電子計算機の構造工学への応用に関する国際シンポジウムに出席して

資　　　料

田村周平*・藤野　勉**

1. はじめに

昭和41年7月4日～8日，Newcastle upon Tyne（連合王国）において，電子計算機による構造計算に関する国際会議が開催された。これに出席の機会を得たので，以下簡単に報告したいと思う。会議の日程はつぎのとおりであった。

7月4日（月）	Working Session 1 and 2,
7月5日（火）	Working Session 3 and 4,
7月6日（水）	Technical and Sightseeing Visit (Forth Road Bridge),
7月7日（木）	Working Session No. 5 and 6.
7月8日（金）	Working Session No. 7 and 8.

以下，Session ごとに内容の概要を紹介しよう。

2. Working Session No. 1

Paper No. 1; R.K. Livesley（イギリス）

本論文は過去20年にわたる構造計算の電子計算機利用に関する展望である。

1942年 Pennsylvania 大学に，最初の電子計算機 ENIAC が誕生した。電子計算機が構造計算に始めて利用されたのは，1952年イギリスにおいて，電子計算機 EDSAC による Bennet の仕事である。その後，hard ware, soft ware の改善により，土木工学の分野でも広く利用されるようになった。初めは単一目的の program がつくられていたが，その後，つぎの主流にしたがって一般性をもつ program が開発されてきた。

（1） 数百ないし数千の節点をもつ骨組構造系の解析

（2） 非線形解析（有限変形理論，塑性変形理論）

（3） 連続体解析（差分方程式法，有限要素法）

最適設計の問題も取り上げられているが，一般構造系に実用的に採用されるかどうかは疑問である。将来の問題としては，time sharing processing や problem oriented programming language による man machine communication の改善があげられる。

* 正会員　日立造船（株）鉄構事業部橋設計課長
** 工博　三菱重工業（株）技術本部技術管理部長付

3. Working Session No. 2

本 Session は，主として linear analysis に関するものである。一般に構造計算は多元の連立方程式に帰する場合が多く，大型の matrix 計算を限られた記憶容量の電子計算機を使用して経済的に処理することが大きな問題となる。大きな系の計算は，一般に，結合関係により，計算法もおのずから異なってくる。たとえば，橋梁のような細長い構造物では matrix が帯状となるので，reduction method[(6),(7)] が容量の小さい計算機でも使われている。つまった大きな matrix 計算には Crout-Branachiewicz 法，または sub-matrix[(2),(4)] に分ける方法が使用される。たとえば，multi-bay, multi-story の構築物は，これをいくつかの静定の rooted tree に分解することにより unit に分けることができる[(16)]。系を分解するための cut の入れ方は，計算機が自動的に決定する。従来，連続系の計算には理論解析法，または，直交格子系による差分方程式の変換が用いられていたが，最近は有限要素法が，その座を奪うとしている。土木工学の分野でも，一連の program を必要とする場合が多く，これらは program package[(3),(5),(13)] として体系化されて，利用者は簡単な control program を書くのみで，必要な program を結合し，所要の program 系を構成することができる。

また，構造計算の program は，下記のように鉄道橋の保守管理にも利用されている[(9)]。たとえば，アメリカのある鉄道会社では，

（1） corrosion, fatigue, または，その他の理由による材料の老化

（2） 荷重条件の変化

（3） 許容応力，その他の specification の低下

などを周期的に再評価し，いかなる時期に，いかなる対策を補すべきかを，電子計算機に判断させている。現在の電子計算機を利用する構造計算では，変位法がもっぱ

ら使用されているが，一部では，手計算時代によく利用されたモーメント分配法が高く評価されている。昔の計算法では誤りがくり返しとともに消失しなかったが，現在この点も改良され， Southwell の relaxation process と相まって，比較的小さい計算機でも利用されている[8]。また一方では，変位法の採用により昔の手計算では見落されていた点も修正される結果を得ている。たとえば，アーチ橋の応力解析において，水平変位を考慮した2次変形理論によりアーチ材の最大曲げモーメントが 38％ 増加する計算例があげられている[11]。

4. Working Session No. 3

本 Session は，主として non-linear analysis に関するものであるが，さらに，耐震問題など，動的解析も含まれる。非線形解析は下記の（1），（2）の二つに分けられる。

（1） 有限変形

有限変形を取り扱かう論文は，paper No. 8 と 10 のみである。弾性理論（微小変位理論）では，変形前の幾何学的条件によって節点の平衡方程式を組み立てており，したがって，方程式は線形となる。これに反し有限変位理論では，変形後の形によって平衡方程式を組み立てているので非線形となる。吊橋やアーチ橋のように，変形の大きい構造物の応力解析は有限変位理論によることが必要である。有限変位理論による解析では，方程式が非線形となるので，くり返し計算が必要で，その収束性が問題となり，特殊の安定化が考案されている[8]，有限変位理論でも，部材のわん曲を考慮する場合と，しからざる場合に分けることができる。吊橋のように主として張力部材の場合には考慮する必要はないが，アーチ橋のように圧縮材により構成される系に対しては，特に部分座屈の観点より，わん曲による不安定モーメントを取り入れることが必要である[10]。

（2） 塑性変形

材料の性質として，ある応力を越えると strain-stress 間の比例関係は保たれなくなり，strain は急に大きくなり，非線形となる。特に，鉄筋により補強されたコンクリート部材[4]では非線形性が大きく，塑性解析が特に必要である。一般に， strain，stress の関係は履歴現象も含む複雑な経過[9]をたどるものであるが，解析を容易とするため，完全塑性変形を仮定する場合が多い。たとえば，集中荷重の仮定により，曲げモーメントは直線分布となり，最大曲げモーメントは節点位置に存在する。塑性変形を始める moment を plastic moment とする。一般に， plastic moment は軸力の影響も受けるが，大きな精度を必要としない場合には省略される。構造解析に plastic hinge の概念を最初に導入したのは Livesley (1956) で，その後，Vallance (1964) その他によって改良された。Collapse analysis は plastic hinge を仮定することにより進めることができる。特に複雑な系については，静定の rooted tree に分解することにより，破壊の過程の追求，ならびに，崩壊解析を行なうことができ，これらは電子計算化されている[2],[7]。

（3） 耐震問題

耐震設計に関する論文は比較的少なく，日本の論文を含め3編に過ぎない。複雑な構造系の地震応答を求めることは非常に困難で，弾性解析では波動論的取り扱かい[3]が提案され，塑性領域を含む計算では集中弾性[6]の仮定によるモデル化が採用されている。

5. Working Session No. 4

本 Session は，主として平板，殻など連続体の応力解析に関するものである。

2次元，3次元的拡がりをもつ弾性体の応力解析，すなわち，偏微分方程式にて記述される現象の解析には，従来差分方程式法がよく利用されてきたが，最近は，航空機の翼，胴体などの応力解析の手法として開発された有限要素法が，土木工学の分野にも取り入られようとしている。この方法は，基本的には考える領域を三角形，または，四角形などの要素に分割し，仮想仕事の原理に立脚して，節点に関する平衡方程式を導入する手法である。本計算法による解が，要素の数をふやすとともに真の解に収束するためには，Melosh の条件，すなわち，要素の内部ならびに要素間の境界上での連続が要請される。この条件は必要条件であるが十分条件ではなく，さらに shape function の任意の結合により要素内の主要な変形の形状を表現できるものでなければならない。以上の諸条件を満足する shape function として，一つの提案がなされている[14]。計算の精度を高めるためには，要素内の変数の数を多くとることが必要である。たとえば平板の面内変形問題で，各節点の x, y 方向変位 u, v を変数とするとき，三角形要素では 6，四角形要素では8個の変数となるが，要素の剛体としての変位，回転に3個が消費されるので，変形に有効な変数の数は三角形要素で 3，四角形要素で 5 となり，四角形要素の方がはるかに高い精度で応力分布を与えることができる[17]。解の精度を高めるためには，同時に Valency を考えることが必要である。Valency とは化学における約束にしたがって一つの節点に連なる要素の数とする。すなわち

Valencyが高いほど，その節点の近傍において多くの情報を持ち得るので高い精度が期待される。有限要素法はアーチ ダム[(8),(11)]の経済計画，橋梁床板[(16)]などに利用され，よい結果を与えている。有限要素法のほかに，理論解析的方法として，薄い球面殻の対象荷重による応力解析を複素超幾何級数にて求める論文が1編[(3)]あり，差分方程式による応力解析は shell roof[(2)] の解析，line solution technique による橋梁床板の解析[(4)]，薄い軸対称殻の応力解析[(9)]その他がある。本 Session 内に含まれる差分方程式関係の論文は6編，有限要素法関係の論文は7編である。有限要素法は現在主として静的応力解析の手段として利用されているが，将来はさらに (1) 塑性変形，(2) 有限変形，(3) 座屈，(4) 振動などの解析に進むであろう。

上記論文中の右肩の番号は，おのおのの Session paper No. を与える。提出された論文はつぎのようである。

Papers Presented at International Symposium on the Use of Electronic Digital Computers in Structural Engineering

(1) Working Session No. 1 (Review)

Paper No. 1
"The Pattern of Structural Computing 1946 1966" by R.K. Livesley, Cambridge University, England.

(2) Working Session No. 2
(Linear Structural Analysis)

Paper No. 1
"The Numerical Solution of Partial Differential Equations and its Application to Civil Egineering Problems" by E. van Spiegal and P.J. van dar Hoff, Mathematics Department of the Technological University, Delft, Holland.

Paper No. 2
"The Economical Computation of Stiffness Matrices of Large Structural Elements" by H.W. Loof, Steven-Laboratorium, Technisehe, Hogeschool Delft, Holland.

Paper No. 3
"Organization of Input & Output for a Programme Package Demonstrated by Means of an Example of Prestressed Continuous Beams" by W. Glaser, I.B.M. Sindelfingen, Germany.

Paper No. 4
"Direct Solution of Large Order Sparse Matrices" by A.C. Singhal, Laval University, Quebec, Canada.

Paper No. 5
"The Use of Digital Computers in the Analysis of Bureau of Reclamation Structures" by H.W. Anderson, Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior.

Paper No. 6
"The Analysis of Large Structural Systems by Digital Computer using the Stiffness Method" by W.M. Jenkins and L.C. Carpenter, Bradford Institute of Technology, England.

Paper No. 7
"Solution of Continuous Warren Trusses with Parallel Chords by Reduction Method" by M. Naruoka, Nagoya University and T. Kumano, Mitsubishi Jukogyo Co., Ltd., Japan.

Paper No. 8
"Rigid Plane and Space Frames-Distribution Methods of Analysis" by B. Rawlings, University of Sydney, Sydney, N.S.W., Australia.

Paper No. 9
"Railroad Truss Bridge Rating by Means of Electronic Computation" by A. Longinow and D.I. Feinstein, II T Research Institute, Chicago, Illinois, U.S.A.

Paper No. 10
"Analysis and Design of Complex Space Frames by Distributing Held Joint Forces" by N.J. Everard and T. Huang Arlington State College of the University of Texas, U.S.A.

Paper No. 11
"On the Calculation of Long Span Arch Bridges" by K. Takao, Japan Bridge Consultants Co., Ltd., Tokyo, Japan, and K. Horikawa, Tokyo University, Tokyo, Japan.

Paper No. 12
"Use of Digital Computer for Analysis of Multi-Storey Multi-Bay Rigid Knee-Braced Bents and Braced Bents" by T. Furuya, Member of Architectural Institute of Japan.

Paper No. 13
"Recursive Computation of Space Frameworks" by D. Withum, Technische Hochschule Hannover, Germany.

Paper No. 14
"Computation of Bending Strength of Reinforced Concrete Beams" by H. Flessner, Technische Hochschule Hannover, Germany.

Paper No. 15
"Calculation of the Elastic Torsion Constants of Non-Circular Sections" by B.W. Dyer, Dorman Long (Bridge & Engineering) Ltd., England.

Paper No. 16
"Automatic Determination of Redundant Loops in Framed Structures and the Compilation of Structural Equations Associated with Released Structures" by J.P. Baty, University of Newcastle upon Tyne, England.

(3) Working Session No. 3
(Non-Linear Structural Analysis)

Paper No. 1
"Asymptotic and Iteration Methods for the Matrix-Analysis of Structures with Linear or Non-Linear Character" by J. Szabo and B, Roller. Technical University for Building and Transport Engineering, Budapest, Hungary.

Paper No. 2

"A Systematic Method for the Collapse Analysis of Plane Frameworks" by R.K. Livesley, Department of Engineering, Cambridge University, England.

Paper No. 3

"On the Programming for the Earthquake Response Calculation of the Building by the Wave Theory" by J. Sakurai, Waseda University, Japan.

Paper No. 4

"A Computer Method for Inelastic Analysis of Plane Frames" by W.B. Cranston, Cement and Concrete Association, England.

Paper No. 5

"Response of Buried Silos and Internal Systems to Ground Shock" by C.J. Costantino and A. Wachowski, II T Research Institute, Chicago, Illinois, U.S.A.

Paper No. 6

"A Dynamic Analysis of Inelastic Structures by Lumped Flexibility" by R.K. Wen, Michigan State University, U.S.A.

Paper No. 7

"Some Applications of Linear Programming to Plastic Analysis of Structures" by G. Ceradini and C. Gavarini, Institute of Construction Science, Italy.

Paper No. 8

"Stress and Vibration Analysis of Plane and Space Structural Systems" by T. Fujino and K. Osaka, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Japan.

Paper No. 9

"Elasto-Plastic Frame Analysis (Considering with the Irreversible Properties)" by M. Hattori, Kozo Keikaku, Tokyo, Japan.

Paper No. 10

"A Computer Method for the Analysis of Non Linear Elastic Place Frameworks" by M.A. Millar, D.M. Brotton and W. Merchant, The Manchester College of Science and Technology, England.

Paper No. 11

"The Application of the Operation Calculus to Frames" by N. Dimitrov, The Technical University Karlsruhe, Germany.

(4) **Working Sessin No. 4** (Plates and Shells)

Paper No. 2

"General Application of Shell Programmes to Structural Surface Elements" by J.E. Gibson, The University of Manchester, England.

Paper No. 3

"Computer Analysis of Thin Spherical Shells by Means of a Generalized Hypergeometric Function of a Complex Variable" by L. Lachance, Laval University, Quebec, Canada.

Paper No. 4

"Analysis of Bridge Decks by the Line-Solution Technique" by A. Coull and K.S. Pao, Department of Civil Engineering, University of Southampton.

Paper No. 5

"Matrix Methods and Automation in Structural Engineering" by A.S. West and W.F. Hubka, University of Denver, Denver Research Institute, U.S.A.

Paper No. 6

"Dynamic Response of Plates on Elastic Foundation" by P. Sharma, Government Engineering College, Jabalpur, India, R. Wen, Michigan State University, Michigan, U.S.A. and W. Moody, McDonnell Aircraft Corporation, St. Louis, Missouri, U.S.A.

Paper No. 7

"The Finite Element Method for Analysis of Skew Plates in Bending by Use of Parallelogram Elements" by H. Ramstad and I. Holand, Division of Structural Mechanics, The Technical University of Norway

Paper No. 8

"Arch Dams of Minimum Volume" by A.B. Templeman, University of Liverpool, England.

Paper No. 9

"Calculation of Transfer-Matrices Applied to the Bending Theory of Shells Revolution" by W. Wunderlich, Technische Hochschule Hannover, Germany.

Paper No. 10

"Analysis of Plates by Dynamic Relaxation with Special Reference to Boundary Conditions" by A.S. Day, Ove Arup & Partners, London, England.

Paper No. 11

"Static and Dynamic Analysis of Plates and Shells using the Finite Element Method" by M. Flower, R.T. Severn and P.R. Taylor, University of Bristol, England.

Paper No. 12

"Plate and Shell Problems-A Finite Element Displacement" by O.C. Zienkiewicz and Y.K. Cheung, University of Swansea, Wales.

Paper No. 13

"The Computation of Equil. Stresses Induced by Wind and Body Forces in Hyperbolic Cooling Tower Shells" by E.L. Albasiny and D.W. Martin, National Physical Laboratory, England

Paper No. 14

"Finite Element Displacement Analysis of Plate Bending Based on Rectangular Elements" by H. Hansteen, Norwegian Building Research Institute, Oslo, Norway.

Paper No. 15

"Numeric and Analytical Plate Calculations" by J. Blaauwendraad, H. van Koten and J. Witteveen, Institute TNO, Holland.

Paper No. 16

"The Use of Finite Elements for the Analysis of Right Bridge Decks" by F. Sawko and R.J. Cope, University of Leeds, England.

Paper No. 17

"Triangles Versus Quadrilaterals" by R.J. Allwood, Loughborough University of Technology, England.

Paper No. 18

"A Practical Computing Method for Shells and Plates" by J. Szidarovszky, Ministry of Communications, Hungary.

Paper No. 19
"Numerical Integration Applied to Finite Element Methods" by B.M. Irons, Rolls-Royce Ltd., Derby.
Paper No. 20
"The Analysis of Reinforced and Prestressed Slabs using the Biharmonic Reflection Method" by J.C. Leray, Ministry of Public Transport, France.

(5) Working Session No. 5
(Computation for Commercial Design)

Paper No. 1
"Structural Design Language-A Computer System for the Total Structural Design Process" by R.D. Logcher, G.M. Sturman and J.M. Biggs, Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.
Paper No. 2
"The Design of Rigid-Jointed Building Frames" by L.S. Vallance, Building Research Station, England.
Paper No. 3
"Structural Designing of Reinforced Concrete Buildings Using Electronic Digital Computer" by F. Takino, Building Engineering Bureau, NTTPC, Tokyo, Japan.
Paper No. 4
"Direct Design for Shakedown under Multiple Loadng" by G. Sved and B. Tozer, University of Adelaide, iAustralia.
Paper No. 5
"Computer Calculations for High Buildings in Hong Kong" by E. Litton, Sunderland Technical College England, J.S. Roper, University of Durham, England and T.V. Thompson, Dorman Long & Co., Ltd., England.
Paper No. 6
"A Computer Programme for the Design of Steel Building Frames" by M. Holmes and S.N. Gandhi, University of Leeds, England.
Paper No. 7
"Use of Computer in Design of British Pavilion. 1967 World Exhibition, Montreal, Canada" by W. Bates, Redpath Brown & Co., Ltd., Manchester, England.
Paper No. 8
"Use of Electronic Computer for Calculation of Composite Structures" by S. Krug, Fried. Krupp Maschinen und Stahlbau Reinhausen, Germany.
Paper No. 9
"The Role of the Stress Programming System in Structural Engineering" by S.J. Fenves, University of Illinois, U.S.A.

(6) Working Session No. 6
(Optimum Design of Structures)

Paper No. 1
"Plastic Analysis and Design and Rigid Plane Frameworks Subjected to Multi-Load Conditions" by J. Wright and J. Baty, University of Newcastle upon Tyne, England.
Paper No. 2
"A Method for the Optimum Design of Structures" by C.A. Cornell and K.F. Reinschmidt, Mass. Inst. of Tech., Mass., U.S.A. and J.F. Brotchie, C.S.I.R.O., Melborne, Australia.
Paper No. 3
"Structural Optimization by Means of Nonlinear Programming" by D. Kavlie, J. Kowalik and J. Moe, Dept. of Ship Structures, The Techn. Univ. of Norway, Norway.
Paper No. 4
"Design of the Continuous Truss by the Use of a Digital Computer" by S. Tamura, H. Moriwaki and N. Yoshida, Hitachi Zosen Shipbuilding and Engineering Co., Ltd., Japan.
Paper No. 5
"Prestressed Concrete Tee-Beams" by R. Park, University of Christchurch, New Zealand and R.T. Severn, University of Bristol, England.
Paper No. 6
"The Automatic Ultimate Load Design of Rigid-Jointed, Multi-Story Sway Frames Allowing for Instability" by M.R. Horne and K.I. Majid, University of Manchester, England.
Paper No. 7
"Automated Minimum Weight Design of Frameworl Structures" by R.H. Gallagher and R.A. Gellatly, Bell Aerosystems Co., U.S.A.
Paper No. 8
"The Economic Design of Continuous Reinforced Concrete Beams (Ultimate Load Method)" by J. Peredy and Z. Visy, Technical University of Building, Civil and Transport Engineering, Budapest, Hungary.
Paper No. 9
"A Review of some Structural Synthesis Studies" by L.A. Schmidt, Case Institute of Technology, Ohio, U.S.A.

(7) Working Session No. 7

Paper No. 1
"Future Trends on the Use of Computers in Engineering" by E.V. Lindseth and F.E. Swain, Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior, Colorado, U.S.A.

(8) Working Session No. 8

Paper No. 1
"On Experiences with the Use of Electronic Computers in Building" by H. Matzke, College of Architecture and Building, Weimar, D.D.R.