１．構造力学・構造工学一般 とりまとめ：末武義崇（足利工業大学）

論文題目："地震波入力を受ける偏心二重円筒シェル内容液の動的挙動"

著者：高西照彦，水田洋司
掲載：Vol.57A, pp.16-26, 2011年3月

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

解析の過程で，式（66）および式（72）を解くにあたり差分法を用いておられます．差分間隔など数値計算における条件が，全体的な解析結果に大きな影響を及ぼすことはないのでしょうか？

◆回答：差分法において採用した差分間隔につきましては，これを理論的に定めることは困難ですので，本論では以下に述べるように，試算によってその差分間隔を定めることにしました．即ち，差分間隔を段階的に小さくしていった場合について，それぞれ式(66)に対しては内容液の，式(72)に対しては偏心二重円筒の一次の固有振動数を算出し，その値がほぼ一定値に収束し，それが必要な精度の範囲に収まったときの差分間隔をもって，適切な差分間隔として採用することにしました．このようにして定めた差分間隔を用いれば，それが全体的な解析結果に影響を及ぼすことは殆どないと云ってもよいのではないかと考えております．

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

内溶液の物理的な性質，例えば粘性などは，解析結果に具体的にどのような影響を及ぼすのでしょうか？

◆回答：内容液の振動を支配する方程式中には粘性項が含まれておりませんので，理論的に粘性の影響を予測することは出来ませんが，本論では，粘性の影響は応答を計算する方程式である式(98)中の減衰項で考慮することにしております．一般に，内容液の粘性が大きくなれば，その振動に対する減衰力は増加すると考えてもよいことから，式中の減衰定数をそれに応じて大きくすることによって対応することになります．減衰項が大きくなれば，一般に，偏心二重円筒に対する地震応答結果は小さくなりますので，耐震的には有利になると考えてもよいと云えます．

また，内容液の固有振動数に対する粘性の影響につきましては，本論では内容液として貯水槽及びオイルタンク中の水及び油を想定しておりますので，その粘性が大きくなれば，内容液の固有振動数は小さくなりますが，その変化の程度は小さく，ほとんど無視してもよいと云えます．

論文題目："弾性基礎上にある長方形平板のひずみエネルギー解析と一次せん断変形理論の適用範囲に関する基礎的検討"

著者：名木野 晴暢，樋口 理宏，足立 忠晴，末武 義崇，水澤 富作，三上 隆
掲載： Vol.57A, pp.27-40, 2011年3月

◆討議［紅露一寛（新潟大学）］

系全体のエネルギーに基づいて平板の一次せん断理論の適用範囲を評価することの合理性はどこにあるのでしょうか？本来平板内の面内座標位置の関数として（構造内の局所的な物理量として）定義されているひずみや応力など，平板内の運動学的状態，応力状態に基づいて一次せん断理論の適用範囲を評価・判断しようとすることと，解析例のように，平板内の変形状態・応力場は一様ではない問題に対して，全体のひずみエネルギーに基づき理論の適用範囲を論じようとすることが，整合がとれていないような印象を受けます．

◆回答： ひずみエネルギーを指標とする考えの根拠は，Castiglianoの第二定理です．直方弾性体のひずみエネルギーU は，次のように表されます．

$$U = U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} + U_{xy} + U_{yz} + U_{zx} \quad (1)$$

ただし，各ひずみエネルギー成分$U_{ij}(i,j=x,y,z)$ の詳細は論文をご参照下さい．この時，Castiglianoの第二定理の左辺は，次のようにも表されます．

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \frac{\partial U_{xx}}{\partial P} + \frac{\partial U_{yy}}{\partial P} + \frac{\partial U_{zz}}{\partial P} + \frac{\partial U_{xy}}{\partial P} + \frac{\partial U_{yz}}{\partial P} + \frac{\partial U_{zx}}{\partial P} = \delta_{xx} + \delta_{yy} + \delta_{zz} + \delta_{xy} + \delta_{yz} + \delta_{zx} \quad (2)$$

よって，Castiglianoの第二定理により求められる一般化変位δは，六つの応力－ひずみ成分により生じる各一般化変位 $\delta_{ij}(i,j=x,y,z)$ により構成されていると言えます．故に，各ひずみエネルギー成分$U_{ij}(i,j=x,y,z)$の大きさは，一般化変位δにおけるそれぞれの変形成分の割合を表していると解釈することができます．また，各ひずみエネルギー成分は，応力分布とひずみ分布の積を領域全体で積分したスカラー量ですから，評価位置に依存する局所的な物理量である変位や応力を平均化したものと考えることができます．

本論文は，平板理論の妥当性の検討に，局所的な評価ではなく，ひずみエネルギーを指標とした大域的な評価を試みたものです．ご指摘のように平板理論の適用範囲は，平板の変形や応力状態をどの程度近似し得るかで判断する必要があると考えますが，結局のところ局所的な評価に限定されてしまいます．他方，本論文で提案したような大域的な評価は，これまでにほとんどなされてきませんでした．ここで，理論の相違による各ひずみエネルギー成分の誤差について考えてみると，これは平板のひずみ分布と応力分布の理論の相違によって生じる誤差を領域全体で平均化したものと考えることができます．すなわち，両理論においてひずみ分布と応力分布に大きな相違がない場合にはエネルギーに誤差は生じませんが，理論の相違が現れてくるとエネルギーに誤差が生じるということになります．故に，ひずみエネルギーは，積分により平板の応力－ひずみ状態を大域的に評価したものであると考えています．ただし，本論文で得られた結論（適用範囲）が局所的な評価によっても矛盾無く成立するか，即ち，平板に生じる変位や応力を適切に近似しているかどうかは明らかにする必要があり，これにつ

いては現在検証中です.

◆討議［紅露一寛（新潟大学）］

今回検討により得られた結論は，弾性床のばね定数の影響をどの程度受けるのでしょうか？

◆回答：本論文では，弾性基礎上にある平板の曲げ問題における一次せん断変形理論の適用範囲は，物体力，等分布満載荷重及び部分等分布荷重に係わらず，$0 \le \Phi \le 10^3$ (Φ は無次元地盤反力係数) かつ $h/a \le 0.1$ (h/a は板厚比) であるとしましたが，これは各種項目やパラメータに依存せず，統一的に取り扱うことを目的とし，許容誤差を10 % に設定した場合の結論です．少し視点を変えて図-6 に着目すると，$\Phi = 0$であれば，自重を受ける場合はh/a = 1程度まで，表面力を受ける場合は h/a =0.3 程度まで，一次せん断変形理論は，曲げ変形と面外せん断変形を良好な精度で近似できます．他方，$\Phi = 10^2$ であれば，自重を受ける場合はh/a =0.4程度まで，表面力を受ける場合は h/a=0.3程度まで，良好な結果を与えます．よって，無次元地盤反力係数Φ の値の影響は，一次せん断変形理論を適用できる板厚比 h/a に現れ，場合によってはかなり厚肉な平板までを取り扱うことができます． ただし，$\Phi > 10^3$ の範囲や表面力が局所的に作用する場合は，エネルギーの誤差がかなり大きくなりますので注意が必要です.

◆討議［紅露一寛（新潟大学）］

ご提案の手法（の方法論）は，動的問題や構造安定問題においても，そのまま適用できるのでしょうか？

◆回答：対象とする構造要素が線形弾性体であれば，動的問題や構造安定問題にも十分に適用できるものと考えています.

論文題目：“線材置換を用いた張力場理論による膜構造の有限変位応答に関する考察”

著者：井嶋克志，帯屋洋之，川崎徳明
掲載：Vol.57A，pp.41-52，2011年3月

◆討議［岩崎英治（長岡技術科学大学）］

線材置換による膜構造の有限変位解析手法を検討され，興味深い論文と拝見させて頂きました本論文の特徴として，ポアソン比が1/3の場合とこれ以外の場合で定式化を分けられています．ポアソン比が1/3の場合には，本文のタイプ４，５を使うことになると思いますが，ポアソン比が1/3に非常に近いが1/3ではない場合に，タイプ１，２，３を使った場合のポアソン比を1/3に漸近させたときの要素の数値的なふるまいに，タイプ４，５との不連続性が現れないかどうか．あるいは，ポアソン比が1/3に近い場合の数値計算上の対処法についてご回答ください.

◆回答：実用上は用いられるポアソン比の有効桁数からタイプ１～３を用いて十分と考えられますので，タイプ４と５はポアソン比1/3のように特殊なケースでも線材置換が可能であることを示すためのものでした．しかし，タイプによる構造形状の違いが要素の応答として連続性に影響しないかという点は理論的および数値計算上面白いご指摘と思いました.

本論文で副材に限定して線形適合条件を用いましたので，タイプの違いに起因して不連続とはならないことを容易に示すことができます．すなわち，2.6節と2.7節にて示しました副材骨組の剛性係数 は，そのタイプに関わらず定ひずみ要素の剛性係数に等価とする式(15)を若干変形した次式の第2項に常に一致するからです.

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \bar{k}_1 & 0 & 0 \\ & \bar{k}_2 & 0 \\ \text{sym.} & & \bar{k}_3 \end{bmatrix} + \bar{k}_s \begin{bmatrix} 1/(Fh_1^2) & 1/(Fh_1h_2) & 1/(Fh_3h_1) \\ & 1/(Fh_2^2) & 1/(Fh_2h_3) \\ \text{sym.} & & 1/(Fh_3^2) \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{Bmatrix}$$

タイプ４は$\bar{k}_s = 0$ですからこれも上式に含まれ，全タイプの副材の接線剛性は上式に一致することになります．したがって，ポアソン比に限らず要素形状についても常に骨組構造の接線剛性は連続であり、要素の接線剛性を定める要素端力も連続であることは明白となります．なお，副材骨組剛性が上式に一致することについては論文中にも述べておりますように，理論的な誘導ではなく数値計算による確認のみです．タイプ５について上式を計算する際F, h_1, h_2, h_3は不定となりますが，式(17)を上式に直接代入すればポアソン比 1/3のとき不定の原因となるK_aを除去した式を得ることができます.

数値計算上においては，確かにポアソン比1/3のとき補助点位置を表す式（36a,b）（2.6節）は不定となります．しかし，副材に線形適合条件を用いているので補助点位置そのものが必要ではなく，副材方向余弦が分かれば副材変形は式(41)から計算できます．従いまして，副材方向余弦の式(37a,b,c)に式(17a,b,c)と式(36a,b)を代入して変形すれば不定の原因となるK_aを分離できます．このことは2.7節に示したタイプ５の線材モデルが必要なくなることを意味し，より簡潔な理論となります．有益なご指摘が理論の改善に繋がりありがとうございました.

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

数値計算にあたり，DR法とNR法を組み合わせて収束計算を行っているようですが，NR法単独で計算を行うことは難しいのでしょうか？

◆回答：前論文を含めた研究当初は，膜構造を非抗圧モデルとして扱うことと3次元ケーブルネットの安定計算の経験からNR法単独で大丈夫ではないかと考えておりました．しかし，前論のタイプ１でも膜材ポアソン比が1/3より小さい場合には副材剛性が負となります．これは膜要素モデルとしては非抗圧でありながら副材は常に圧縮軸力であることを意味し，これに起因するのでしょうかNR法単独での反復計算は収束せずDR法が必要となります．全要素非抗圧モデルですから全体構造のエネルギー曲面の極値は唯一と考えられますので，圧縮軸力材の存在はエネルギー曲面に唯一解以外の極値を与えない程度の凹凸が現れるのではないかとイメージしております．いずれにしましても，タイプ１以外では非抗圧モデルであっても正剛性の圧縮材を常に含みますのでDR法の使用は避けられないものと考えております．このようにNR法は敏感な反復手法ですのでDR法と中間の反復手法のようなも

のが開発されれば非線形計算はより簡単になるものと思います．

論文題目：“浮き屋根式タンクのスロッシング減衰装置の施工性に関する検討”

著者：小松領平，井田剛史，平野廣和，連重俊
掲載：Vol.57A，pp.53-62，2011年3月

◆討議［紅露一寛（新潟大学）］

バッファーの形状は，支持剛性や減衰性能など，何らかの制約や目的関数に対する最適形状として考案され，採用されたものなのでしょうか？また，バッファーの形状は，今回の研究で示された形状に限定されるのでしょうか？

◆回答：バッファーの形状に関しては，最大変形量に対するポテンシャルエネルギーを応力解析によって算出しており，今回想定している200cm/secの応答速度の地震が発生した場合に生じる運動エネルギーを吸収可能なサイズおよび形状に設計しております．また，バッファーが変形したときのポテンシャルエネルギーは，バッファーの材質の違いにおいても差異が見られます．これはゴム材質の粘弾性特性によるものであり，減衰性の高いゴム材質を選定することで，地震発生による運動エネルギーを効率よく吸収できることを示唆するものです．
　本論文でのバッファーは，試験及び解析により剛性・減衰特性を求め，形状及び材料を含め最適なものを総合的に設計し採用したものであります．
　形状については，バッファーの変形によるポテンシャルエネルギーが本論で提示したバッファー形状と同等となる形状であれば，バッファーの形状として採用することは可能でありますが，解析およびモデル試験の結果より本論で提示しました形状が最適であると考えます．

論文題目：“グラウンドアンカーで耐震補強した鋼矢板式岸壁の耐震性に関する振動台実験および有効応力解析”

著者：吉田誠，清宮理，三藤正明，田代聡一，合田和哉
掲載：Vol.57A，pp.63-74，2011年3月

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

図－8，図－9および図－11などを見ますと，実験結果と解析結果との間にズレが認められます．今回の解析には何らかの適用範囲があるのではないかと考えますが，如何でしょうか？

◆回答：解析コードFLIPによる控え矢板式岸壁の解析は，過去に被災事例に対する再現性などについて多数検証されています．本論文におけるアンカーなしの解析も，矢板の変位や液状化についてやや安全側の評価となっておりますが，時刻歴波形や分布形状は実験結果を概ね再現できていると考えております．
　一方，アンカーありの解析は，アンカー張力および曲げモーメントについてはやや安全側の評価となっておりますが，時刻歴波形や分布形状は概ね再現できていると考えております．しかし，矢板の変位は過小評価となっており，解析精度の向上を図る必要があると考えております．

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

図－11を見ますと，アンカーあり（CASE-2）の方が大きな曲げモーメントを生じています．発生する曲げモーメントは大きいが，変形が抑えられるため，アンカーありの方が有利であると解釈すれば良いのでしょうか？

◆回答：岸壁の変位という観点では，アンカーで対策したことにより矢板の変位が抑制されるため，アンカーありの方が有利と判断されます．しかし，矢板の曲げモーメントは増加するため，許容値を超える場合は対策が必要になります．一つの解決策として，アンカー頭部の設置位置を低くする方法が挙げられます．図－14，図－15を見ていただきますと，アンカー頭部の設置位置を低くすることにより，矢板の変位はほとんど変わらず，曲げモーメントが低減することがわかります．

論文題目：“落石防護工に用いる緩衝金具の開発と性能評価”

著者：岩崎英治，加規秀二，向笠正洋
掲載：Vol.57A，pp.75-85，2011年3月

◆討議［吉田誠（五洋建設技術研究所）］

解析による張力はピーク時には実験結果を過小評価する結果でしたが，張力を合わせるために摩擦力をおおきくすると今度はワイヤ余長を過小評価してしまうことになると思います．張力とワイヤ余長の解析精度を同時に向上させる工夫などありましたら教えて下さい．

◆回答：緩衝金具内のワイヤが滑動を開始する直前の静止摩擦力と滑動中の動摩擦力をモデル化できると最大張力とワイヤ余長の両方の解析精度を向上できると思います．しかし，本研究で対象としている緩衝金具の滑動時の摩擦力はワイヤの保証破断荷重の三分の一程度の値であり，落石によりワイヤが破断することはないと考えられます．したがって，ワイヤ余長の解析精度を確保することに比べて，解析によりワイヤの最大張力を正確に再現する必要性は低いと考えています．

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

重錘落下試験結果の滑りについて，直接計測と加速度から算定した値に大きな相違はあるのでしょうか？

◆回答：一端に緩衝金具を取り付けた１本のワイヤに重錘を落とした時の実験終了後の滑りの計測値(sm)と加速度から算出した滑り(sf)は表１に示しています．若干のばらつきはありますが，落下高さH=1.0mのときの計測値と加速度から算出した滑りの平均値はそれぞれ，sm=0.275m，sf=0.295m，H=1.2mのときには，sm=0.289m，sf=0.

306m，H=1.4mのときには，sm=0.377m，sf=0.380mです．

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

解析の際に，ロープ要素長の選択によって結果がかなり違うということはないのでしょうか？

◆回答：１本のワイヤに重錘を落とした解析モデルでは，ワイヤの要素長の影響はあまり受けません．防護網を有する落石防護工は，縦横のワイヤに防護網を覆っていますが，この防護網を体積が等しい棒要素でモデル化しています．防護網の要素数を粗くすると落石の力が分散しませんので，結果に違いが生じます．一方，棒要素を防護網の線材の間隔に合わせると多大な計算量になります．本論文の計算モデルは，結果に大きな違いが生じない範囲で粗くしています．具体的には，線材間隔が約 50mm間隔の防護網を200mm間隔の棒要素でモデル化しています．ワイヤの要素長は，ワイヤと線材をモデル化した棒要素の接続部の間隔長より長くできませんので，この間隔長としています．

論文題目：“光学的手法による鋼部材の加熱・冷却過程におけるひずみ分布計測”

著者：出水享，松田浩，伊藤幸広，森田千尋，藤野義裕
掲載：Vol.57A，pp.86-93，2011年3月

◆討議［末武義崇（足利工業大学）］

DICMについて，変形後のサブセットの位置を数値解析で探索しているとのことですが，精度良く探索できるものなのでしょうか？探索作業をする人の熟練の度合いによって，結果が相違するようなことはないのでしょうか？また，探索に関わる数値解析上の留意点などがあれば教えて下さい．

◆回答：通常のDICMの解析手法は，初期画像と変形後の画像に対してサブセット範囲でパターンマッチングを行います．パターンマッチングを行いやすいように白黒のスプレーでランダムパターンをマーキングするのですが，ランダムパターンに規則性があると相関関係がなくなります．つまり，変形・ひずみが計算できないことを意味します．しかし，通常のマーキング作業においては，不規則にランダムパターンを塗布できるため問題ありません．また，探索作業ですがパターンマッチングの広さ（サブセットの広さ）が大きいほうが画像の相関関係を算出しやすく，変形・ひずみ計測精度が向上します．しかし，サブセットを大きくすると計算コストがかかります．逆にこの値を小さくすると相関関係が算出しにくいためひずみ計測精度が低下します．経験上ですが，測定範囲に塗布したランダムパターンの粒径を構成するピクセル数の約3倍の大きさのサブセットを設定すれば問題なく，変形・ひずみが算出できます．

探索作業に熟練度合いは不要で，誰が行っても同じ結果を得ることができます．ランダムパターンの塗布に関しては，多少練習が必要ですが数回練習すればマスターできます．つまり，誰でも簡単に精度よく全視野非接触にひずみ計測できるのがDICMの特徴といえます．デジタルカメラの解像度化とパソコンのHDの大容量化，CPUの高速度化に伴い，膨大の画像データや高解像度の画像データを高速に処理が可能となることもDICMの魅力の一つといえます．