

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656551

研究課題名(和文) ひずみ計測をもとにした外力、構造応答の逆解析に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Inverse Calculation of Impact Load and Structural Response Based on the measured Strain

研究代表者

吉川 孝男 (Yoshikawa, Takao)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50380572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造物に衝撃荷重が作用した場合について、代表点におけるひずみ時刻歴から衝撃外力の作用位置、作用時間、力積の推定する方法を構築した。また、ひずみ計測値を元に推定した各振動モードの最大ひずみ、固有振動数、位相角、および計画構造に対して計算した固有モードを用いて計測点以外の点のひずみ時刻歴を推定する方法を構築した。

また、両端固定の矩形変断面の鋼製板モデル、および補強材付き平板構造の試験モデルを用いて衝撃荷重を作用させた実験を行い、構築した衝撃荷重の逆解析手法を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the procedure of inverse calculation method, which can estimate the peak load, time duration, impulse, and location of impact load from measured time history of strains, was developed.

And, the method for estimating the time history of strains at the points other than measured points was developed using the natural frequencies of the structure, the mode amplitude and phase angle of measured strain, and the natural modes for the initial planning structure, which were estimated from the measured strain history.

The developed inverse calculation technique of impact load was verified using the impact test results for both clamped beam specimen and the stiffened panel specimen.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学 船舶海洋工学

キーワード：逆解析 構造応答 ひずみ計測 外力評価 衝撃荷重

1. 研究開始当初の背景

船舶に作用する荷重は波浪などの不規則な自然現象に起因するものが支配的であるが、これらの推定には波高、波周期などの統計的な処理、波浪中での船体の運動評価が必要であり、スラミング、スロッシング等の衝撃的な荷重の評価には流体・構造連成解析も必要となる。しかしながら、多くの造船会社で流体・構造連成解析技術を実構造設計に適用できるようになるには、今しばらく時間がかかると考えられる。

そこで、高度な流体構造連成解析を実施せずにバウフレアスラミング荷重などの衝撃的な荷重やそれに対する応答を評価する方法を提供するために、実船におけるひずみの時刻歴計測結果から荷重を求め、得られた荷重を用いて計測点以外のひずみを推定する手法を構築しようと考えた。

2. 研究の目的

船舶の強度設計においては、荷重評価、構造応答解析、強度評価が重要な要素である。このうち荷重の推定に関しては、例えば、荷役時にバケットが内底板に衝突する際の荷重や、青浪の甲板への打ち込みやスラミングやスロッシングなどによる衝撃荷重などは、その大きさ、作用時間、頻度などが十分な精度で評価できているとは言い難い。これらの荷重を評価するために衝突解析や流体構造連成解析などの数値計算が用いられることがあるが、今なお、解析手法も含めて多くの研究課題があるのが現状である。

そこで本研究では、衝撃的な荷重を数値計算によって直接に求めるのではなく、ひずみや加速度などの計測値から逆解析して求め、求めた荷重を用いて構造応答を評価し、強度評価につなげる手法の構築を試みる。

3. 研究の方法

これまでに、静的荷重、周期的振動荷重の逆解析手法の研究を先行的に行っているが、本研究においては、先行研究の成果を進展させ、まず、グラブバケットによる衝撃荷重をひずみ計測結果から推定する手法について研究を行う。その際、荷重の作用時間 T_f が構造の固有周期 T_s に比べて短い場合だけでなく、より評価すべき項目が多くなる T_f と T_s が同程度である場合についても評価手法を構築する。また、実構造の寸法が設計計画値に対して誤差のある場合や、ひずみ計測誤差がある場合について、荷重の推定精度を向上させる方法について検討する。逆解析手法にはカルマンフィルタ、ニューラルネットワーク、ニューロファジィなどの方法もあるが、本研究目的に最も適した最小2乗法による逆解析手法を進展させて適用する。

4. 研究成果

衝撃荷重の作用位置、作用時間と力積の推定方法を新しく提案している。また、推定し

た荷重を用いてひずみを計測していない箇所におけるひずみの時刻歴を推定する方法についても提案している。

Fig.1 に示す両端固定の梁に衝撃荷重が作用する場合を例に、その推定方法を説明する。

(1) 衝撃荷重の作用位置推定方法について
ひずみ計測位置および応答の評価点を

Fig.1 に、モデル寸法などをTable 1 に示す。

まず、各計測点におけるひずみ応答の時間遅れの関係を用いて衝撃外力の作用位置を推定する。Fig.2 は、ひずみの計測結果の例であるが、この場合にはひずみの立上がり時刻の違いから衝撃力の作用位置は X_5 と X_9 の間に生じ、 X_6 に最も近いことが分かる。しかし、これだけでは X_6 の左側か右側に衝撃力が作用しているか分からない。そこで、計測点6 に対しての計測点5 と計測点9の遅れ時間を考え荷重の作用位置も求める。Fig.3 は計測点6 付近の拡大図を示している。Fig.3 に示すように外力の作用位置を計測点6 の左側に仮定する。荷重の作用点から計測点6 と等距離にあり、かつ計測点6 と左側にある点を X とする。このとき、 X 点のひずみの計測を行った場合にはひずみの立上がり時間は計測点6 と同じ時間になると考えられる。伝搬時間と時間遅れとの比例関係を用いて次式より d_{5x} を求めることができる。

$$\frac{t_{x5}}{d_{5x}} = \frac{t_{69}}{d_{69}} \quad (1)$$

よって、衝撃作用位置は計測点5 と点 X の中心位置となる。もし、 $d_{5x} > d_{56}$ (計測点5 と計測点6 の長さ) となれば、計測点6 の右側に外力の作用位置を仮定して上記の手法で計算すれば作用位置を求めることができる。

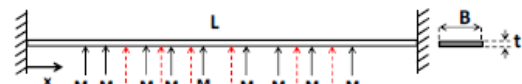


Fig.1 Both end clamped beam and location of measuring and evaluating points

Table 1 Model scantling and material property

Items	
Length L(mm)	1000
Breadth B(mm)	30
Thickness t(mm)	3.2
Material	Aluminum
Young's modulus E (MPa)	7.0×10^4
Poisson rate γ	0.35
Density ρ (kg/m ³)	2.7×10^3

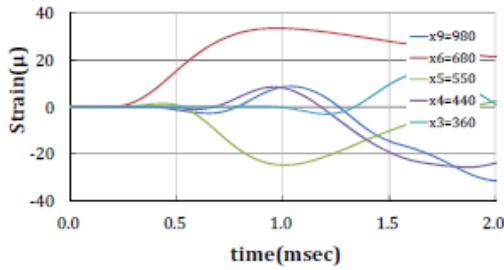


Fig. 2 Time history of strain at measuring points

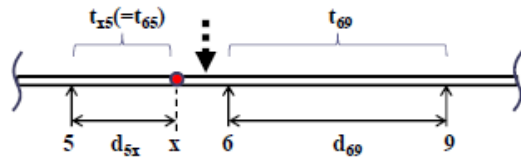


Fig. 3 Position of the impact force

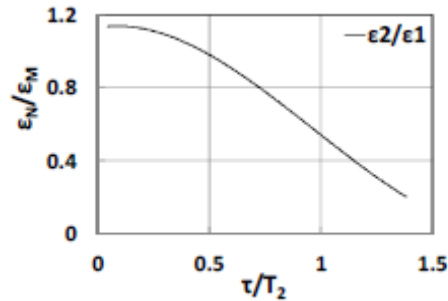
(2) 作用時間と力積の推定方法について

衝撃荷重の作用時間および力積を求めるための準備として、計画寸法のFEMモデル上で、推定した荷重の作用位置に力積一定で作用時間の異なる衝撃外力を与え、各衝撃外力に対する1~4次モードの下記関係を求める。

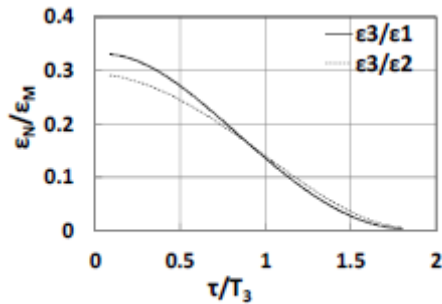
1) 単位力積あたりのN次とM次のモード最大ひずみの比 ϵ_N / ϵ_M と、作用時間とN次モードの固有周期の比 τ / T_N の関係(ここに、 $N, M=1, 2, 3, \dots, N > M$)

2) 単位力積あたりのN次モードの最大ひずみ ϵ_N と、作用時間とN次モードの固有周期の τ / T_N の関係

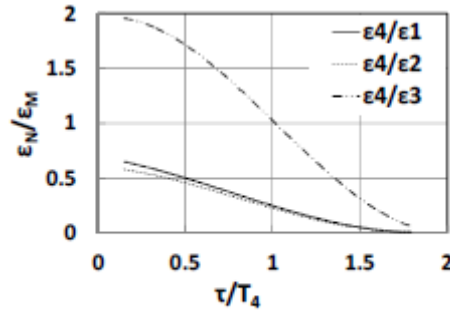
Fig. 4, Fig. 5 にこれらの関係を求めた結果を示す。次に、ひずみ計測結果をFFT処理し、各振動モードの計測点でのモードひずみ、固有振動数、位相角を求める。さらに、計測点のモードひずみから、計画寸法に対する各ひずみモード分布を用いて、各モードの最大ひずみの生じる位置でのモードひずみ振幅を求める。これらの結果をもとに最大ひずみ比 ϵ_N / ϵ_M ($N > M$) を算出し、Fig. 4, 5 の相対関係を用いて、 τ / T_N を求める。この結果とN次モードの固有周期 T_N より、 τ が得られる。なお、誤差が大きくなると考えられる値を除いた値の平均を衝撃荷重の作用時間の推定値とする。また、求めた τ / T_N とFig. 4, 5 の相対関係を用いて、単位力積あたりの最大ひずみを求め、FFT解析した最大ひずみとの比より、衝撃荷重の力積を求める。



(a) 2nd mode

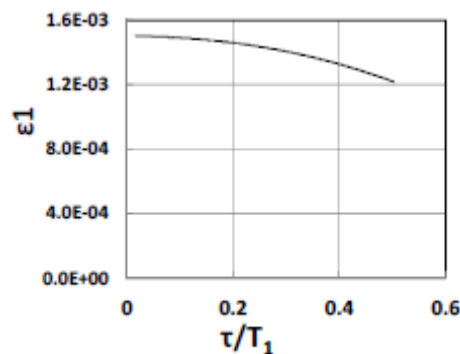


(b) 3rd mode



(c) 4th mode

Fig. 4 Relation between ϵ_N / ϵ_M ($N > M$) and τ / T_N under unit impulse



(a) 1st mode

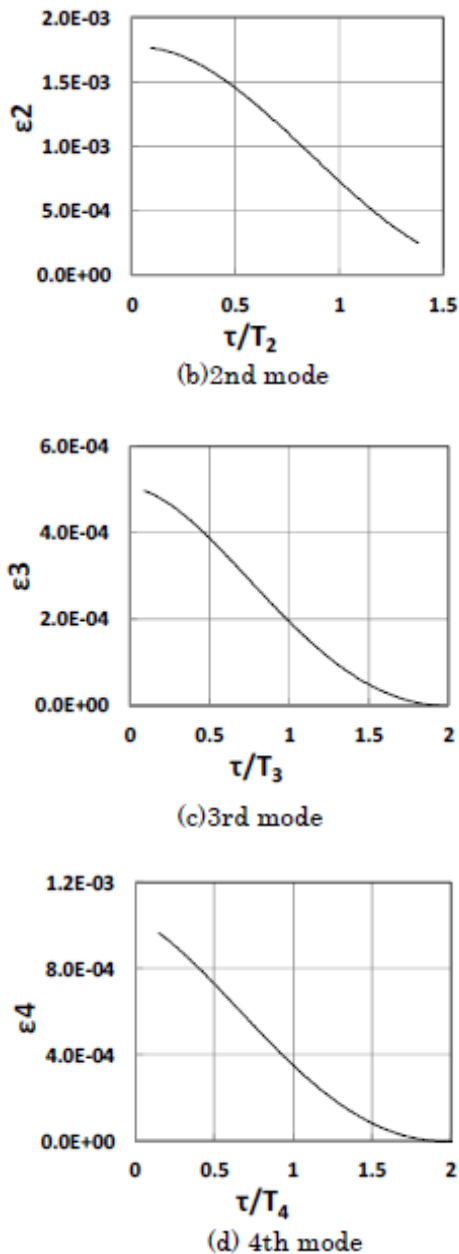


Fig.5 Relation between maximum strain ε_y and τ/T_N under unit impulse.

- (3) 構造応答の推定方法について
 計測点以外の点のひずみ時刻歴を推定する方法としては、以下の2つの方法が考えられる。
 1) 作用時間および力積など荷重の推定結果を用いてFEM解析を行い、計測点以外の点のひずみ時刻歴を推定する。
 2) ひずみ計測値をもとに推定した各振動モードの最大ひずみ、固有振動数、位相角、および計画構造に対して計算した固有モードを用いて計測点以外の点のひずみ時刻歴を推定する。

両者について推定精度の比較を行った。その比較は次章で示すが、推定精度は2)の方法が良いとの結果であった。なお、構造の応答を評価するには減衰比の推定も必要となる。

本研究では、ひずみ計測結果をFFT処理して各モードの最大ひずみを求める際に、FFT

処理する計測時刻を変えた2ケースのモード振幅から各モードに対する減衰比を推定する手法を採用している。以下にその手法について説明する。

Fig.6(a)と(b)に、サンプリング時間がそれぞれ1秒と2秒の計測ひずみの例を示す。これらの計測ひずみをFFT処理して、1次~5次の振動数 f_i と、各振動数に対するひずみ振幅 ε_i (ε_i^a と ε_i^b) と位相 φ_i を求める。求めた1次~5次までの振動を重ね合わせ、(2)式を用いての時刻歴のひずみデータを生成する。

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^5 \varepsilon_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

生成したひずみの履歴を推定値とし Fig.6(a)と(b)に合わせて示す。この推定結果には、減衰が含まれていないために、計測期間中のひずみの振幅に大きな変化は生じていない。両図において、計測値と推定値の振幅がほぼ等しくなる時刻を読み取って t_a と t_b とし、(3)式に基づいて各振動モードの対数減衰率を評価する。

$$\delta_i = \frac{1/f_i}{(t_b - t_a)} \ln \frac{\varepsilon_i^a}{\varepsilon_i^b} \quad (3)$$

(3)式は、時刻 t_a と t_b の間に、各固有振動の波が $(t_b - t_a) / (1/f_i)$ 個だけあると考え、その間に各振幅が ε_i^a から ε_i^b まで変化したものと考えて対数減衰率を評価したものである。

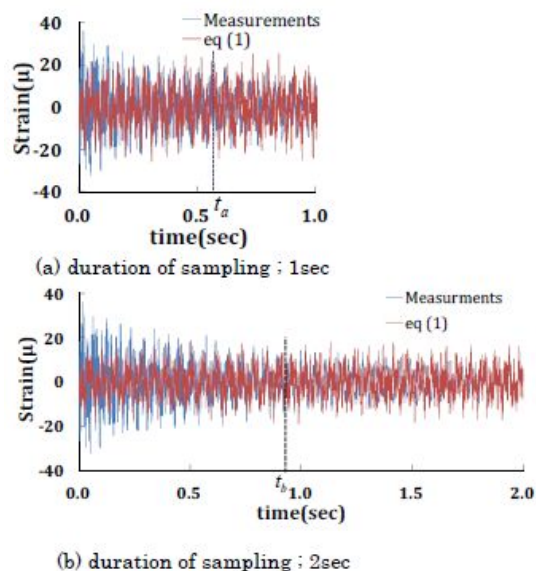


Fig.6 Time history of measured and estimated strain

(4) 衝撃荷重および構造応答の推定結果の検証について

両端固定の矩形断面の鋼製板モデルを用いて、代表点におけるひずみ時刻歴の計測値より衝撃外力の作用時間、力積、ピーク荷重、および計測点以外の任意位置のひずみ時刻歴を推定し、構築した推定方法を検証する。使

用した試験体の寸法などをFig.7 に示す。使用した材料は軟鋼である。実験は2 体に対して行ったが、1 体は一樣断面梁とし、他の1 体は幅方向に深さ5mm の切欠き部分を4 か所設けて、剛性が長さ方向に変化する変断面梁モデルとした。実験ではインパクトハンマにてモデルを加振したが、ハンマの先の材質を変更することによる衝撃外力の作用時間を变化させた。

一樣断面梁，および変断面梁モデルに対して前述の方法を用いて衝撃外力の力積を推定した値をTable.2 に示す。表中の衝撃荷重の実測値はインパクトハンマの加速度の計測値から荷重を評価したものである。また、変断面梁に生じる構造応答を推定した結果をFig.8とFig.9 に示。Fig.8 は変断面梁に対して、3 章の1)の方法を用いて求めた衝撃外力の推定値を計画寸法のFEM モデルに与えて計算した結果を示し、Fig.9 は2)の方法、すなわち、ひずみの計測結果より求めた固有振動数、位相角、および計画構造に対して計算した固有モードを用いて計算した計測点以外の点のひずみ時刻歴を推定した結果を示す。両図には、ひずみ履歴を推定した点での実際の計測ひずみの結果も合わせて示している。後者がより精度よく推定できることが分かる。また、Table.2 に示した衝撃荷重の力積の推定値の誤差は大きい、これに比べてFig.8 に示した応答値の推定値と実測値の差が小さいことから、実験のインパクトハンマの加速度の計測値から評価した力積にも誤差が含まれていたものと推定される。なお、以上では両端固定の梁の衝撃荷重が作用する場合について示しているが、補強材付パネルに衝撃荷重が作用する場合についても同様の検討を行い推定する方法の検証を行っている。

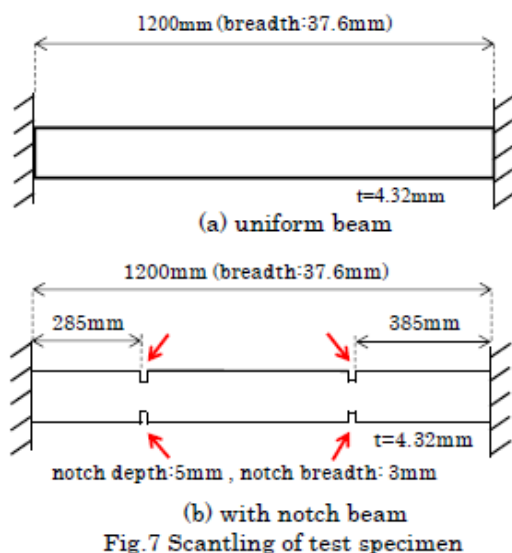


Fig.7 Scantling of test specimen

Table 2 Evaluated value of impact load for uniform beam and beam with notch

model		Uniform beam	With notch beam
impulse	Evaluation[Ns]	0.092	0.143
	Measurement[Ns]	0.26	0.44
	error	-64%	-67%

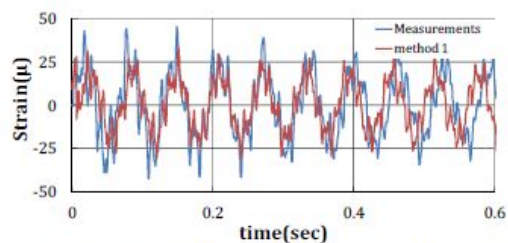


Fig.8 Time history of measured and estimated strain (for with notch model using method 1, at x=640mm)

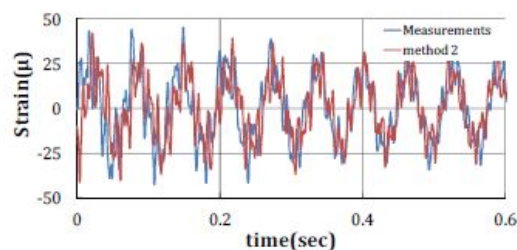


Fig.9 Time history of measured and estimated strain (for with notch model using method 2, at x=640mm)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

前田正広、李鵬、吉川孝男、ひずみ計測結果をもとにした外力と構造応答の逆解析、査読無、日本船舶海洋工学会講演会論文集，第16号，pp495-500，2013年

〔学会発表〕(計3件)

Peng LEE, Masahiro MAEDA, Takao YOSHIKAWA, A Study on Inverse Calculation of Impact Load from Response Value, Proceedings of the 26th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, pp221 -225 , 2012
 前田正広、李鵬、吉川孝男、ひずみ計測結果をもとにした外力と構造応答の逆解析、日本船舶海洋工学会講演会、2013年
 Takao YOSHIKAWA, Masahiro MAEDA, Numerical Simulation of Structural Response under Bow Flare Slamming Load, Proceeding of the 4th International Conference on Marine Structures, pp.25-33, 2013

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川孝男 (YOASHIKAWA Takao)
九州大学大学院・工学研究院・教授
研究者番号：50380572

(2) 研究分担者

前田正広 (Maeda Masahiro)
九州大学大学院・工学研究院・助教
研究者番号：70173713

(3) 連携研究者

なし