

回転加振と回転応答計測を利用した部分構造合成法の精度向上

Improvement of Building Block Approach Accuracy by use of Rotation Excitation and Rotation Detection

精密工学専攻 47号 松岡 優

Matsuoka Suguru

1. 緒言

計算(実験)の分業化, 実験と計算の一体化など様々な利点から Unit 毎の伝達関数を合成し System における伝達関数を予測する部分構造合成法がしばしば用いられる^[1,2,3]. しかし, 実験データに対し当手法を適用する場合, 実験機材の関係で並進方向のデータしか取得出来ないため, 結合点からのモーメントに寄与が高いローカルモードを見逃す, 結合部の回転方向の連続性を考慮できないなどの制限がかかり予測精度が低下してしまう問題がある. そのため結合点の回転自由度が重要になる. 回転応答, モーメントの計測法としては T-block を用いた方法^[4]や二つの三軸加速度計を用いた方法など様々な方法が考えられてきた.

本研究では T-block を用いた方法で多数の並進方向加振により回転方向の伝達関数を推定し, 部分構造合成法の精度向上を図る. しかしその過程で取得しなければならない並進方向の伝達関数の数が過大になってしまう. そこで System においてシステム伝達率法を用いて各結合点の回転応答を考慮して, 注目しているローカルモードをターゲットとする事で, 各結合点からのモーメントの寄与を求める事が出来る. 求めた特定の結合点の回転自由度だけを部分構造合成法に含めて計算する事である程度の予測精度を保ちながら部分構造合成法を実行できる手法を提案する.

2. 部分構造合成法の問題点

本章では図 1 に示す解析モデルを用いて Unit 単位で結合点からのモーメントに寄与が高いローカルモードの見逃しについての検証, ローカルモードを見逃して Unit1 および Unit2 単体の伝達関数から System の伝達関数を予測する部分構造合成法を行った場合の予測精度を検証する.

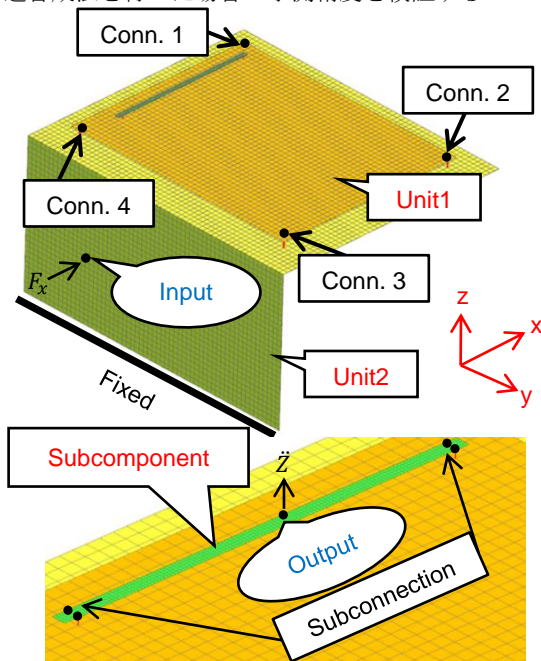


Fig. 1 Analysis model(System)

2.1 結合点からのモーメントに寄与が高いローカルモードの見逃しについての検証

本節の目的としては Subcomponent のみが Z 方向および X 軸回転で大きく振動するローカルモードが結合点からのモーメントに寄与が高い時, 並進加振ではそのモードが十分に励起できない事を確認する. Unit1 には Subcomponent が四つのパネで結合されており, また Unit1 の各結合点を加振点に, Subcomponent 上に応答点に設定する.

結合点 1 を Fz 加振, Mx 加振した時の応答点との伝達関数と結合点 1 の自己応答関数の比較を図 2 に示す. 結合点 1 の自己応答関数と Fz 加振では十分に励起されず Mx 加振で大きく励起されているピークが結合点からのモーメントに寄与が高いローカルモードとなる. 図 2 中のグラフでは 477.9Hz のピークがその特徴に該当している. またそのピークにおけるローカルモードを図 3 に示す. モードシェイプの特徴としては X 軸まわりに捻じれるモードとなっている. また本節には代表として結合点 1 の例しか載せていないが他の結合点に関しても同様の傾向を示している.

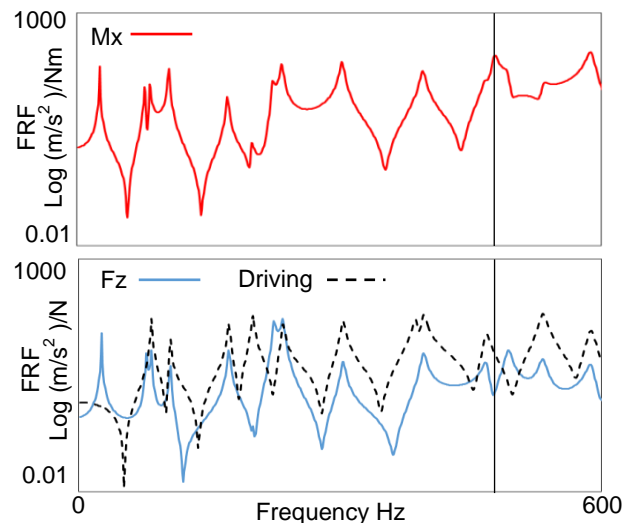


Fig. 2 Unit1_FRF(Conn.1-Output) and Driving(Conn.1)

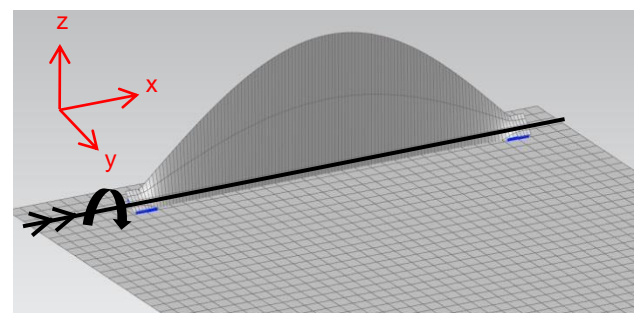


Fig. 3 Local mode shape(477.9Hz)

2.2 結合点の自由度選択による部分構造合成法の予測精度の検証

本節の目的としてはローカルモードを見逃した状態、つまり並進方向のみの Unit 単体の伝達関数を用いて周波数毎の伝達関数による部分構造合成法を行った場合、予測精度がどの程度低下するのか、また結合点で考慮する自由度を変更する事で振動予測の精度がどの程度変化するのかを検証する。比較する伝達関数は図1に示す System における加振点-応答点である。また Unit1 と Unit2 は4点で並進3方向、回転3軸まわりのバネにより結合している。

図4に結合点の全ての自由度を考慮して合成した際の加振点-応答点間の System の伝達関数と結合点の並進自由度のみを考慮して合成した伝達関数、結合点の並進自由度と X 軸まわりのモーメントを含めて合成した伝達関数の比較を示す。

図4に示すように並進自由度のみを用いて合成した場合、ねじりのローカルモード付近において振幅に差が出ているのが確認出来る。これは各結合点からの並進力ではねじりのローカルモードが十分に励起できていないため、並進方向の伝達関数を用いて合成しても十分に表現できないためだと考えられる。また、各結合点の並進自由度に結合点1の M_x 自由度を含めて合成した伝達関数が全自由度で合成した伝達関数とほとんどの周波数において一致しているのが分かる。これは結合点1の M_x 方向のモーメントがねじりのローカルモードに最も寄与が高いため、合成後も十分に表現できたと考えられる。したがって各結合点において全ての自由度を含めずとも、より寄与が高い結合点のモーメントを含める事である程度の予測精度を確保することが出来る。

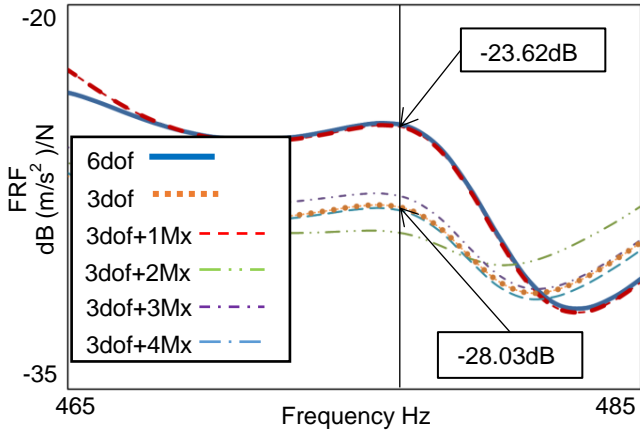


Fig. 4 System_FRF by BBA (Input-Output)

3. システム伝達率法を用いたねじりのローカルモードに対するモーメントの寄与が高い結合点の選定

前章では結合点における回転自由度の重要性を示した。しかし1章で述べたように、実験において回転加振を考慮する場合過大な並進方向の伝達関数が必要になってしまう。そこで図1に示す System において Target を応答点、更に各結合点の回転を経路に含めたシステム伝達率法を行う事でねじりのローカルモードに対するモーメントの寄与が最も高い結合点を明らかにし、その結合点の回転自由度のみを加えて合成する事でねじりのローカルモードに対する予測精度をある程度保ちながら、必要な並進方向の伝達関数と加振数の低減を図る。

式(1)に回転項を含めたシステム伝達率法の式を示す。

$$\begin{bmatrix} \ddot{Z}_t \\ \dot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \ddot{Z}_t \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 & \cdots & \dot{\theta}_n \\ \ddot{\theta}_1 & \ddots & \ddot{\theta}_n \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{\theta}_1 & \cdots & \dot{\theta}_n \\ \ddot{\theta}_n & \cdots & \ddot{\theta}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

\ddot{Z}_t [m/s²] は Target 点での応答、 $\dot{\theta}_n$ [rad/s²] は結合点 n での回転応答、 T_n [m] が Target の応答に対する結合点 n の伝達率を表している。更にこの伝達率 T_n に、対応する結合点の回転応答 $\dot{\theta}_n$ をかけた値が寄与度 [m/s²] となる。なお本章ではモーメントに寄与が高いローカルモードを対象にしているため、 θ_x 方向以外の経路は考慮していない。

式(1)を用いて求めたねじりのローカルモードに対する各結合点のモーメントの寄与度を図5に示す。グラフから読み取れるように結合点1の M_x 自由度が最も寄与度が高い。続いて結合点2、結合点3と4が概ね同じ寄与度を示している。また図4においても結合点1の θ_x 自由度を含めて合成した際のねじりのローカルモードにおける振幅が最も高い。続いて結合点3の θ_x 、結合点4の θ_x を含めた合成が概ね一致しており、最も振幅が小さいのが結合点2の θ_x を含めた合成である。結合点2の寄与度の順序だけ異なっているが、寄与度と振幅の傾向はほとんど一致している。したがってこの手法を用いる事でねじりのローカルモードに対する各結合点のモーメントの寄与度の大小関係を判別することが出来る。

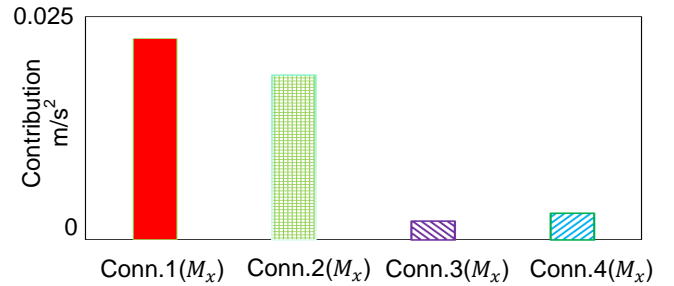


Fig. 5 Contribution from each connection

4. T-block を用いた回転加振、応答の計測

本章では図7に示す T-block を用いて、実験的に回転加振と回転応答を計測する理論を述べる。しかし、この理論、検証については既に他の論文で述べられているため詳しいことは割愛する。測定を行う手順を以下に示す。

回転伝達関数を計測したい点に T-block を剛に設置し、T-block に六点以上の加速度センサーを取り付ける。さらに T-block に対して六点以上の加振力を与える事で理論上計算が可能である。式(2)、式(3)を用いて T-block の設置位置 i における内力と応答を推定する。

$$U_i = [T_i]^T [R] + V^{(i)} \quad (2)$$

$$F_i = -[T_i]^{-1} [I_M] [R] + V - [T_i] F_{hammer} \quad (3)$$

U_i は T-block の結合点での応答、 R は変位変換行列、 V は T-block から計測された応答ベクトル、 I_M は T-block の質量、慣性モーメント行列、 T_i 、 T_i^T は力変換行列、 F_i は結合点の内力ベクトル、 F_{hammer} は実際に T-block に与えた加振ベクトル、右肩の 1 は加振位置を表している。式(2)、式(3)より求めた T-block の結合点における内力、応答を用いて式(4)より回転伝達関数を含んだ全ての自由度の伝達関数 H_{ii} (6×6) を得

ることが出来る。

$$[H_{ii}] = [U_i][F_i]^{-1} \quad (4)$$

また、次章の実験でT-blockを用いるが、その際の加振方向、加振回数、応答点を図7に示している。このように回転応答は三軸加速度計を四つ程取り付ける事により容易に求められるが、回転加振については多数の並進加振を正確に複数回行う必要があり、実用上出来るだけ少ない回転加振で部分構造合成法の精度を向上したい。

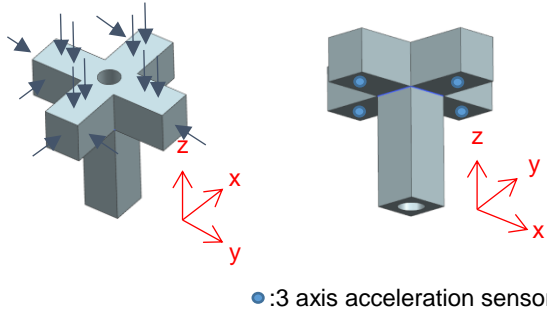


Fig. 7 T-block input(left) and output(right)

5. 簡略化した実際の検証

本章ではプリンターを用いて本手法の検証を行う。実験対象の簡略図を図8に示す。

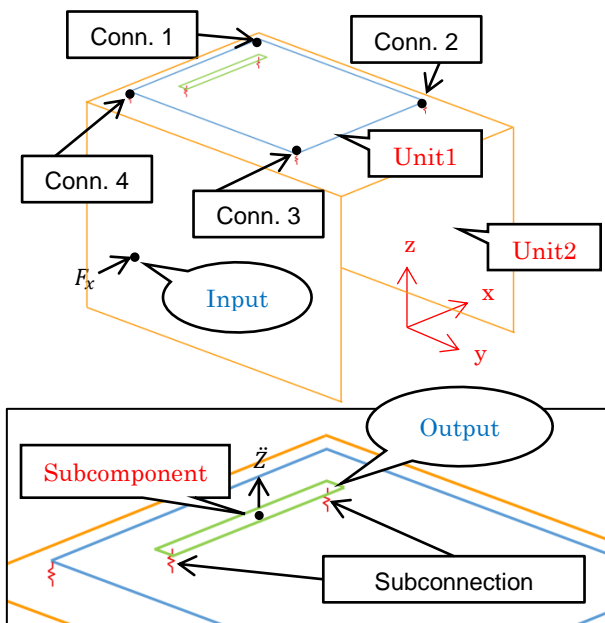
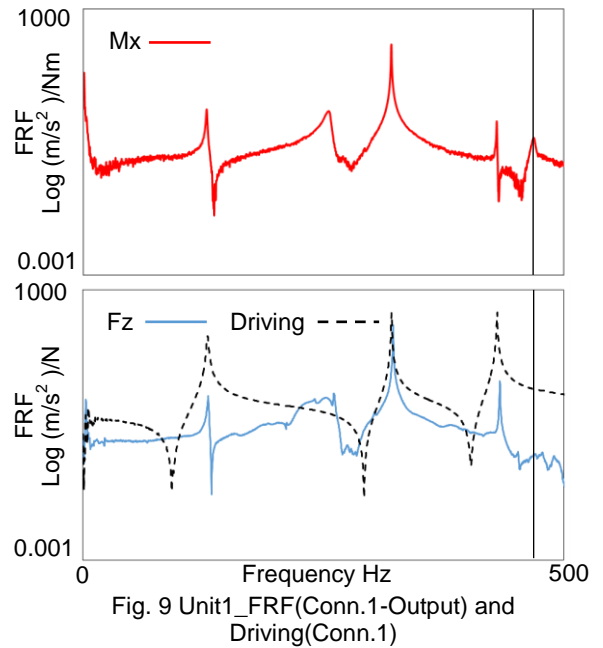


Fig. 8 experiment of printer system

5.1 結合点からのモーメントに寄与が高いローカルモードの見逃し

本節では解析と同様に結合点のモーメントに寄与が高いローカルモードの見逃しの検証を行う。結合点1をFz加振、Mx加振した時の応答点との伝達関数と結合点1の自己応答関数の比較を図9に示す。結合点1の自己応答関数でおよびFz加振では十分に励起されずMx加振で大きく励起されているピークが結合点からのモーメントに寄与が高いローカルモードとなる。図9中のグラフでは469.3Hzのピークがその特徴に該当している。



5.2 Z軸方向のみの伝達関数を用いた部分構造合成法

本章ではZ方向のみの伝達関数を用いて部分構造合成法を行った際の予測精度を検証する。比較するグラフは図8に示すSystemにおけるInput-Output間の伝達関数である。図10にSystemの状態を実験を行い、取得したInput-Output間の伝達関数とZ軸方向のみデータを用いて部分構造合成法を行い算出したInput-Output間の伝達関数の比較を示す。また470Hz付近にモーメントの寄与が高いローカルモードが存在するため400Hzから500Hzを拡大している。グラフから問題となっているローカルモード付近の振幅が大きく異なっている事が分かる。これは解析と同様に各結合点からの並進力(Fz)ではローカルモードが十分に励起できていないため、Z方向の伝達関数を用いて合成しても十分に表現できないためだと考えられる。また図11にSubcomponentのモードシェイプを示す。(a)が実測した正解値から算出したモードシェイプ、(b)が部分構造合成法から算出したモードシェイプになる。この二つのモードシェイプの違いとして、振幅の大きさが挙げられる。応答点をSubcomponent上に設定してあるためローカルモードの振幅はグローバルモードよりも大きくなる。(a)のモードシェイプの振幅は(b)よりも大きいため後者はローカルモードでは無いと考えられる。また二つ目の違いとして、(a)のモードシェイプはX軸まわりにねじれる形となっているが(b)は一次曲げの形をしている。したがってZ方向のみの伝達関数を用いて合成した場合、伝達関数の振幅、モードシェイプ共に異なる事が確認できた。

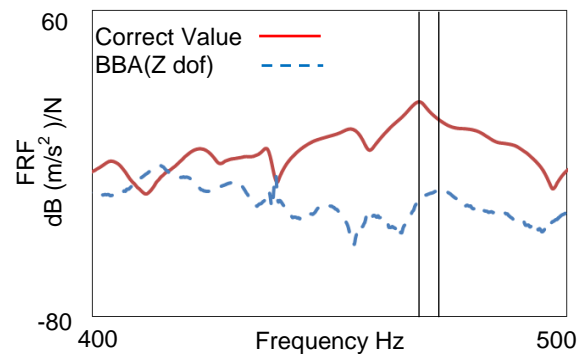
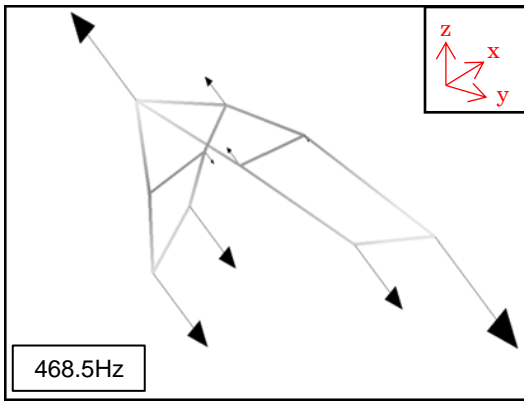
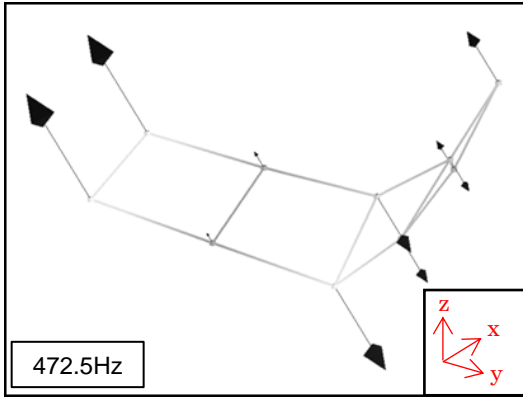


Fig. 10 Comparison of system_FRF by BBA(Input-Output)



(a) Correct Value



(b) BBA with only translation

Fig. 11 Local mode shape

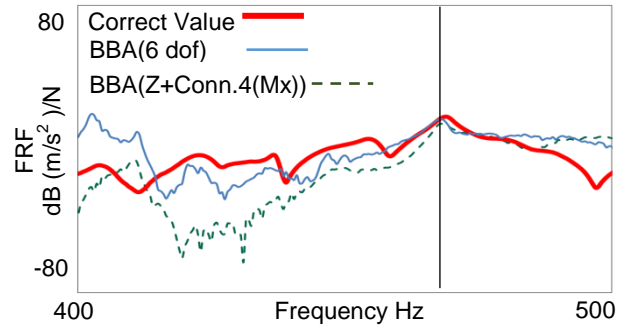


Fig. 13 Improved system_FRF(Input-Output)

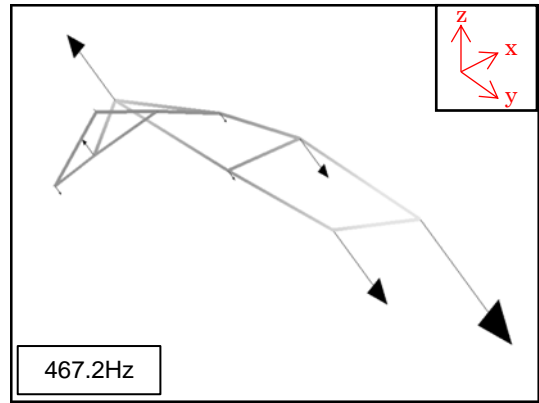


Fig. 14 Local mode shape by proposed method

5.3 モーメントの寄与が最も高い結合点の回転自由度を含めた部分構造合成法

本節では3章で示した回転経路を含んだシステム伝達率法を用いて問題となっているねじりのローカルモードに対するか結合点からのモーメントの寄与を算出し、最も寄与の高い結合点の回転自由度を含めて部分構造合成法を行う事で予測精度の向上を図る。図12に各結合点のモーメントの寄与度を示す。実験では M_x に加えて M_y も含めている。図12より結合点4の M_x 方向のモーメントの寄与が最も高い事が分かる。したがって結合点4の X 軸まわりの自由度を含めて合成する。図13に正解値と結合点全ての自由度を含めて合成した伝達関数、各結合点の並進自由度と結合点4の X 軸まわりの自由度を含めて合成した伝達関数の比較を示す。ほとんどの周波数において Z のみの伝達関数を用いて合成した伝達関数よりも精度が上がっているのが確認できる。また、ローカルモードのモードシェイプを図14に示す。ローカルモードにおいても図10に示す正解値と形状がおおよそ一致しているのが確認できる。

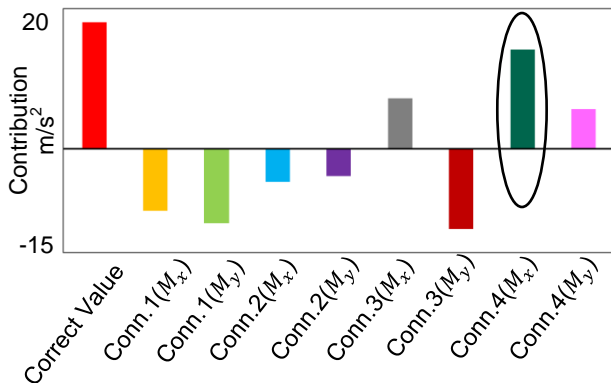


Fig. 12 Contribution from each connection

6. 研究成果

- (1) ローカルモードの結合点のモーメントからの寄与が高い時、部分構造合成法において並進加振のみのデータの場合見逃す事を確認した。
- (2) ローカルモードを見逃した状態(並進方向のデータのみ)で合成を行うとローカルモード付近で予測精度が下がる事を確認した。
- (3) システム伝達率法を用いて各結合点の回転経路を含めて計算することで問題となるローカルモードに対する各結合点のモーメントの寄与を求めた。
- (4) モーメントの寄与が最も高い結合点の回転自由度のみを含めて合成を行う事で、ある程度の予測精度を保ちながら部分構造合成法を実行できた

参考文献

- (1) 大久保信行, “機械のモーダル・アナリシス”, 中央大学出版部, (1982)
- (2) 長松昭男, “モード解析入門”, コロナ社, (1993)
- (3) 長松昭男, 大熊政明, “部分構造合成法”, 培風館, (1991)
- (4) 細矢直基 他 “構造物の回転自由度に関する周波数応答関数の推定 (自己 FRF 推定法の提案と基礎的検討)”, 機論, 67-657, C(2001), 1470-1477.
- (5) 大久保信行, “伝達経路解析の基礎から応用”, エルエムエスジャパン株式会社, (2012)