えられ、破壊に至る直前のひび割れの様子であり、ひび割れの発生している要素が増加し、ひび割れ面の方向も斜め方向に変化している。このように、X方向変位が増加するにつれ、ひび割れ方向が3次元的に変化していく様子や、またひび割れの発生領域が広がっていることがアニメーションとして連続的に観察できる。これらの連続的変化を3次元的に表現するのは従来の1面スクリーン型のグラフィックスではとても処理しきれないものである。このような比較的小な供試体の視覚化においては、オブジェクトを側面から観察することや、しゃがんで下から見上げる

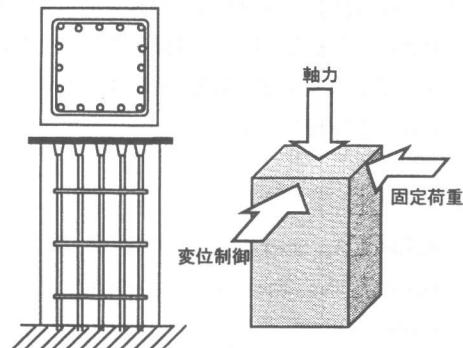


図-9 RC柱の多方向入力

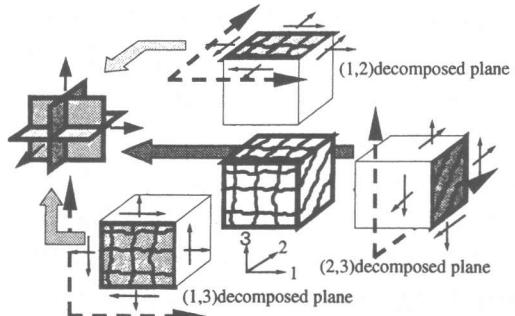


図-10 3次元RC固体要素のひび割れ

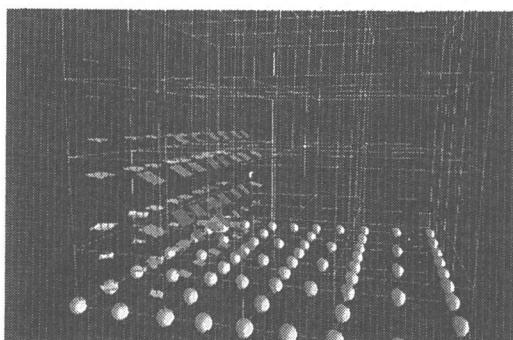


図-11 中実柱の多方向入力1

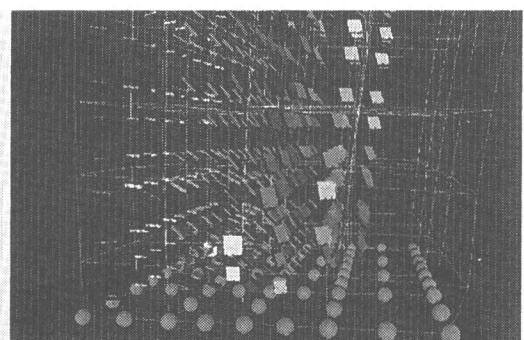


図-12 中実柱の多方向入力2

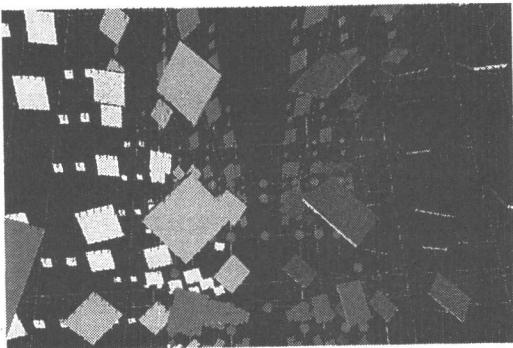


図-13 ねじり問題のひび割れ

ことなどが、コントローラーを用いることなく、CABIN 内で体验者が実際に少し移動するだけでリアルタイムで行える。なお、図中の球は基盤固定面上にある拘束された節点を表す。

次に、RC 柱にねじりを加えた場合の 3 次元ひび割れ分布の視覚化を行った。ねじり問題の場合、そのひび割れパターンは実験において外側に見えているものは観察できるものの、内部にどのようなひび割れが発生しているのかはイメージしにくいものである。図-13 はひび割れの分布であるが、中心軸のまわりに渦を巻くようなパターンのひび割れが発生していることが、柱軸方向からの視点でよく観察される。実際には立体的に入ったひび割れを部材内に“入って”見ることはできないが、この仮想空間では、あらゆる場所に“行き”、360 度の方向に視点をまわすことができるので、3 次元的な力の流れやひび割れを、早く感覚に取り込むことが可能となった。また、この視覚化はひび割れが進展している様子も観察ができる。この解析では要素分割が比較的細かく、全てのガウス点においてひび割れを描画しているので、ひび割れを表す小板が多くて見づらくなったりもある。要素分割が細かい際には要素内の 8 個のガウス点でのひび割れを平均化して一つのひび割れに代表させる、などの簡略化が必要と考えられる。また、ひび割れを表す小板の大きさは有限要素の大きさに対応して決められるようになっていくので、要素分割の粗い柱中央部付近でひび割れが大きいように感じられる。また、ひび割れの幅はひび割れの大きさに対応して決められるので、

同じく柱中央部付近のひび割れの方がひび割れの幅も大きいように感じられる。視覚的にはこのように大きく描画されたひび割れの方がより支配的なひび割れのように感じられるが、実際にそうとは限らない。このように、実際の構造物の状態と、視覚的に得られる構造物の状態のイメージとの差をよりつめてゆくことは今後の課題である。

5 結論

構造解析プログラムの入出力データから、構造物形状及び導入ひび割れ視覚化のための VRML グラフィックスデータを自動作成するポストプロセッサーを開発し、解析結果を視点の移動にしたがって仮想現実空間内の立体映像をアニメーション表示するシステムを開発した。動的解析結果のアニメーションでは、構造物の地震応答、ならびに最終的な倒壊方向などの様子が非常に分かりやすく表現された。導入ひび割れの視覚化においては、通常では観察不可能な構造物内部のひび割れの進展と分布の様子が解析ステップを追つて表示され、多方向入力による斜めひび割れの進展によるせん断破壊の様子などを視覚的に捉えることが可能となった。なお、本研究で開発されたシステムは、東京大学、IML 研究棟において体験することが可能である。

【参考文献】

- [1] Maekawa, K., Irawan, P. and Okamura, H. "Path-dependent three-dimensional constitutive laws of reinforced concrete formulation and experimental verifications," Structural Engineering and Mechanics, Vol.5.No.6, 1997, pp. 743-754
- [2] 広瀬通孝、小木哲朗 「没入型多面ディスプレイシステムの開発」
日本機械学会 第6回設計工学・システム部門講演会講演論文集、1996
- [3] Hauke,B. and Maekawa, K., "Three-dimensional RC model with multi-directional cracking," Proc. Of EURO-C, 1998