構造解析結果の可視化における立体はり要素の変形形状の拡大方法について

名古屋工業大学　学生会員　斉藤　信　　名古屋工業大学　正会員　後藤　芳顯
岐阜工業高等専門学校　正会員　奥村　徹　名古屋工業大学　正会員　小畑　誠

１.はじめに: 構造解析により得られた複雑な立体構造物の変形挙動や地震時における動的挙動に関する数値データを映像化し視覚に基づいてその特性を把握できるようにすることは有効である．本研究室では CG を利用して, 大変形した立体はり要素の変形形状を一般的な有限要素解析プログラムの入力情報と出力情報である節点変位，回転角のみを用いて精度良く表現しうる汎用的な可視化方法を提示している [1)]．土木構造物を対象として可視化を行う場合, 一般的な外力作用下において構造物に発生する変位は構造物の規模に較べて小さいため，変形形状を視認することが困難な場合が多い．従って，構造物の変形形状をより明確にするためには変位を拡大する方法について考える必要がある．ここでは，立体はり要素の変形形状をはり理論の変形に関する仮定を満足し, 自然な形状で拡大する方法を提示する．

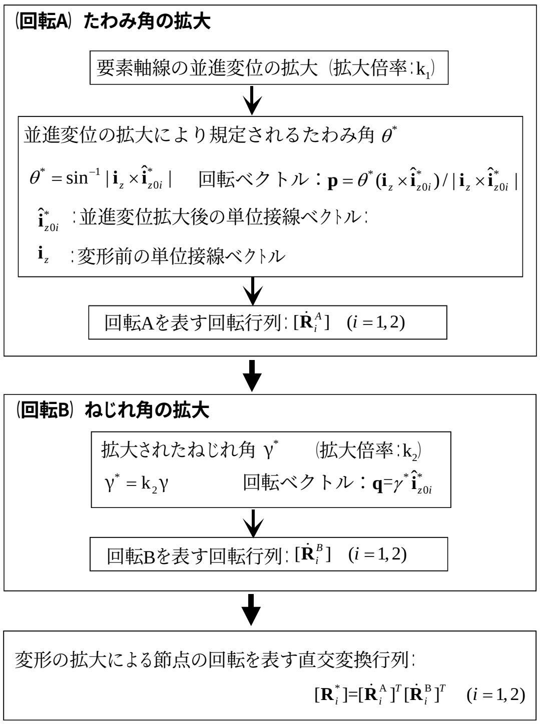
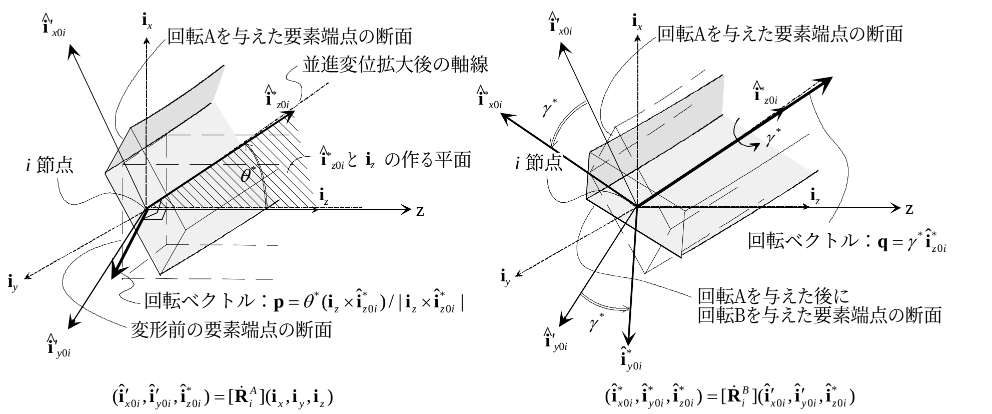


図-1 変形の拡大方法

２.立体はり要素の変形形状の拡大方法： Bernoulli-Euler はり要素を用いる場合, 簡易的にはり要素節点の並進変位成分と回転角成分にそれぞれ拡大倍率を乗ずる方法が通常用いられることが多い．この場合，回転成分については微小変位理論の近似的な扱いに基づく定式化が行われ, 拡大による節点の回転を表す直交変換行列$[\tilde{\mathbf{R}}_i]$は拡大回転前の節点の回転を表す直交変換行列$[\mathbf{R}_i]$（i=1,2）の微小回転角成分に拡大係数kを乗じた形で式(1)のように表される．

$$[\tilde{\mathbf{R}}_i] \simeq \begin{bmatrix} 1 & k\theta_{z0i} & -k\theta_{y0i} \\ -k\theta_{z0i} & 1 & k\theta_{x0i} \\ k\theta_{y0i} & -k\theta_{x0i} & 1 \end{bmatrix} \simeq k[\mathbf{R}_i] + (1-k)[\mathbf{E}] \qquad (1)$$

しかしながら厳密には，はり理論の場合，軸線の並進変位成分と回転成分とは完全に独立ではないので，回転成分に並進変位成分と同一の拡大倍率を乗ずることはできない．さらに，有限回転の場合，回転成分はベクトル量ではないため，回転角成分に拡大倍率を乗ずることで拡大した回転成分を求めることができない．よって，拡大後の回転成分が微小とみなせない場合には，式(1)により回転の拡大を行うとはり理論における変形の仮定（断面形状不変の仮定，Bernoulli-Euler の仮定）にそわない不自然な形になる．ここではこれらの問題点を改善し，はり理論の仮定に従う形で変形を拡大することを考



a) 回転 A（回転角 θ^*，回転ベクトル $\mathbf{p}$）　　**b)** 回転 B（回転角 γ^*，回転ベクトル $\mathbf{q}$）

図-2 節点の回転の拡大方法

キーワード：立体はり要素　変形の拡大　可視化　有限回転　コンピュータグラフィックス
連絡先：〒490-8555　名古屋市昭和区御器所町　Tel：(052)732-2111　名古屋工業大学

える．具体的なはり要素の変形の拡大手順を**図-1** に示す．まず軸線上の並進変位成分に対して拡大倍率 k_1 を乗ずることにより，並進変位の拡大を行う．並進変位を拡大することにより，要素軸線上の位置点 $(0,0,z)$ における並進変位拡大後の位置ベクトル $\hat{\mathbf{r}}_0^*$ は, 変形前の位置ベクトル $\mathbf{r}_0$ および変形後の位置ベクトル $\hat{\mathbf{r}}_0$ と並進変位の拡大倍率 k_1 を用いて次のように表される．$\hat{\mathbf{r}}_0^* = \mathbf{r}_0 + \mathrm{k}_1(\hat{\mathbf{r}}_0 - \mathbf{r}_0)$（式(2)）式(2)より軸線方向の単位接線ベクトル $\hat{\mathbf{i}}_{z0}^*$ は接線ベクトル $\hat{\mathbf{g}}_{z0}^* = d\hat{\mathbf{r}}_0^* / dz$ を用いて次式により求まる．$\hat{\mathbf{i}}_{z0}^* = \hat{\mathbf{g}}_{z0}^* / \left|\hat{\mathbf{g}}_{z0}^*\right|$（式(3)）従って，拡大後の軸線のたわみ形状から, たわみ角 $\boldsymbol{\theta}^*$ は一意的に規定されることになる．この軸線上の並進変位の拡大によって規定されるたわみ角に対する回転を回転 A とする（**図-2 a)**　参照)．残りの自由度のねじれに関する回転成分については回転 A を与えた後のはり要素に対して，$\hat{\mathbf{i}}_{z0i}^*$ を回転軸とする回転角 $\gamma^* = k_2\gamma$ の回転を与える．ねじれ角の拡大倍率 k_2 は任意に与えることが可能であるが，並進変位に与える拡大と同程度となるような拡大を考える場合には，各要素節点について拡大倍率 k_2 に拡大前後のたわみ角の比（$\mathrm{k}_2 = \theta^* / \theta$）を用いる．この拡大後のねじれに関する回転を回転 B とする．（**図-2 b)**　参照)．以上の手続きによって求めた回転行列 $[\dot{\mathbf{R}}_i^A]$, $[\dot{\mathbf{R}}_i^B]$（i=1,2）を用いて変形の拡大による節点の回転を表す直交変換行列を式(4)のように求めることができる．

$$\begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_{x0i}^* \\ \hat{\mathbf{i}}_{y0i}^* \\ \hat{\mathbf{i}}_{z0i}^* \end{Bmatrix} = [\mathbf{R}_i^*] \begin{Bmatrix} \mathbf{i}_x \\ \mathbf{i}_y \\ \mathbf{i}_z \end{Bmatrix} = [\dot{\mathbf{R}}_i^A]^T [\dot{\mathbf{R}}_i^B]^T \begin{Bmatrix} \mathbf{i}_x \\ \mathbf{i}_y \\ \mathbf{i}_z \end{Bmatrix} \qquad (4)$$

拡大後の節点の回転角を式(4)の $[\mathbf{R}_i^*]$ を用いてあらわせば，はり理論の変形の仮定を満足する形で立体はり要素の変形形状の拡大を行うことができる．

3. 結果および考察：　変位を拡大し, 変形形状を強調表示した例を**図-3** に示す．ここでは，長方形箱型断面を有するはり部材に 2 軸曲げとねじれ変形が生じている状態を，変形の進展に従って 3 段階に分け，各変形段階において変位を拡大表示した例を示している．2 列目には節点の並進変位成分と回転角を拡大する通常用いられる簡易的な方法による描画例を示しており，3 列目には，本手法を用いて拡大表示した例を示している．節点の並進変位成分と回転角を通常用いられる方法で拡大した場合には，拡大後の変形形状が大きくなると断面の大きさや形状が大きく変化し，はり理論における変形の仮定にそわない形状となることがわかる．一方，本手法を用いた場合には，はり理論の変形の仮定にそうような自然な変形形状で拡大できることがわかる．

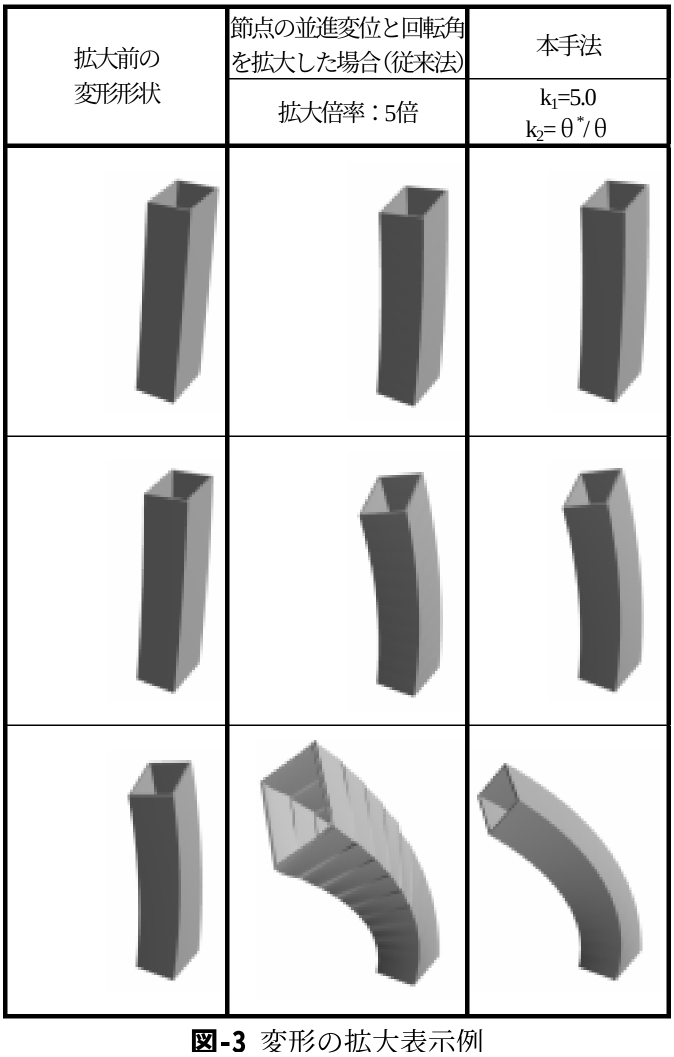


図-3 変形の拡大表示例

参考文献：

１）後藤　芳顕, 奥村　徹, 小畑　誠：大変形した立体はり要素の CG を用いた汎用的な可視化方法について，土木学会論文集，No.755，I-67，2004（掲載予定）