

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560099

研究課題名（和文） 構造物の内部における力の伝達経路に関する新しい指標の開発

研究課題名（英文） Development of expression method for load transfer in structures

研究代表者

高橋 邦弘（TAKAHASHI KUNIHIRO）

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：60095619

研究成果の概要（和文）：構造物の内部における荷重伝達を表現するため、 U^* なる指標を提案してきたが、この指標は分布荷重に対しては適用できない。これと相補的な概念である U^{**} なる指標を新たに提案した。この指標は慣性力による分布荷重にも適用できるため、乗用車車体の曲げ 1 次振動モードにおける荷重伝達の様子を表現することができた。しかし計算時間が膨大となる欠点があるが、新たに高速化計算アルゴリズムを提案し、計算時間を約 400 分の 1 に短縮することができた。このアルゴリズムは NASTARN に搭載され、一般に実用可能となっている。

研究成果の概要（英文）：A parameter U^* , which is independent of stress and strain, has been introduced by the authors for expressing load transfer and load paths in a given structure. The conventional U^* cannot be calculated for a point under distributed displacement. To overcome this difficulty, a new parameter U^{**} was developed. A mathematical formulation with complementary energy and stiffness matrices was demonstrated, which can be used for efficient computation of U^{**} . The parameter U^{**} was used for expressing load transfer in the case of a passenger car body under the condition of the bending vibration.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：構造解析，有限要素法，荷重伝達，荷重経路， U^*

1. 研究開始当初の背景

構造物の設計において、荷重の伝達およびその経路に関する検討は、基本的な重要性を有している。構造の全体像を把握し、大局的な構造のイメージを作り上げつつ、開発を進

めていくのが通常的设计手法である。このとき、強度を上げ、剛性を高めることを目標とするは勿論であるが、むしろ力の伝達が滑らかになることを念頭において設計を進めるのが通例であろう。しかしこの力の流れ

ともいべき荷重伝達の経路とその伝達量の評価方法は、未だ明瞭に表現されているとは言えない。

通常、力の伝達の検討には応力による表現が広く用いられている。主応力の向きと大きさを矢印で図示し、それにより荷重伝達の傾向あるいは力の流れを示し、構造の機能を把握することが行なわれている。特に航空構造技術者の間では、洋の東西を問わず力の流れという概念を、この主応力により表現する手法が以前より用いられて来た。

しかしながら、例えば円孔を有する構造物の応力分布においては、円孔の縁で応力集中による高い応力を示すが、この部分で大きな力を伝えるとは言えないであろう。応力が高い箇所において大きな荷重を伝えていると考え、構造物中に円孔を設けることにより大きな荷重を伝えるという誤った結論を導くことになる。円孔あるいは切り欠きを設ければ、伝達される力は減ずるとする考え方が、構造設計における正しい見方というべきであろう。このことから、円孔あるいは切り欠きが多い構造物では、応力集中のために、力の伝達が把握できないことが多い。

著者等はこれまでに荷重伝達を表す指標として、指標 U^* の提案およびその利用法について検討を行ってきた。指標 U^* は負荷点と構造内部の 1 点との結合の強さを表す量であり、構造物中の U^* 分布を用いて、荷重伝達の全体像を把握することが可能である。指標 U^* に関するポテンシャルを導入し、剛性線および剛性低下ベクトルを定義した。これらの量は荷重の経路を表現するのに適しており、全く新たな構造表現方法であることが明らかになりつつある。

この U^* は構造物の性質を把握する上で極めて有効であるが、応力、ひずみ、あるいはひずみエネルギー等の、これまで身近に使われて来た概念を用いていない。そのため、いくつかの問題点を有している。計算時間が膨大になること、振動あるいは衝撃問題への拡張の検討が必要なことなどがそれである。

2. 研究の目的

上述の U^* は構造物の性質を把握する上で極めて有効であるが、応力、ひずみ、あるいはひずみエネルギー等の、これまで身近に使われて来た概念を用いていない。そのため、いくつかの問題点を有している。計算時間が膨大になること、振動あるいは衝撃問題への拡張の検討が必要なことなどがそれである。

本研究の目的は計算時間を短縮するアルゴリズムを開発すること、および分布荷重にも適用できる U^{**} なる新たな指標を提案することにより、上記の問題点に対して有効な解決策を与えようとするものである。

3. 研究の方法

計算時間が膨大になることが実用化をはばむ最も重大な問題となっている。これを解決するために、現在、内部剛性テンソルを定義し、その成分から一部を抜き出して各点に検査荷重を与える新たな手法を提案してき

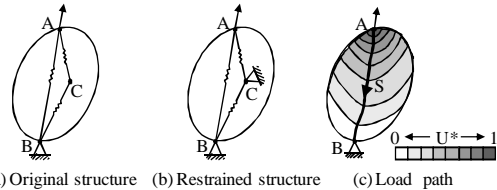


Fig. 1 Internal stiffness and load path

た。この方法によれば、従来はパソコンで 7 日程度を要する計算が、半日で可能となっている。これは有限要素法による計算であり、約 7 万節点のモデルにおける例である。現在では 100 万節点にも及ぶモデルが使われているので、より高速化が必要である。

そのため、更に新たな改良を加え、より高速な計算が可能になるようにすることを考える。これには有限要素法の汎用プログラムの内部の改良が必要である。本研究では標準コードである NASTRAN の内部を変更し、 U^* および U^{**} の計算機能を付加することを考える。

従来は振動あるいは衝撃問題への U^* の適用は困難であったが、その重要性は高い。現在の U^* 解析においては、慣性力を考慮する際に無限大となる項が存在するので、振動および衝撃問題に適用するには理論的な困難がある。そこで、 U^* の内部剛性テンソルに Legendre 変換を施し、 U^* とは相補的な概念である相補結合度 U^{**} の概念を導入を新たに導入した。この概念により無限大の項が消失するので、振動および衝撃問題への適用が可能であるとなった。

新たな相補結合度 U^{**} に関する計算は、 U^* よりも更に時間を要することになるので、これに対する計算高速化は特に重要である。そこでこの計算高速化の基本概念に対して Legendre 変換を施し修正する必要がある。また NASTRAN コードの内部の変更もこれに応じて修正を行った。

4. 研究成果

(1) 指標 U^* および U^{**} の概要 図 1(a) に示すような弾性構造物において、点 A に負荷を与え、点 B を支持する。構造物内の任意点を点 C とする。図 1(b) は (a) と同じ構造物において点 C を固定し、(a) と同じ変位を与えた状態を示している。

内部剛性を用いて図 1 の 3 点 A, B, および C における荷重と変位の関係は次式となる。

$$\begin{Bmatrix} p_A \\ p_B \\ p_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{AB} & K_{AC} \\ K_{BA} & K_{BB} & K_{BC} \\ K_{CA} & K_{CB} & K_{CC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_A \\ d_B \\ d_C \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで添字付きの p は荷重、 d は変位を表す列ベクトルであり、添字付きの K は内部剛性テンソルである。これは有限要素法の初等表記に見えるがそうではない。この式によって構造全体としての挙動が表現されていることに注意したい。図 1(a) の構造物になされた仕事 U を式(2)に示す。積の記号にはテンソ

ルおよび、ベクトルの表記法を用いている。

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \mathbf{p}_A \cdot \mathbf{d}_A \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{K}_{AA} \mathbf{d}_A + \mathbf{K}_{AC} \mathbf{d}_C) \cdot \mathbf{d}_A \end{aligned} \quad (2)$$

図1 (b) は図1 (a) と同一の変位を点 A に与えているが、点 C は拘束されている。このときの仕事を U' としたとき、指標 U^* の値を

$$\begin{aligned} U^* &\equiv 1 - \left(\frac{U'}{U} \right)^{-1} \\ &= \left(1 - \frac{2U}{(\mathbf{K}_{AC} \mathbf{d}_C) \cdot \mathbf{d}_A} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$U^* = \left(1 - \frac{2U}{\mathbf{K}_{AC} \cdot \mathbf{S}} \right)^{-1}, \quad \mathbf{S} \equiv (\mathbf{d}_A \otimes \mathbf{d}_C) \quad (4)$$

で定義する。ここで任意のテンソルを A および B としたときの両者の内積を $A \cdot B$ で示した。記号 \otimes はベクトル間のテンソル積を示しており、記号 \mathbf{S} で示した量を経路変位テンソルと呼んでいる。指標 U^* は \mathbf{K}_{AC} を用いて表現され、負荷点と任意点との間の結合の強さを示している。

一方、指標 U^{**} は、点 C を固定したときの負荷点 A の仕事と W と、点 C を拘束した場合に同一の「荷重」を与えた場合の仕事 W' の比で表現する。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{d}_A \\ \mathbf{d}_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{AA} & \mathbf{C}_{AC} \\ \mathbf{C}_{CA} & \mathbf{C}_{CC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{p}_A \\ \mathbf{p}_C \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \mathbf{d}_A \cdot \mathbf{p}_A & W' &= \frac{1}{2} \mathbf{d}'_A \cdot \mathbf{p}_A \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{C}_{AA} \mathbf{p}_A) \cdot \mathbf{p}_A & &= \frac{1}{2} (\mathbf{C}_{AA} \mathbf{p}_A + \mathbf{C}_{AC} \mathbf{p}'_C) \cdot \mathbf{p}_A \\ U^{**} &\equiv 1 - \frac{W}{W'} \\ &= \frac{(\mathbf{C}_{AA} \mathbf{p}_A) \cdot \mathbf{p}_A - (\mathbf{C}_{AA} \mathbf{p}_A + \mathbf{C}_{AC} \mathbf{p}'_C) \cdot \mathbf{p}_A}{2W'} \\ &= -\frac{(\mathbf{C}_{AC} \mathbf{p}'_C) \cdot \mathbf{p}_A}{2W'} \\ U^{**} &= -\frac{\mathbf{C}_{AC} \cdot \bar{\mathbf{S}}}{2W}, \quad \bar{\mathbf{S}} \equiv (\mathbf{p}_A \otimes \mathbf{p}'_C) \end{aligned} \quad (6)$$

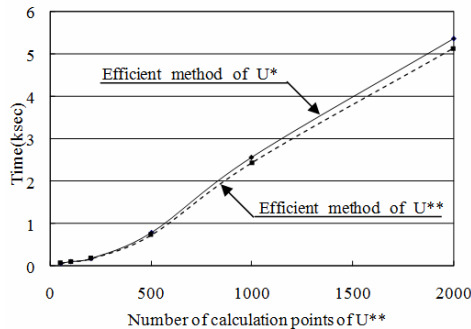


Fig.2 Calculation time

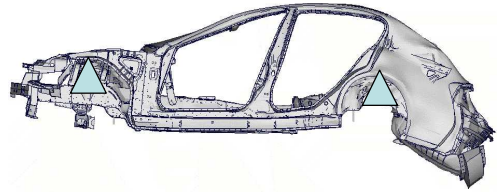


Fig.3 First bending mode

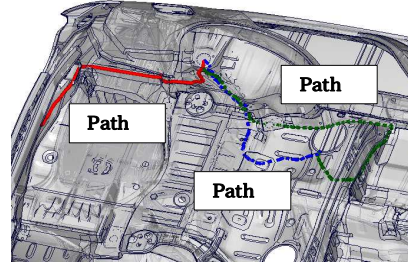


Fig.4 Load paths

(2) 指標 U^{**} 計算の高速化 詳細については省略するが、式(6)と

$$\begin{aligned} -\mathbf{C}_{AC} \mathbf{C}_{CC}^{-1} \mathbf{C}_{CA} \mathbf{p}_A \cdot \mathbf{p}_A &= -(\mathbf{C}_{AC}^T \mathbf{p}_A) \cdot \mathbf{C}_{CC}^{-1} \mathbf{C}_{CA} \mathbf{p}_A \\ &= -(\mathbf{C}_{CA} \mathbf{p}_A) \cdot \mathbf{C}_{CC}^{-1} \mathbf{C}_{CA} \mathbf{p}_A \quad (7) \\ &= -\mathbf{d}_C \cdot \mathbf{C}_{CC}^{-1} \mathbf{d}_C \end{aligned}$$

の関係から、 \mathbf{C}_{CC} を求めるだけで U^{**} を得ることができる。

(3) 指標 U^{**} 計算高速化の例 実際、大型トラックに関して従来の U^* に関する高速化したプログラムの計算時間と、本研究の U^{**} の計算時間を比較した結果を図2に示す。この図より、従来の高速化された U^* 計算は約100倍の高速化を実現したが、本研究による U^{**} 計算もほぼ同等の高速化を実現していると言える。

このアルゴリズムを FEM の汎用ソフトである NASTRAN に組み込み、更に DMAP により U^{**} 専用の計算ソフトを組み込むことによって、全体で約400倍の高速計算が可能となった。現在は NASTRAN と共に供給可能となっている。

(4) 指標 U^{**} の振動問題への適用 前述したように、指標 U^* は慣性力のように分布する荷重に適用できない。しかしながら U^{**} はこれが可能なので、乗用車車体の1次曲げ振動に関する検討を行った。

図3に計算モデルの曲げ1時固有振動モードの変形を生じさせる慣性力を分布外力として負荷し、その時の U^{**} を求めた。これから求めた荷重経路を図4に示す。このように、 U^{**} によれば分布荷重に関する荷重経路を求めることができる。ここにも本研究による U^{**} の高速化計算アルゴリズムを使用した。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者
には下線)

[雑誌論文](計5件)

宮川隼輔, 大宮正毅, 高橋邦弘, 指標 U*
の静電場問題への拡張とポアス構造を
有する層間絶縁膜の構造設計への応用,
日本機械学会論文集 A 編, 査読有, Vol.75,
No.756, 2009, pp.63-70.

松永拓也, 中田達也, 花里将史, 高橋邦
弘, 分布荷重を受ける構造物における荷
重経路解析, 日本機械学会論文集 A 編,
査読有, Vol.75, No.753, 2009, pp.559-565.

上村真人, 八田良行, 伊東周太, 古賀義
徳, 櫻井俊彰, 高橋邦弘, 荷重経路の概
念による構造物の最適化, 査読有, 日本
機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.737,
2008, pp.6-12.

Sakurai, T., Takahashi, K., Kawakami, H.
and Abe, M., Reduction of Calculation Time
for Load Path U* Analysis of Structures,
Journal of Solid Mechanics and Materials
Engineering, 査読有, Vol.1, No.11, 2007,
pp.1322-1330.

櫻井俊彰, 川上博史, 阿部正俊, 高橋邦
弘, 構造物の荷重経路 U*解析における
FEM 計算の高速化, 日本機械学会論文集
A 編, 査読有, Vol.73, No.733, 2007,
pp.975-980.

[学会発表](計7件)

Wang, E., Nohara, T., Ishii, H., Hoshino, H.
and Takahashi, K., Load Path U* Analysis of
Truck Cab Structure under Frontal Collision,
APAC 2009 Proceedings: The 15th Asia
Pacific Automotive Engineering Conference,
査読有, Oct. 27, 2009, Hanoi, pp.105-110.

Wang, E., Yoshikuni, Y., Guo, Q., Nohara, T., Ishii,
H., Hoshino, H. and Takahashi, K., Load Path U**
Analysis of Truck Cab Structures under Frontal
Collision, JSAE Annual Congress Proceedings
(Spring), 査読無, No.104-20095425, May 20,
2009, Yokohama, pp. 105-110.

Okano, Y., Matsunaga, T., Maruyama, S. and
Takahashi, K., Analysis of Vehicle Body
Structures under Eigenmode Deformation of
Bending Vibration, 2009 SAE World
Congress, 査読無, No.2009-01-077, Apr. 22,
2009, Detroit, pp.1 ~ 6.

花里将史, 松永拓也, 丸山新一, 岡野恭
久, 高橋邦弘, 荷重経路解析を用いた車
体構造の補剛手法, 自動車技術会秋季学
術講演会前刷集, 査読無, No.123-08, 2008
年 10 月 22 日, 名古屋, pp.11-14.

岡野恭久, 丸山新一, 松永拓也, 中田達
也, 高橋邦弘, 車体の固有モード形を再
現する入力条件下での荷重経路解析, 自
動車技術会学術講演会前刷集, 査読無,
No.126-07, 2007 年 10 月 17 日, 京都,
pp.5-8.

松永拓也, 中田達也, 岡野恭久, 丸山新
一, 高橋邦弘, 分布荷重下の構造物にお

ける荷重経路と車体への適用, 自動車技
術会学術講演会前刷集, 査読無,
No.126-07, 2007 年 10 月 17 日, 京都,
pp.1-4.

Wang, E., Zhang, X. and Takahashi, K., Load Path
U* Analysis of Square Pipe under Collision, JSAE
Annual Congress Proceedings (Spring), 査読無,
No.17-07, 85-20075297, May 23, 2007,
Yokohama, pp.17-20.

[産業財産権]

出願状況(計3件)

<特許出願中3件>

1. 構造解析数値計算装置

発明者: 高橋邦弘、櫻井俊彰、中田達也、井
上健吾

権利者: 慶應義塾

種類: 特許

番号: 特願 2009-501159 号

出願年月日: 2008 年 2 月 4 日

国内外の別: 国内

2. Numerical Structure-Analysis Calculation
System

発明者: 高橋邦弘、櫻井俊彰、中田達也、井
上健吾

権利者: 慶應義塾

種類: 特許

番号: U.S.Patent Application 12/528,792

出願年月日: 2008 年 2 月 4 日

国内外の別: 国外

3. Computation Device of Numeric Value of
Structural Analysis

発明者: 高橋邦弘、櫻井俊彰、中田達也、井
上健吾

権利者: 慶應義塾

種類: 特許

番号: European Patent Application 08704406.1

出願年月日: 2008 年 2 月 4 日

国内外の別: 国外

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 邦弘 (TAKAHASHI KUNIHIRO)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 60095619

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし