

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289334

研究課題名(和文) 横荷重および衝突残存変形下の船体縦曲げ最終強度の効率的な解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of effective calculation procedure for hull girder ultimate strength under lateral loading and after damaged by collision

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) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：2種類のばら積み船について、横荷重影響の大きな隔倉積み状態での縦曲げ最終強度を計算した。その結果、船底が圧縮応力となるHogging状態では横荷重影響で縦曲げ最終強度が25%程度低下するのに対して、船底が引張り応力となるSagging状態では横荷重による縦曲げ最終強度の低下は極めて小さいことが確認できた。また、Box Girder縮尺モデルを用いて、4点曲げ試験を実施して、その最終強度を非線形FEM解析結果と比較して、計算精度検証を行った。さらに、実船での形状初期不整や腐食により板厚減耗のばらつきの影響が縦曲げ最終強度に及ぼす影響をモンテカルロシミュレーションを用いて評価した。

研究成果の概要(英文)：Hull girder ultimate strength of two types of bulk carriers are calculated under the alternative loading condition which gives much effect of lateral loading. It was confirmed that the hull girder ultimate strength reduces 25% due to lateral loading when hogging condition in which the bottom parts are in compression. The accuracy of FE calculations for ultimate strength are confirmed by comparison to the experimental results for four points bending test of box girder models. Moreover, the effect of uncertainties such as the amplitude of geometrical initial imperfection and thickness reduction by corrosion on the hull girder ultimate strength are investigated utilizing the techniques of Monte Carlo Simulations.

研究分野：船体構造力学

キーワード：最終強度 船体縦曲げ強度 横荷重影響 FEM解析 Smith法 換算細長比 形状初期不正

1. 研究開始当初の背景

構造規則における船体縦曲げ最終強度の算定方法は Smith 法をベースにしている。また、2014 年の発効を目指して IACS(国際船級協会連合)から提案された H-CSR においては、貨物荷重や水圧などの横荷重によって二重底などに生じる Local な付加応力によって船体縦曲げ最終強度が低下する割合を FEM 計算により求め、その影響度を Smith 法で計算した最終強度に対して低減係数の形で取り込もうとしている。横荷重によって縦曲げ最終強度が低下する影響を考慮してルール算定式を見直すという方向性は正しいものであるが、その影響を FEM で求めるには非線形解析が必要となり、時間がかかる。そのため、船級協会では限られた数の船舶に対する計算結果をもとに低減係数を算定して、求めた低減係数をすべての船舶に適用することを要求している。しかも、この低減係数を求める FEM 解析の計算条件は形状初期不整が最終強度に及ぼす影響も含めて明らかにされていないなどの問題点もある。

2. 研究の目的

本研究では、最初に形状初期不整も考慮した非線形 FEM 解析を実施して横荷重や損傷が船体の縦曲げ最終強度に及ぼす影響を明らかにする。さらに、解析的な手法を取り入れて、損傷の影響を評価できる計算手法を新たに開発して、設計段階で適用できるよう短い時間で損傷が最終強度に及ぼす影響を評価できるようにする。

また、横荷重が船体縦曲げ強度に及ぼす影響だけでなく、座礁、衝突して変形や破断が生じた船舶の縦曲げ最終強度を含めて統一的に評価する手法についても検討し、その解析手法を構築するとともに、その計算精度を FEM 計算や実験結果などと比較して検証する。

3. 研究の方法

1)ばら積み貨物船を解析対象として、横荷重の大きな隔倉積みの貨物倉や、空倉などを想定し、 π および $\pi/2$ 曲げモーメント下での最終強度の評価を行ない、横荷重が最終強度に及ぼす影響を調べる。この際、パネルの初期たわみや、補強材の曲げ座屈モードおよび横倒れモードの初期不整を含んだ FEM 解析モデルを作成し、大たわみと弾塑性影響を考慮した非線形計算を行って初期不整による縦曲げ最終強度の低下と横荷重による最終強度の低下の相互影響について明らかにする。

2)補強パネルの座屈および座屈後評価において、パネルの局部座屈、補強材の曲げ座屈、補強材の横倒れ座屈、ならびに座屈後挙動を短時間で解析的に追跡する手法を構

築する。また、補強パネルの非線形 FEM 解析と比較してその計算精度を検証する。また、Smith 法に基づく船体縦曲げ最終強度解析プログラムに、構築した補強パネルの座屈、座屈後解析手法を組み込む。

3)座礁、衝突した船舶の縦曲げ最終強度を含めて統一的に評価する手法とするために座礁、衝突によって大きく変形した補強パネルの座屈、座屈後挙動についても適用できるようにする。1 つの補強材に大きな面外変形が生じた場合には、その補強材の変形がパネルを介して隣接する補強材の挙動に影響を及ぼすことが想定される。そこで、隣接部材の挙動も含めて、Smith 法に基づく船体縦曲げ最終強度解析プログラムに組み込む。

4)座礁、衝突時の部材の破断挙動も含めて解析できるようにする。この際に、材料の破断ひずみは、応力の 3 軸度によって変わることが指摘されており、3 軸応力度の影響を考慮した破断挙動解析を行う。

4. 研究成果

(1)船体縦曲げ最終強度の及ぼす横荷重影響
計算方法

近年、パルクキャリアにおける隔倉積み付け状態によって生じる横荷重により、縦曲げ最終強度が低下することが報告されている。しかしながら、計算結果は研究グループ毎に異なり一般性に欠ける。そこで、初期不整の影響を考慮したうえで、船体縦曲げ最終強度に及ぼす横荷重の影響を調べるとともに、著者らが開発した簡易計算手法「ULST」を用いた計算結果との比較を行った。

パナマックスパルクキャリアを計算対象とした。初期不整は、Fig.1 の赤線で示すように、パネルには局部座屈モードと防撓材の曲げ座屈モードの和を与え、防撓材には曲げ座屈モードおよび横倒れ座屈モードを与えた。なお、フランジには、ウェブと直角を保つように初期不整を与えた。

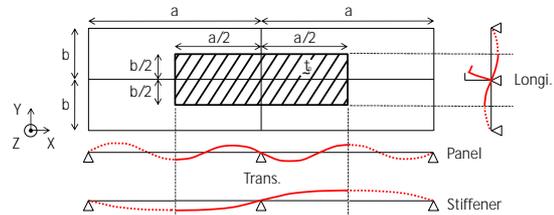


Fig. 1 Schematic Diagram of Initial Deflection.

CSR-BC では直接強度評価で考慮すべき標準積み付け状態が規定されており、今回の計算では Table 1 に示す 8 ケースの計算を行った。

Table 1 Calculation Cases.

	Global Moment	Initial Imperfection	Lateral Load	Object Hold
Case_1	Hogging	without	without	-
Case_2	Sagging			-
Case_3	Hogging	with	without	-
Case_4	Sagging			-
Case_5	Hogging	without	with	Empty Hold
Case_6	Sagging			Cargo Hold
Case_7	Hogging	with	with	Empty Hold
Case_8	Sagging			Cargo Hold

計算結果

計算で得られた縦曲げモーメントと曲率の関係を Fig.2 に示す。また、Fig.2 の縦曲げモーメントの最大値で表される最終強度を Table 2 に示す。

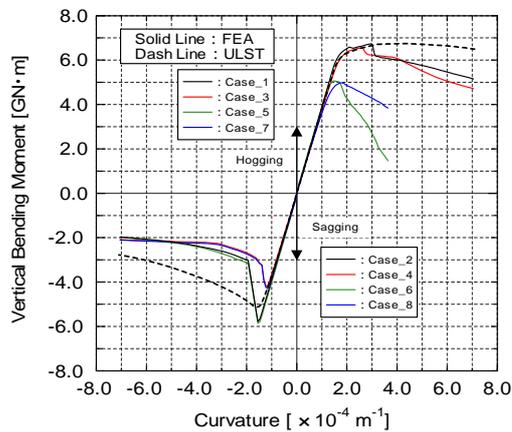


Fig. 2 Relation between Vertical Bending Moment and Curvature.

Table 2 Hull Girder Ultimate Strength [GN·m]

	Initial Imperfection Lateral Load	FEA		ULST
		without	with	
Hogging	without	6.73	6.55	6.75
	with	5.07	4.98	
Sagging	without	-5.78	-4.18	-5.12
	with	-5.85	-4.29	

まとめ

船体縦曲げ最終強度に及ぼす横荷重および初期不整の影響について検討したところ、横荷重や初期不整の影響により縦曲げ最終強度の低下が見られたものの、横荷重および初期不整は同時には影響しないことがわかった。横荷重の影響は、Hogging 状態で顕著であり、今回の計算条件では最大で 25% の最終強度の低下が生じた。また、初期不整の影響は、甲板部の座屈によって最終強度を迎える Sagging 状態で顕著であった。これは、甲板部

の補強材間隔が船底部に比べて長く、甲板部にはより大きな初期不整が存在するためであり、今回の計算条件では最大で約 28% の最終強度の低下が生じた。したがって、船体縦曲げ最終強度を検討する際には、横荷重および初期不整の影響を考慮する必要があることがわかった。なお、横荷重の影響により、Sagging 状態において最終強度がわずかに上昇する原因に関しては今後の課題である。

(2) 防撓材のねじれ変形を考慮した防撓パネルの最終強度推定法

計算方法

本研究では、防撓材の捩れ変形を考慮したエネルギー原理に基づく解析手法を構築し、弾塑性 FE 解析結果との比較を行った。

対象構造は、Fig.3 に断面を示す angle-bar を有する防撓パネルである。

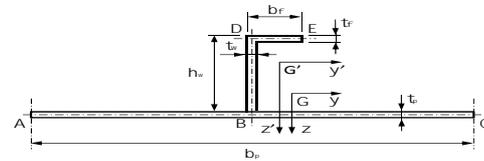


Fig.3 Cross section of stiffened plate

本計算では、防撓パネル全体に蓄えられるひずみエネルギー U として、純捩り変形によるひずみエネルギー U_T 、水平方向曲げ変形によるひずみエネルギー U_{Bh} 、鉛直方向曲げ変形によるひずみエネルギー U_{Bv} 、曲げ捩り変形によるひずみエネルギー U_{θ} およびパネルと防撓材との基部における回転変形によるひずみエネルギー U_R を考慮した。また、外力による仕事量 W_e は次式で表される。

$$W_e = Pu = \sigma Au$$

ただし、 σ は圧縮応力、 A は断面積を表す。ここで、 x 軸方向の軸変位 u は、軸ひずみによる軸変位 u と曲げ変形および捩れ変形による幾何学的な軸変位 u_w, u の重ね合わせで表されるものとする。

$$u = u_c + u_w + u_\theta$$

各項の詳細は参考文献を参考にされたい。

最小ポテンシャルエネルギーの原理と

応力増分法を適用して逐次計算を行うことで、塑性化に伴う剛性低下や捩り変形の影響を考慮し、平均圧縮応力 ~ 平均圧縮ひずみ関係を求めた。

計算結果

弾塑性 FE 解析および簡易計算によって得られた平均圧縮応力 ~ 平均圧縮ひずみ関係の一例 (パネル板厚 $t_p = 22$ mm) を Fig. 4 に示す。図より、本解析手法は比較的精度良く最終強度および最終強度までの挙動を推定可能であることが分かる。ここで、横軸の平

均ひずみに関して、最終強度付近で顕著な変形が見られるが、これは捩れ変形によって軸変位が進むためであり、捩れ変形を考慮することで推定精度の向上が確認できた。

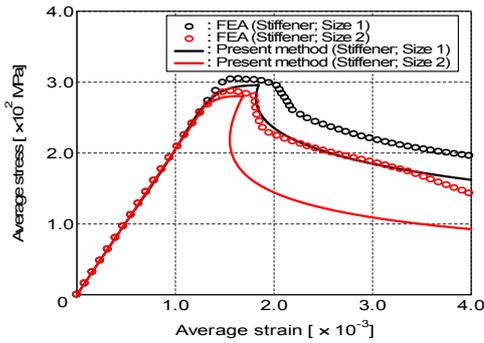


Fig. 4 Relationship between average stress and average strain (plate thickness; $t_p = 22$ mm).

結言

防撓パネルの最終強度を正確に推定するために、防撓材の捩れ変形を考慮した解析手法を構築し、弾塑性 FE 解析結果との比較から提案手法の妥当性を検証した。その結果、最終強度および最終強度までの挙動は比較的精度良く推定可能であることを確認した。しかしながら、最終強度後の挙動には、提案手法と FE 解析結果との間に大きな相違が見られ、この点に関する改良が今後の課題である。その他にも、防撓材の種類が異なる flat-bar や tee-bar に対する適用性の検証や隣接防撓パネルの影響を考慮可能な手法への拡張などが残された課題である。

(3) 衝突変形後の補強パネルの残存強度評価

衝突によって損傷を受けた補強パネル構造における残存強度を調べ、損傷部材に対する平均軸応力～平均軸ひずみ関係の簡易計算法の構築を目標として研究を行った。

衝突による船側構造の残存変形の計算

他船の船首部がダブルハルトンカーの船側構造に衝突する場合を想定し、トランス間隔および補強材寸法をパラメータに、衝突させる船舶重量を種々変えて、一連の衝突変形計算を行った。

まず、損傷部直上である Stiffener A、および隣接する Stiffener B における面外変形量の時刻歴を調べた。損傷部における残存変形量は、衝突させた船舶重量の増加に伴い増加しているが、Stiffener A において、同じ船舶重量を用いた場合には、トランス間隔の変化に関わらず、残存変形量に大きな差異は見られなかった。この原因としては、損傷部直上では、変形が損傷部周辺で局所的になっており、トランス材による影響をさほど受け

にくいためであると考えられる。

損傷を受けた船側構造における残存強度計算

次に、損傷部材における残存強度特性を求めるため、損傷部材における平均軸応力～平均軸ひずみ関係を調べた。そして、健全部材の最終強度と比較することで、最終強度低下率～残存変形量関係を求めた。さらに、変形によって生じた残留応力が残存強度に及ぼす影響についても検討を行った。

代表として、トランス間隔が 2,610 [mm] の計算モデルに対し、圧縮方向強制変位を与え、得られた Stiffener A における平均軸応力～平均軸ひずみ関係の比較を Fig.5 に示す。この結果より、損傷部材における残存強度の最大値や剛性は、残存変形量の増加に伴い低下する傾向にあるものと考えられる。

得られた平均軸応力～平均軸ひずみ関係より求めたヤング率に関する補正係数 (γ_E)～無次元化残存変形量関係の一例を Fig.6 に示す。これを見ると、トランス間隔の変化に関わらず、これらの関係は、比較的良好な一致を示し、一本の近似曲線で表せるものと考えられる。同様に、降伏応力に関する関係も求めた。

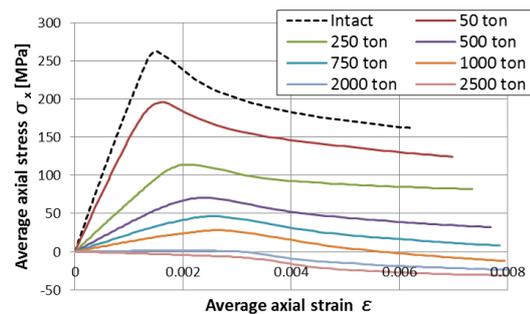


Fig.5 Relationships between stress and strain of stiffener A (Without residual stress)

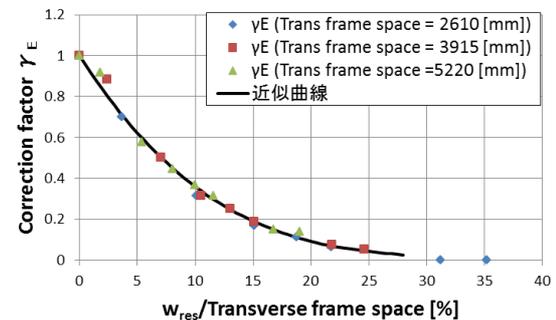


Fig.6 Relationships between correction factors and normalized residual deformation

まとめ

ダブルハルトンカーの船側構造に対し一連の衝突変形計算を行い、衝突させる船舶重量およびトランス間隔が残存変形量に及ぼ

す影響を明らかにした。また、損傷を受けた船側構造に対し残存強度計算を行うことで、残存変形量およびトランス間隔が損傷部材における残存強度に及ぼす影響について検討を行った。ここでは、求めた補正係数～無次元化残存変形量関係を用いることで、比較的精度良く損傷部材における平均軸応力～平均軸ひずみ関係を推定できることを確認した。

(4) 3軸応力度の影響を考慮した船体構造部材の破断解析 はじめに

FEMを用いた衝突解析では、要素の生じる相当塑性ひずみがある限界値を超えると破断が生じたものとしてその要素を消去する方法が用いられる。本研究では3軸応力度によって破断ひずみが増加する影響を考慮することで破断解析の精度向上を図った。

破断ひずみと3軸応力度の関係を調べるために、切欠径が異なる5種類の円周切欠丸棒の引張試験を行い、破断位置(切欠底の断面中心)の3軸応力度と塑性ひずみを求めた。破断解析では破断が発生する条件を相当塑性ひずみで評価するので、弾塑性域での3軸応力度を評価する必要があると考え、弾塑性解析を行った。

Fig.7に3軸応力度-破断ひずみ関係の弾性解と弾塑性解の比較を示す。弾塑性解の場合は弾性解の場合より3軸応力度の影響は低くなった。また、今回の3種類の鋼材に関しては、材料強度による3軸応力度影響の違いは顕著には見られなかった。(Fig.8)

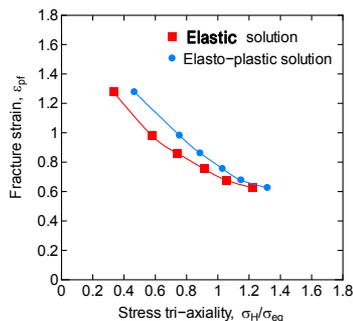


Fig.7 The relationship between fracture strain and stress tri-axiality (MS)

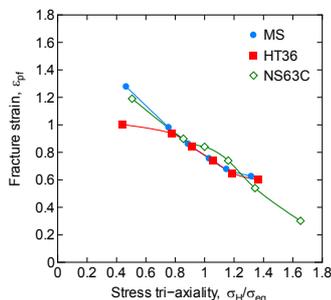


Fig.8 The relationship between fracture strain and stress tri-axiality (For three materials)

Shell要素を用いた構造モデルの破断シミュレーション

最終的に船体の衝突解析などを行う場合はshell要素を使用して構造解析を行う必要がある。そこで、Fig.9に示す構造モデルを用いて破断試験およびshell要素を使用した破断のシミュレーションを行ない、実験値と比較し解析精度を検証した。

Shell要素を使用する場合はsolid要素の場合と比べてメッシュサイズが粗いため、切欠丸棒の破断ひずみ-3軸応力度の関係をそのまま使用することはできない。そこでshell要素を使用して平板引張試験のシミュレーションを行い破断ひずみの値を1点求め、破断ひずみ-3軸応力度の関係は切欠丸棒の破断ひずみ-3軸応力度関係の比で外挿した。

解析結果をFig.10に示す。3軸応力度の影響を考慮した場合の荷重-治具変位の関係は概ね実験値と一致した。しかしながら、shell要素の破断ひずみ-3軸応力度の関係を外挿により求めているので、今後はshell要素でモデル化できる薄板構造で2軸応力状態となる試験を行って破断ひずみを求め、shell要素を用いた破断ひずみの精度を向上させる必要がある。

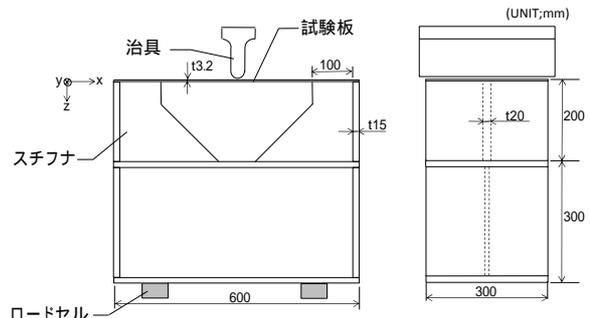


Fig.9 Model for fracture test of plate structure(mesh size of upper plate ; 5mm)

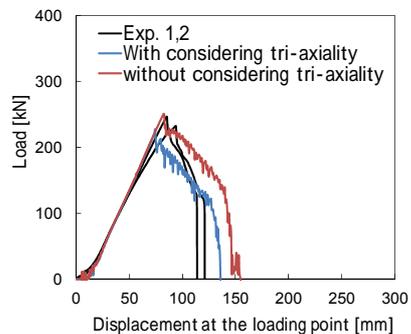


Fig.10 Load- displacement curve of stiffened plate structure

まとめ

破断ひずみと3軸応力度の関係を調べるため円周切欠丸棒引張試験を行った。また、弾塑性域では破断位置の3軸応力度は周囲領域の塑性化に伴い大きく変化することを考慮し

て、弾塑性域の平均的な3軸応力度を求めた。

Solid要素を用いた塊体の破断シミュレーションを実施し、3軸応力度の影響を考慮した場合は考慮しない場合よりも実験値に近い値が得られた。Shell要素を用いた構造モデルの解析では概ね実験値と一致したが、shell要素の破断ひずみ-3軸応力度の関係を外挿により求めているので、shell要素の破断ひずみの取り扱いについてはさらなる検討が必要である。船体船側構造の衝突シミュレーションを行った結果、3軸応力度の影響を考慮した場合の拘束反力のピーク値は2割程度低くなったため、船舶の衝突解析においても3軸応力度の影響は考慮すべきと考ええる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

藤公博, 吉川孝男

健全時および損傷後の船体縦曲げ最終強度に関する一研究

日本船舶海洋工学会論文集, 査読有,
第22号 2015年, pp.137-150

〔学会発表〕(計9件)

Ristiano Adiputra, Takao Yoshikawa,

A Probability Study on Hull Girder Ultimate Strength of Bulk Carrier considering Structural Uncertainties, Proceedings of the 25th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, pp.9-16, 2016年10月12日, Mokpo, Korea,

Kimihito Toh, Shunsuke Maeda, and Takao Yoshikawa

A Study on the Simplified Calculation Method for the Residual Ultimate Strength of Damaged Structures, Proceedings of OMAE2016, The 35th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2016-54673, 2016年6月21日, Busan, Korea

Takao Yoshikawa, Maeda Masahiro, Toh Kimihito Takuya Ishibashi

Fracture Analysis considering the Effect of Stress Tri-axiality, Proceeding of ICCGS2016 (Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures), pp55-62, 2016年6月16日, Ulsan, Korea

Kimihito Toh, Shunsuke Maeda, and Takao Yoshikawa

A Study on the Simplified Calculation Method for Hull Girder Ultimate Strength of Damaged Hull Structures, The 25th International Offshore and Polar Engineering Conference, vol.4, pp1144-1152, 2015年10月14日, Vladivostok, Russia

Shunsuke Maeda, Kimihito Toh, Masahiro Maeda, and Takao Yoshikawa

The averaged stress-strain curve of the stiffened

panel under compression after damaged by lateral impact load, Proceedings of the 29th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, pp156-163, 2015年10月13日, Vladivostok, Russia

Takao Yoshikawa, A Bayatfar, B. J. Kim, C.P. Chen, D. Wang, J. Boulares, J. M. Gordo, L. Josefson, M. Smith, P. Keading, P. Jensen, R. Ojeda, S. Benson, S. Vhanmane, S. Zhang, X. Jiang, X. Quin

Ultimate Strength, Proceedings of The 19th International Ship and Offshore Structures Congress, Vol.1, pp279- pp.350, 2015年9月8日, Lisbon, Portugal

Kimihito Toh, Takao Yoshikawa

A study on the effect of lateral load on the hull girder ultimate strength of bulk carriers, Proceedings of the 5th international conference on the marine structures, pp.425-433, 2015年3月24日, Southampton, England

Kimihito Toh, Masahiro Maeda, and Takao Yoshikawa

The Effect of Initial Imperfections and Lateral Loads on the Hull Girder Ultimate Strength of Intact and Damaged Ships, The 22th International Offshore and Polar Engineering Conference, vol.4, pp898-904, 2014年6月11日, San Francisco, USA

藤公博, 吉川孝男

防撓材の捩れ変形を考慮した補強パネルの最終強度推定法, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第19号, pp487-490, 2014年5月26日, 仙台国際センター

〔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