

# 自走浮橋の開発と諸性能

## Development and Performances of Amphibious Floating Bridge

内 海 昭 夫\* 久 保 務\*

Akio Utsumi Tsutomu Kubo

### 要 旨

日立製作所でこのたび試作完成した防衛庁の発注による自走浮橋は、わが国で前例のない水陸両用の自走式渡河器材で、きびしい軽量化の要求のため、構造部分を全面的に新材料 Al-Zn-Mg 合金の溶接構造とし、そのほかの部分も広範囲にアルミ化し、かつ厳密な荷重、応力の解析と時間強度設計を行なっている。また、水上性能と浮橋性能には未知の問題が数多くあり、かつ水陸両用のための困難な水密構造の設計、施工が必要であったが、これらを克服して所期の性能、強度の製品を完成納入することができた。本文はその概要の紹介である。

### 1. 緒 言

従来、応急渡河器材として用いられている組立式固定橋浮のう橋は構築に多くの時間と人員と器材を必要とするため、欧米では既にこれらを水陸両用自走化して機動力、能率を飛躍的に向上させつつあり、わが国においてもこれをりょうがするものを開発する必要がある。しかしながらかかる様式の車両はわが国では全く前例がなく、また外国ではフランスのジロワ形、アメリカの MAB 形、西ドイツの MLC 形があるが、その詳細は不明で、設計にあたってはほとんど白紙の状態からの出発を余儀なくされた。そこでいろいろな基本計算と実験とから検討を進め、多くの問題点を解決して所期の性能、強度、軽量化を満足するものを完成することができた。図 1 は水上航走中の自走浮橋である。

### 2. 自走浮橋の概要

本車の陸上姿勢は図 2 に示すようなものである。陸上ではこのよ

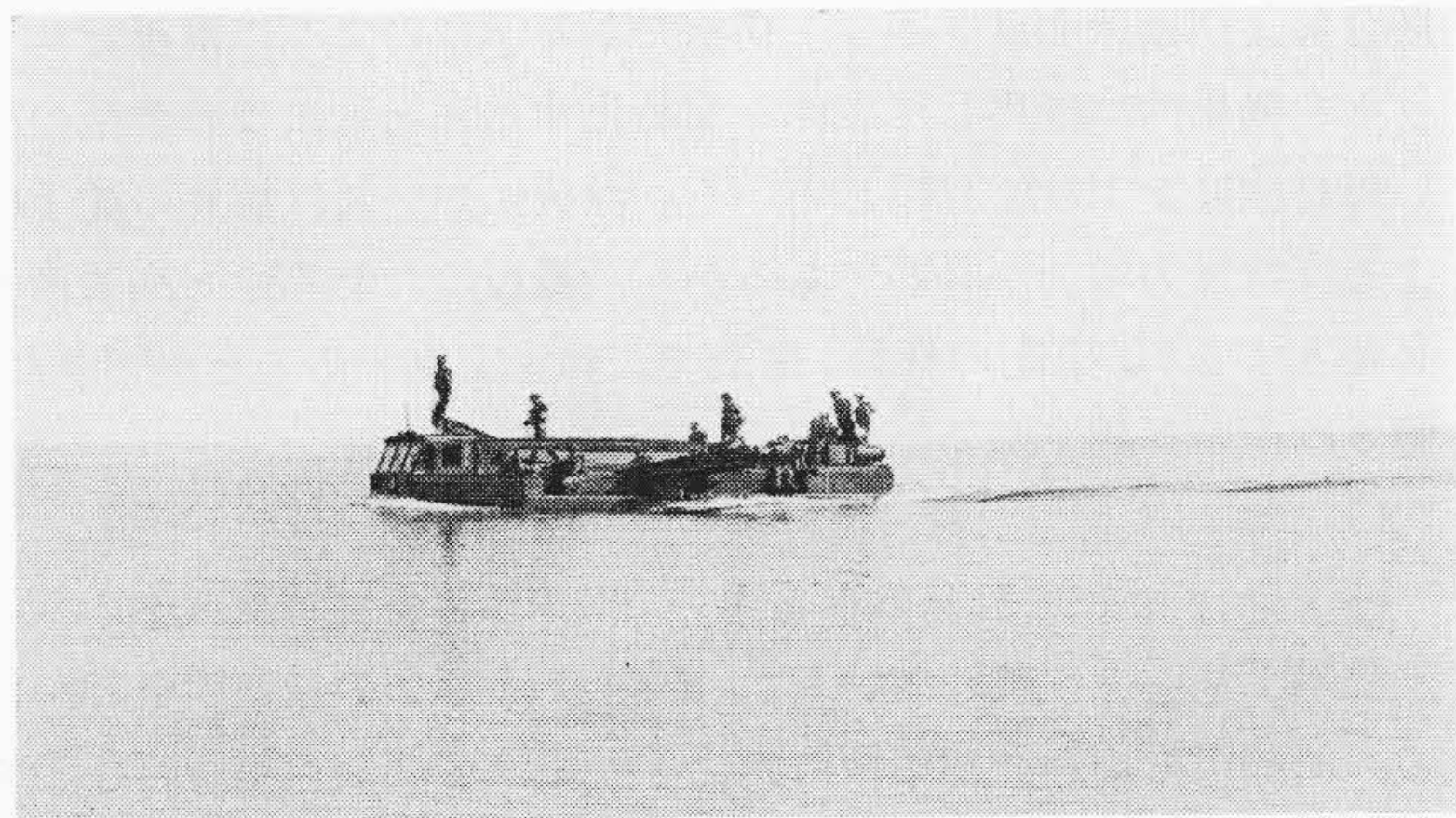


図 1 水上航走中の自走浮橋

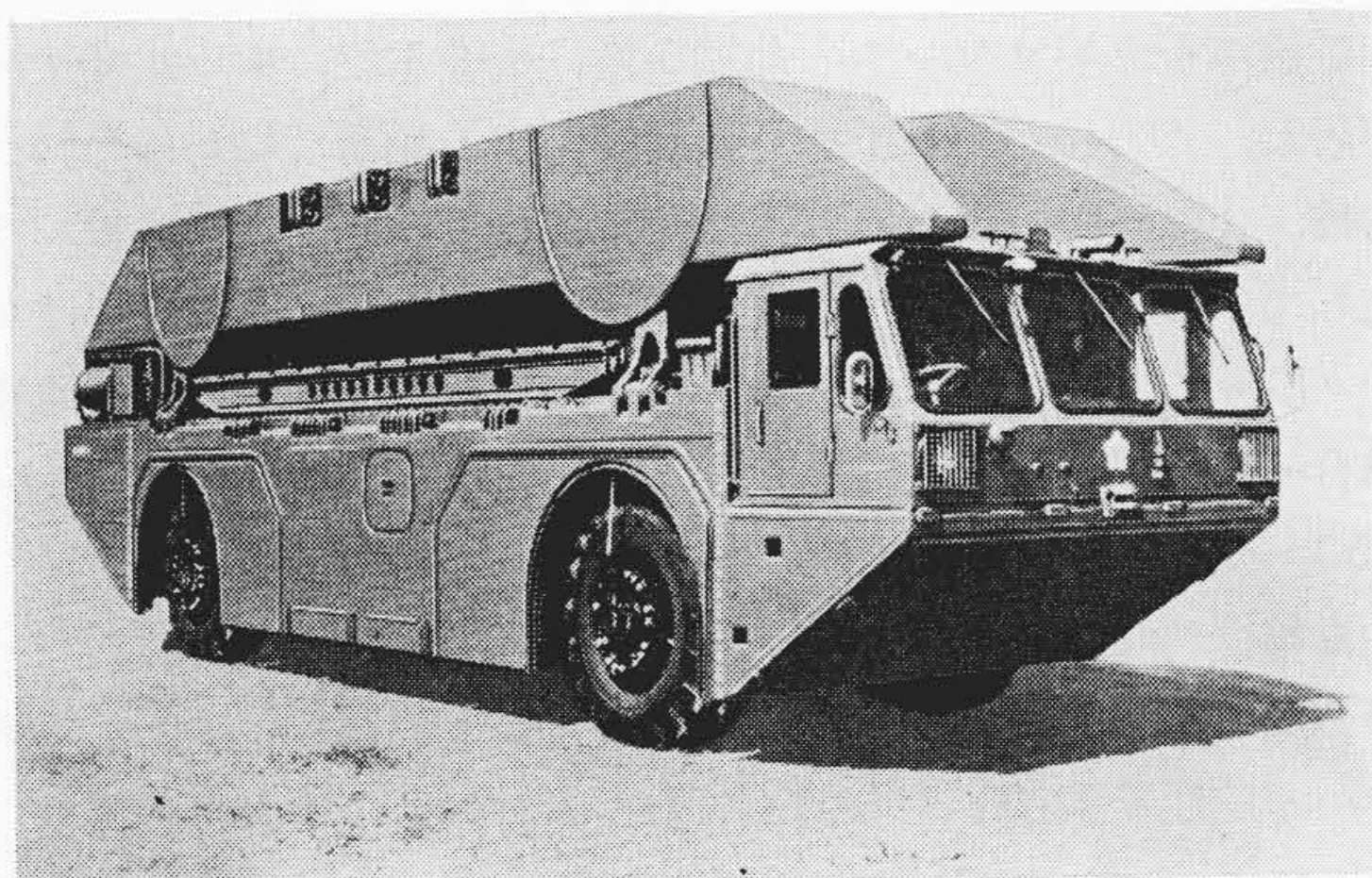


図 2 陸上姿勢の自走浮橋

うに浮力増加用の浮体を車体上方に折りたたみ、車体と浮体の間の空間に橋床部となる導板 3 枚を積載し、作業用のクレーンもこの部分に収容する。また、走行用の車輪は前後とも標準位置まで引き出され、水上航行用の推進機は後部車体内に収容される。

水上では図 3 に示すように、車体の両側に浮体を展開、固定し、推進機を標準位置まで降下し、車輪を引き込める。なお、車輪室空洞部の両側は浮体に設けた気密のふたでふさいで、この部分に空気を充てんし、浮力を増加させるようになっている。

浮橋構成時は図 3 のようなものを一単位として、これらの間を導板と称する橋けたで連続けた方式に接続し、図 4 に示すような構造にする。また、門橋とはいわゆるフェリーのことであるが、これを構成するときは図 5 のようにする。

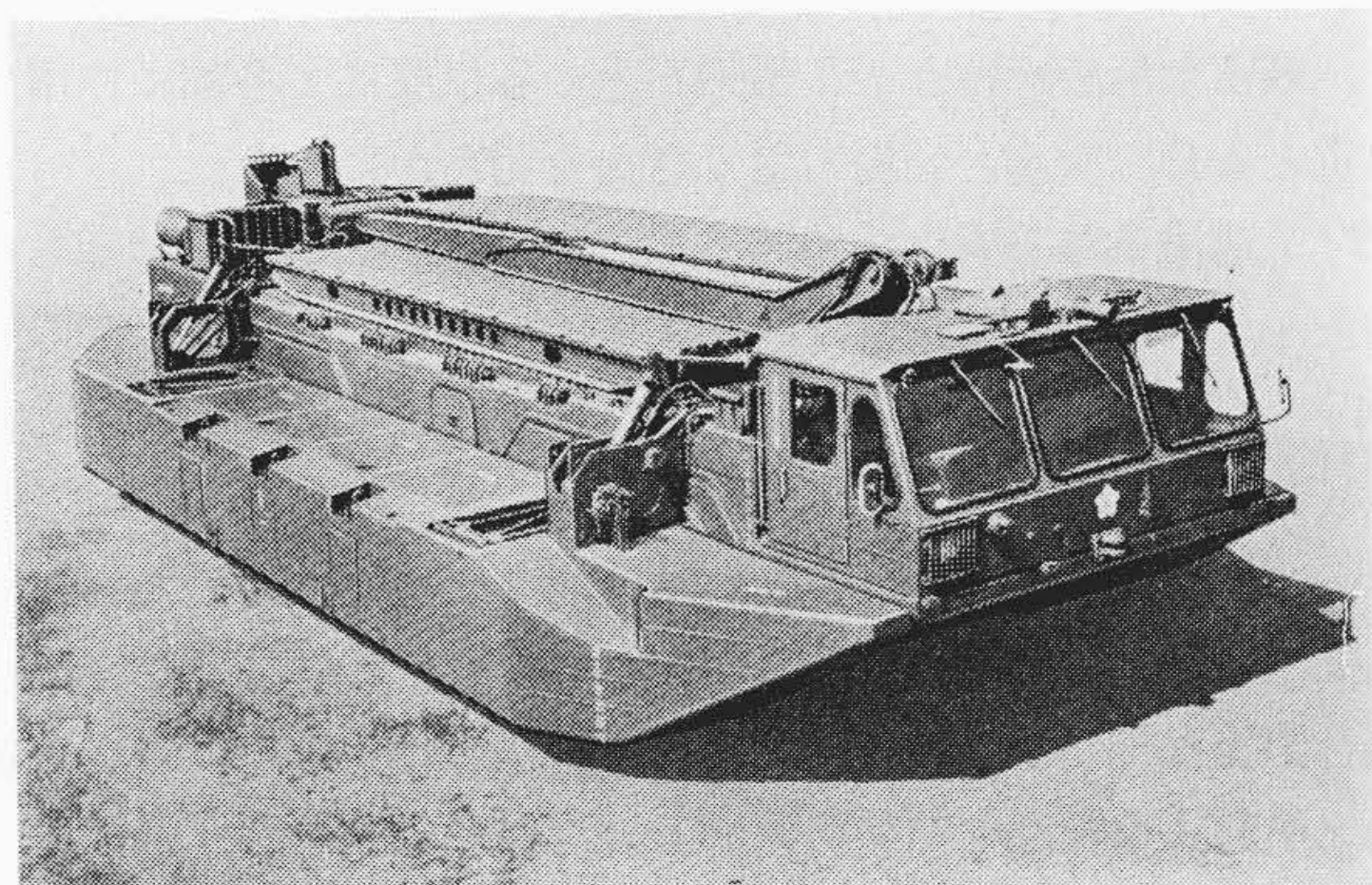


図 3 水上姿勢の自走浮橋

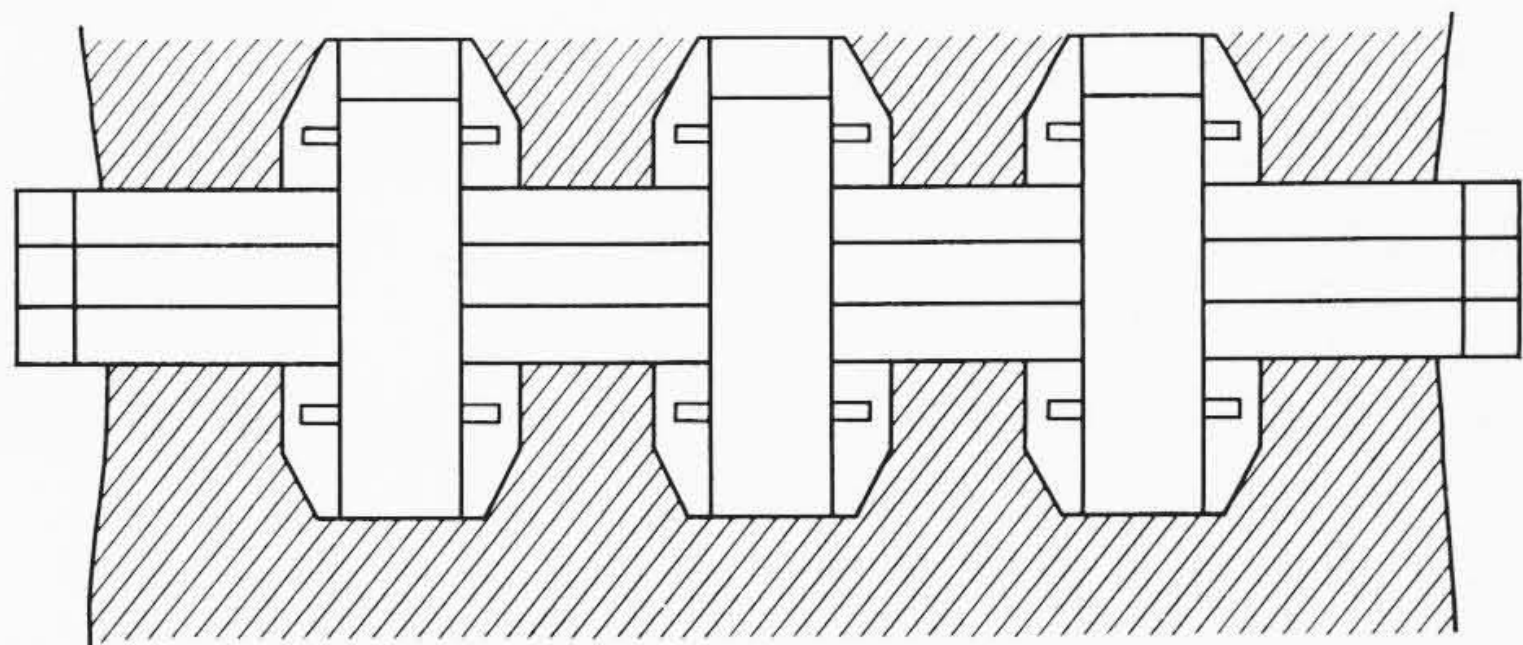


図 4 3 舟 浮 橋

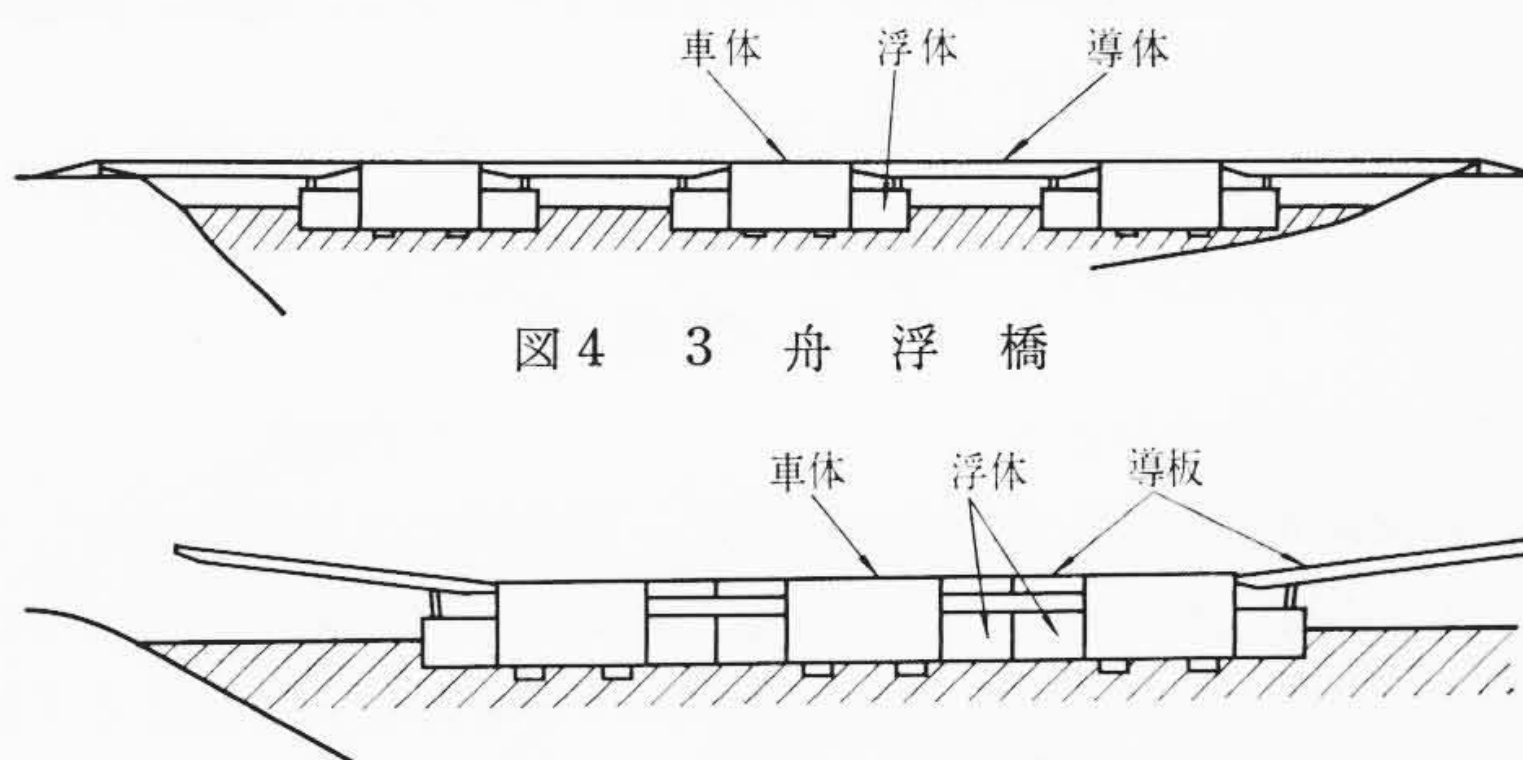


図 5 3 舟 門 橋

\* 日立製作所笠戸工場

| 表 1 主 要 諸 元 性 能 |                             |  |
|-----------------|-----------------------------|--|
| 全 長             | 11.37 m                     |  |
| 全 幅 (陸上)        | 2.80 m                      |  |
| 全 幅 (水上)        | 5.39 m                      |  |
| 全 高 (陸上)        | 3.43 m                      |  |
| 車 両 重 量         | 21.26 ton                   |  |
| 車両総重量           | 23.86 ton                   |  |
| 機 関             | UDV 8 形<br>330 PS/2,200 rpm |  |
| 最 高 速 度 (陸上)    | 56 km/h                     |  |
| (水上)            | 11 km/h                     |  |
| 登 板 能 力         | 25°                         |  |
| 橋りょう等級          | 38                          |  |
| 橋節長×幅           | 8.5×3.9 m                   |  |

表 1 は主要諸元，性能を示したもので，以下これの技術的問題点と各部構造について述べる。

3. 技術的問題点と設計，製作上の苦心点

本車の基本的要求性能の実現には多くの問題点があったが，下記のような対策によりこれを解決することができた。

- (1) 陸上，水上での行動能力および浮橋，門橋における荷重支持のための浮力の関係で，特に軽量化が必要で，構造部分には新強力材料 Al-Zn-Mg 合金を全面的に使用して，これを溶接構造とし，そのほかの機器類も広範にアルミ化を行なった。
- (2) 車両，舟艇としての強度を確保するとともに，浮橋，門橋については特に荷重が大きく，かつ多自由度力学系を構成するので，厳密な解析を行ない，通過荷重の各位置にて各部に作用する荷重と各舟の喫水，傾斜のありさまを明らかにした。
- (3) 運用条件と寿命を明確にし，疲労試験により裏付けられた適正な許容応力を使用した時間強度設計とした。
- (4) 水陸両用車であるため複雑な形の各部水密，軸封が必要であったが，試験研究によりこれを解決した。
- (5) 軟弱地，不斉地，狭隘(きょうあい)地での行動能力を満足させるための差動固定装置付全輪駆動，全輪操舵，運転室内から走行中操作可能な空気圧調節装置付低圧広幅タイヤ，車高調節可能な引込式車輪などの新機構を設計，製作した。
- (6) 浅水浮航性，荷重容量および水上行動性を満足させるための展開式浮体，車輪室充排気装置，コルトノズル付旋回・昇降式プロペラ推進機などの新機構を設計，製作した。
- (7) 浮橋，門橋の架設作業性能を満足させるための導板結合装置，導板支持装置，浮体－浮体密接結合装置，作業用クレーンなどを設計，製作した。
- (8) 独立昇降式車輪懸架装置により，浮橋構成時水際で車輪接地による荷重負担を可能にした。
- (9) 各可動部分を油圧化し能率向上をはかった。
- (10) 陸上姿勢における車体寸法を極力小さくし，道路，鉄道による機動性向上をはかった。

4. 各部の構造

(1) 車体および浮体

Al-Zn-Mg 合金を全面的に使用し，構造的には縦強度に対しては多くの縦通材をもった半張殻構造であるが，横強度に対しては橋けたに発生する大きな曲げモーメントとせん断力に耐える「かまち」構造になっている。これらの骨組は全溶接構造であるが，

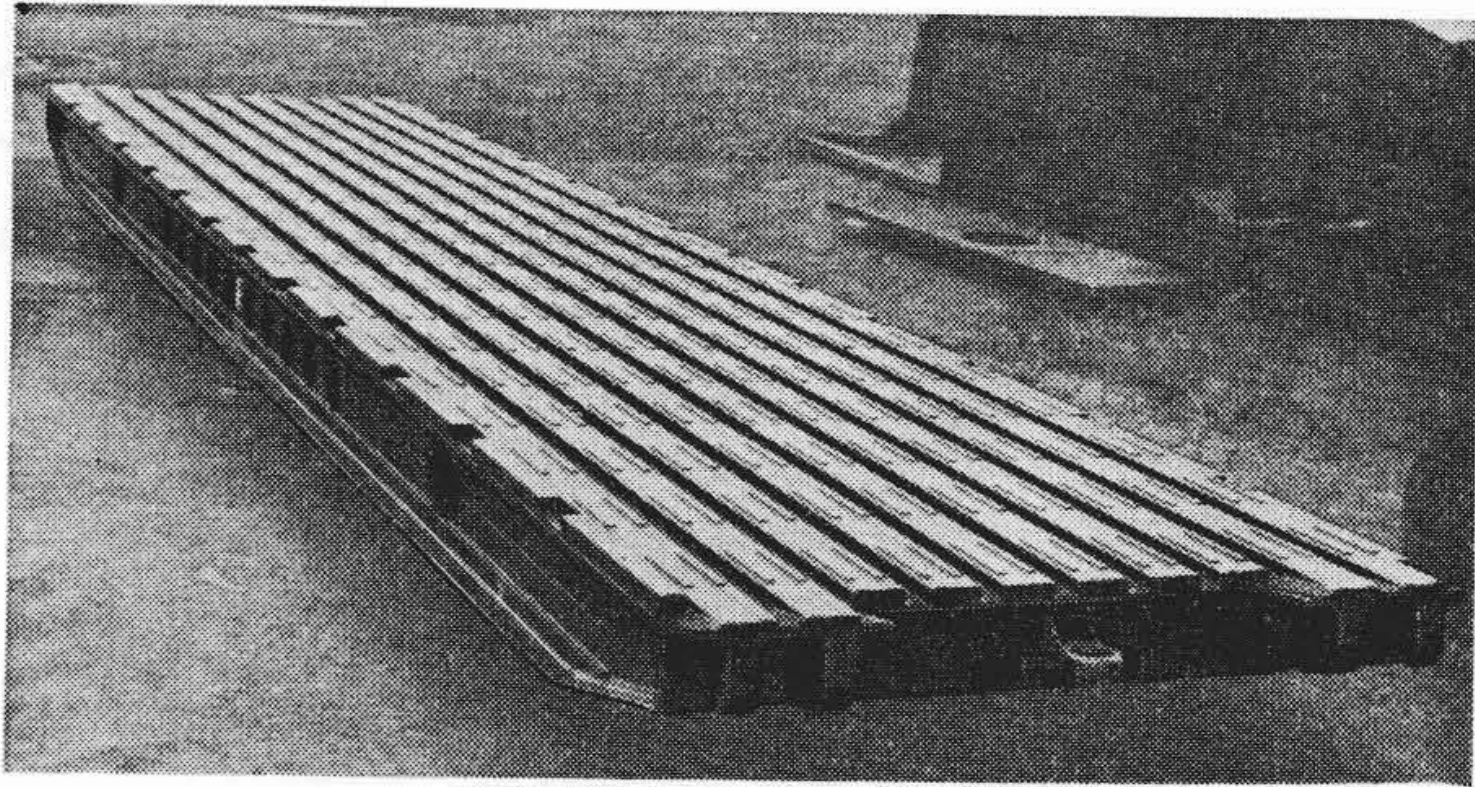


図 6 導 板

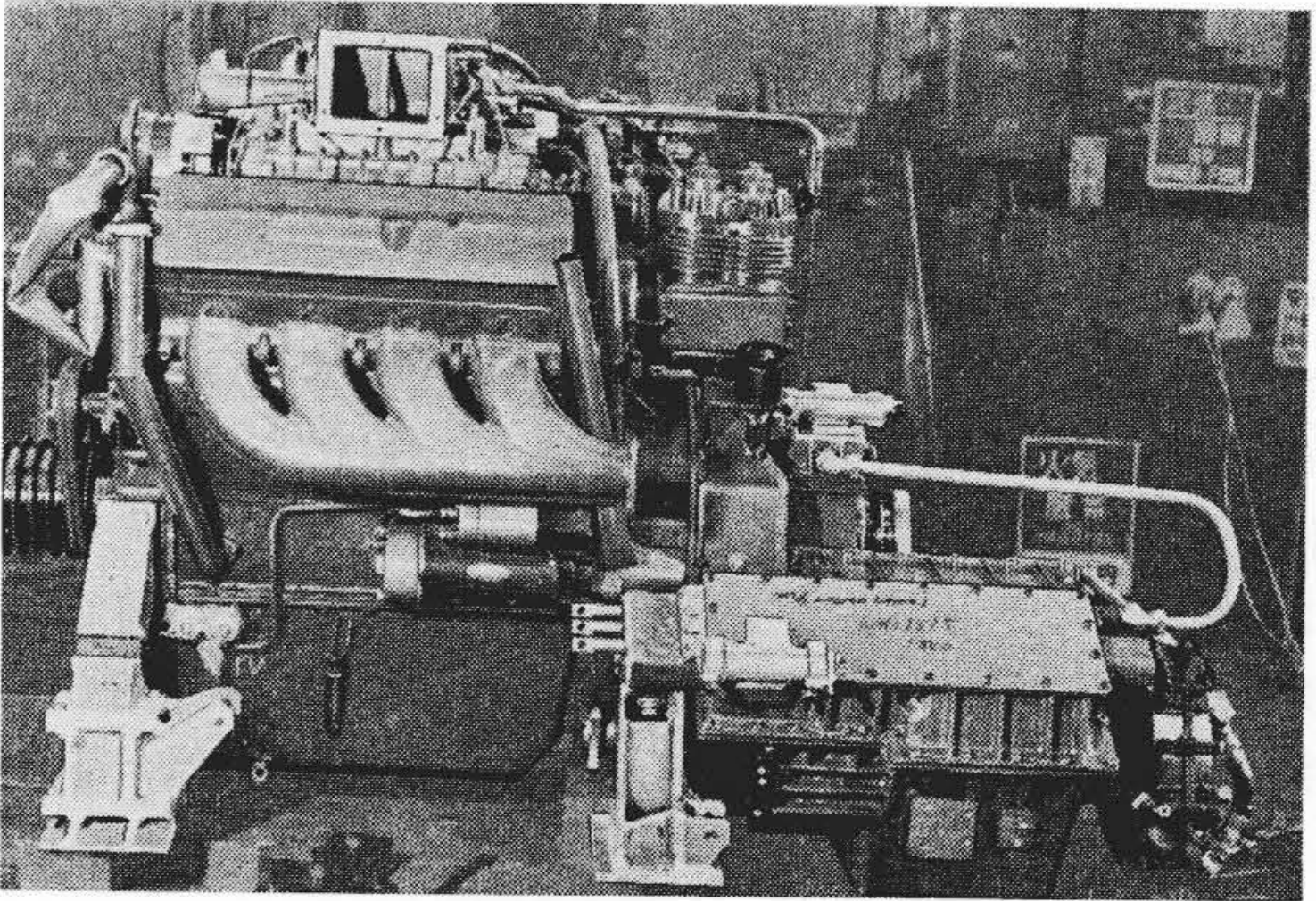


図 7 機関，クラッチ，変速機

外板および橋床面はリベット構造になっており，それぞれ水圧，輪荷重などの面外荷重に対しても必要な強度をもたせてある。また，車体，浮体の内部は浸水時の被害を局限するため水密区画が設けられている。

(2) 導 板

Al-Zn-Mg 合金の大形押出形材を使用している。縦けたは応力の低い中立軸付近で溶接接合した箱形断面で，縦けたと横けたの接合および橋床面はリベット構造である。このように溶接とリベットを効果的に併用して工作を簡易化するとともにこの合金の高い母材強度を 100% 利用している。浮橋においては橋節の沈下による支持反力増加が必要であるから，導板はたわみ性と高強度を必要とするが，上記の材料，構造でこれを実現することができた。図 6 はその外観である。

(3) 機 関

陸上走行および水上推進兼用の 330 PS 2 サイクル・ディーゼル機関 1 基をとう載している。機関室は車体のほぼ中央にあって，前部甲板から後部甲板にダクトを設けて強制通気を行なっている。

(4) 動力伝達装置

乾燥単板摩擦クラッチと前進 5 段，後進 1 段の歯車式変速機を使用し，入力軸から水上推進装置へ，出力軸前後端からそれぞれ前輪，後輪への動力を取り出し，十字軸自在継手式推進軸にて伝達している。なお，水上推進装置と前輪への動力取出口にはかみ合クラッチが設けられている。図 7 は機関，クラッチ，変速機を組合せた外観である。

(5) 走行，懸架装置

車輪はデフロク付 4×4 駆動で，タイヤは低圧ワイドベースの 20.5-25-16 PR を使用し，さらに運転室から必要に応じてタイヤの空気圧を調節できるようにし，けん引力の増大，スリップ防止をはかってある。また，懸架装置は油圧により全輪独立昇降可能なスイングアーム方式で，懸架ばねは設けられていない。図 8 はこれらの外観である。

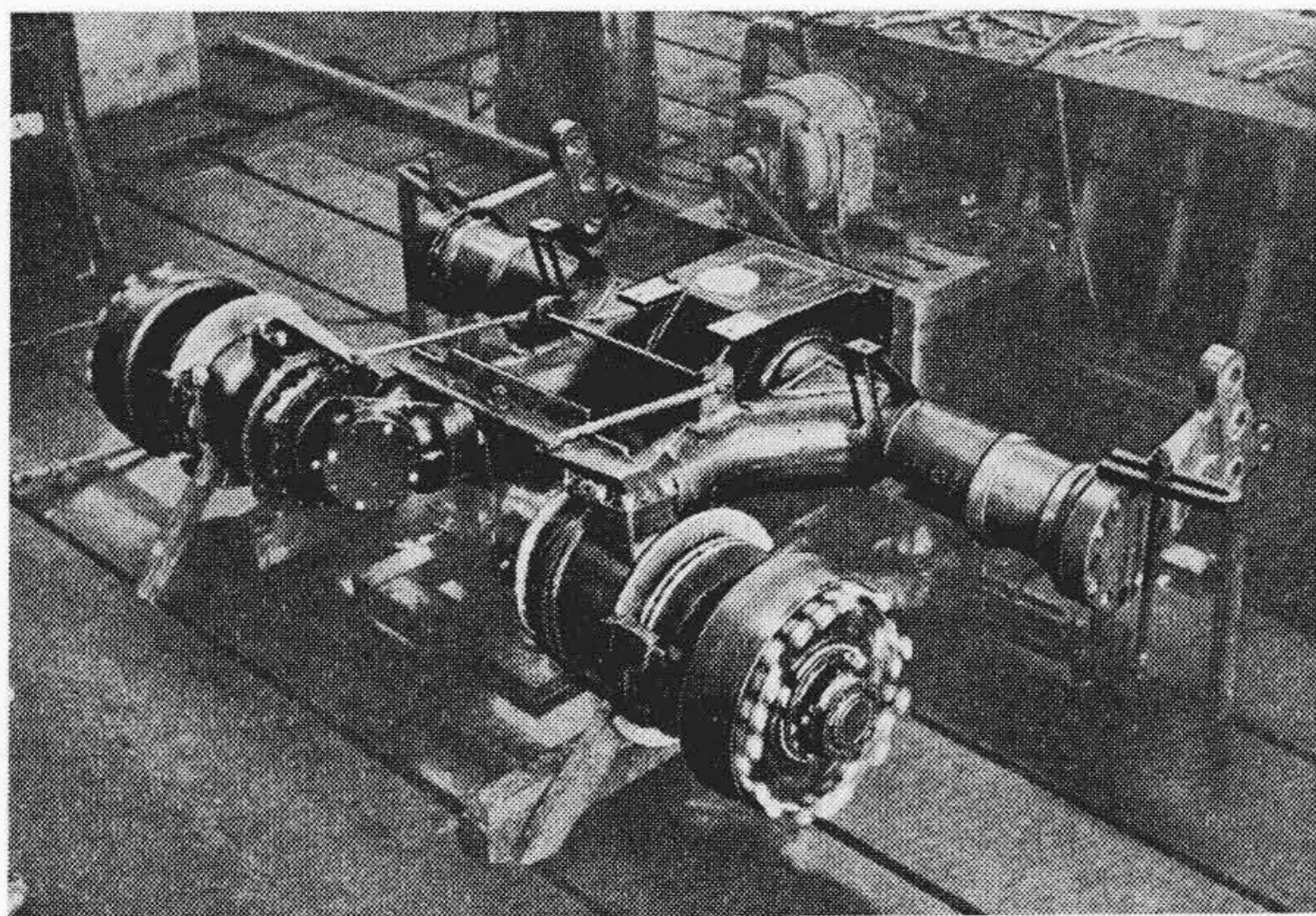


図8 走行懸架装置

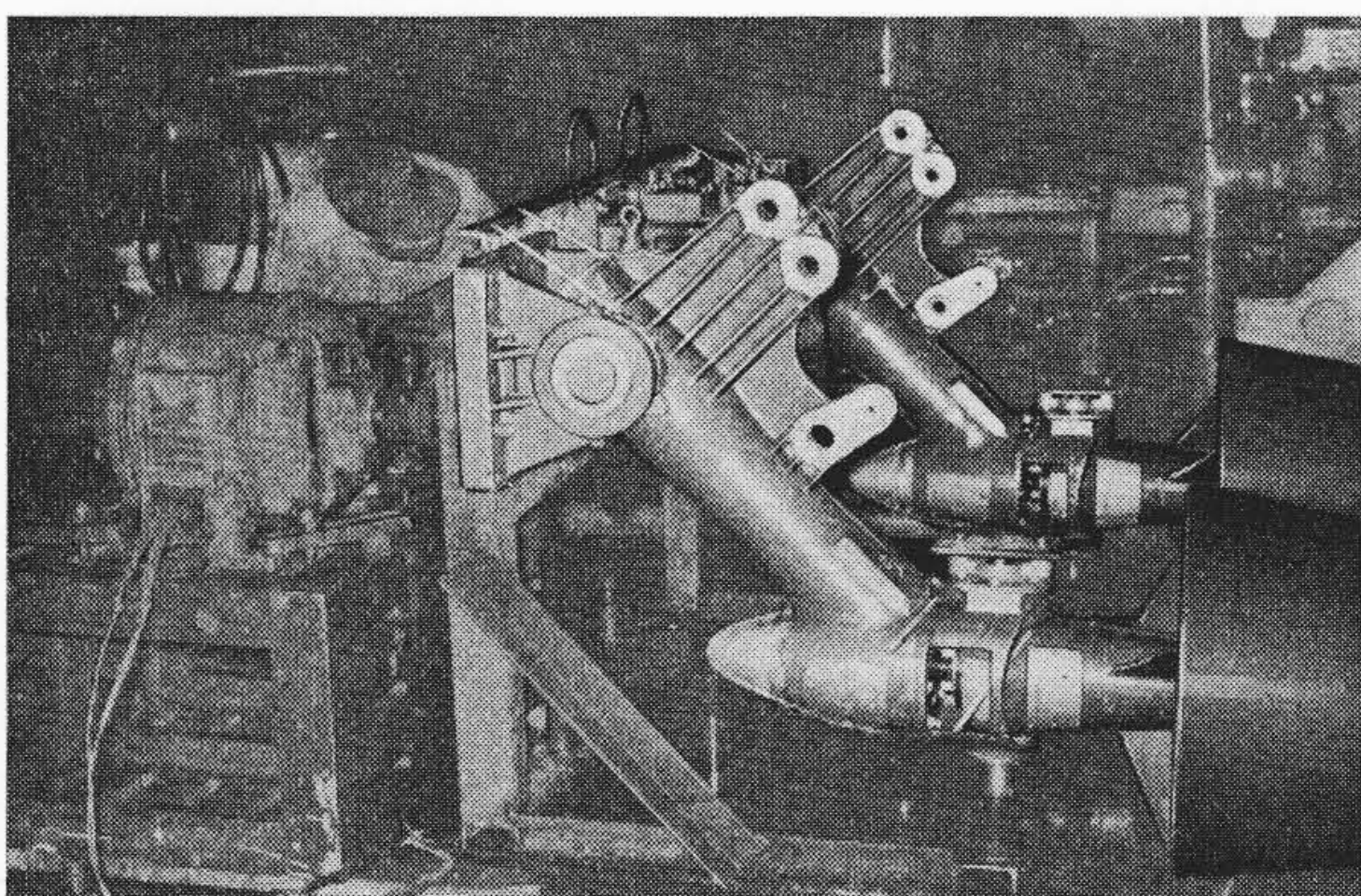


図9 水上推進装置

#### (6) 制 動 装 置

上陸後の制動力回復、泥水に対する適応性の点からディスク方式とし、かつディスクを露出式とした。作動は空気倍力油圧方式である。

#### (7) 操 向 装 置

2輪操向では要求される最小回転半径を満足できないため、4輪操向とし、かつパワーステアリング方式とした。

#### (8) 水上推進装置

小直径で比較的大きい推力を発生する2軸コイルノズル付4枚羽根プロペラを設け、スイングアームにより水深に応じて上下または車体内に格納できるようになっている。スイングアーム軸には湿式多板クラッチ式の後進用逆転機が組み込まれており、これからプロペラを駆動する。図9はその外観である。

#### (9) 水上操舵装置

駆動軸に等速ボールジョイントを使用し、プロペラ軸を回転させる方式とした。操作は閉回路油圧方式により行なわれる。

#### (10) 油 圧 装 置

油圧源は常用圧力  $140 \text{ kg/cm}^2$  の歯車ポンプで、車輪昇降・固定、浮体開閉・固定、プロペラ昇降、クレーン俯仰(ふぎよう)・屈曲・旋回、導板支持などを油圧により行なうようになっている。油圧ポンプ、シリンダ、バルブ、リザーバ、低圧管などはアルミ合金製で軽量化がはかられている。

#### (11) 補 機、ぎ 装

排水ポンプ、換気ファン、空気圧縮機、自動消火装置、各種くい留具などを備えている。

### 5. 浮 橋 の 解 析

大きな通過荷重に耐えるため浮橋の各舟は大きな浮力を必要とする。しかしながら一方機動性の点から車体の寸法は極力小さくする

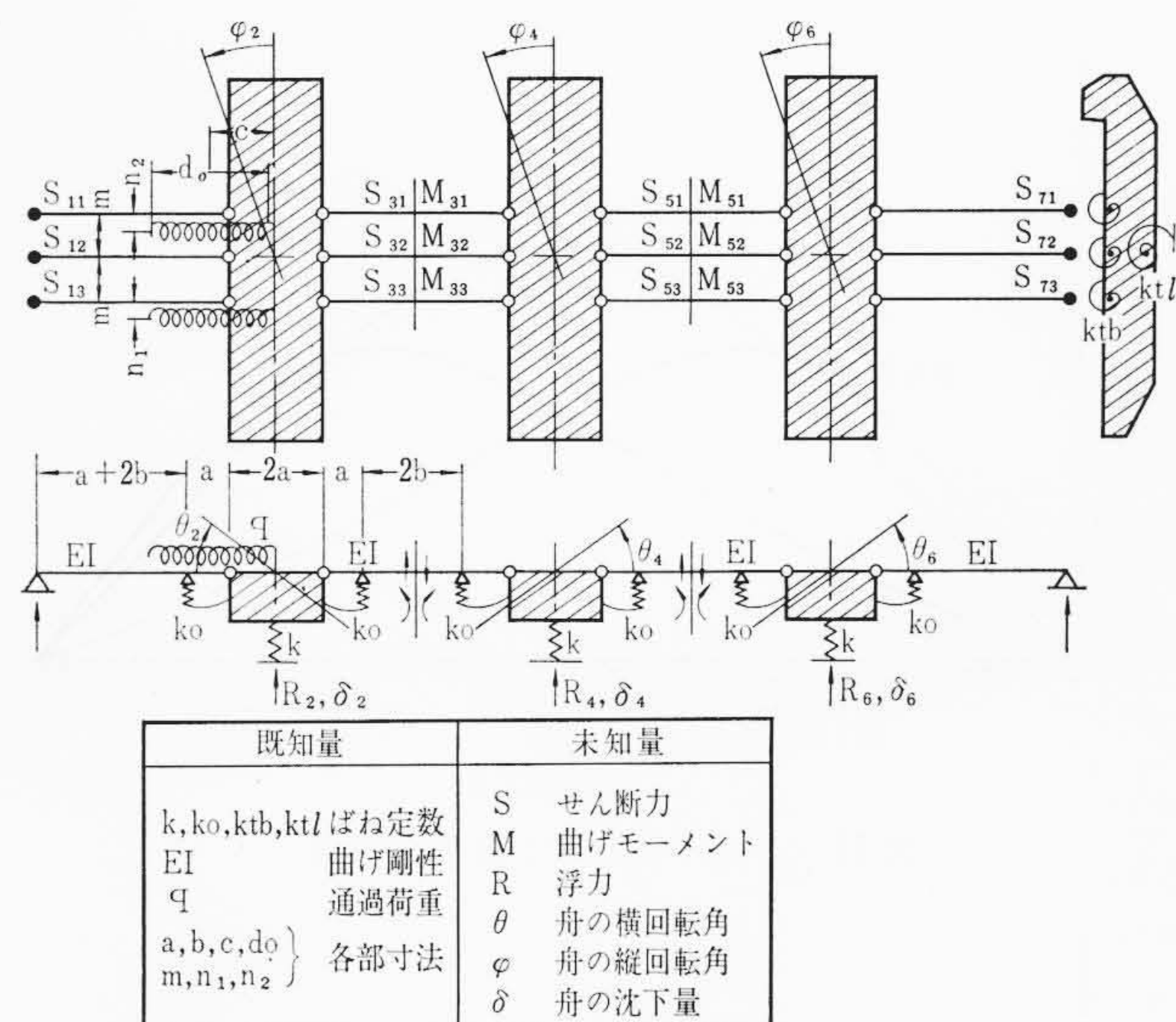


図10 3舟浮橋の構造模式と諸記号

ことが必要で、浮力を十分大きくとることができない。このように相反する要求を満足させるため、橋床の曲げ剛性をできるだけ小さくして、浮橋自身の軽量化をはかるとともに、橋節の沈下量増大による支持反力増加を利用することにした。しかし、橋節の沈下量には実用上の限度があるので、これを越えないように設計するのが苦心した点である。一例として3舟浮橋の場合について各舟の荷重、変位を解析するための構造模式および諸記号を図10に示し、通過荷重が図のような位置にある場合のこれらの関係式を示すと次のとおりである。

$$(S_{11} + S_{12} + S_{13}) + (S_{31} + S_{32} + S_{33}) + k\delta_2 - qd_0 = 0 \dots (1)$$

$$(S_{51} + S_{52} + S_{53}) - (S_{31} + S_{32} + S_{33}) + k\delta_4 = 0 \dots (2)$$

$$(S_{71} + S_{72} + S_{73}) - (S_{51} + S_{52} + S_{53}) + k\delta_6 = 0 \dots (3)$$

$$(S_{11} + S_{12} + S_{13})(3a + b) - (S_{31} + S_{32} + S_{33})(a + b) - 3M_{31} - qd_0c = 0 \dots (4)$$

$$3M_{31} - 3M_{51} - (S_{31} + S_{32} + S_{33} + S_{51} + S_{52} + S_{53})(2a + b) = 0 \dots (5)$$

$$3M_{51} - (S_{51} + S_{52} + S_{53})(2a + b) - (S_{71} + S_{72} + S_{73})(2a + 2b) = 0 \dots (6)$$

$$(S_{13} - S_{11} + S_{33} - S_{31})m + (k_{tl} + 6k_{tb})\varphi_2 - 3k_{tb}\varphi_4 - qd_0(n_1 + n_2)/2 = 0 \dots (7)$$

$$(-S_{33} + S_{31} + S_{53} - S_{51})m + k_{tl}\varphi_4 + 3k_{tb}\varphi_2 - 3k_{tb}\varphi_6 = 0 \dots (8)$$

$$(-S_{53} + S_{51} + S_{73} - S_{71})m + k_{tl}\varphi_6 + 3k_{tb}\varphi_4 = 0 \dots (9)$$

$$\delta_2 - (3a + 2b)\theta_2 - m\varphi_2 - AS_{11} + Bq = 0 \dots (10)$$

$$\delta_2 - (3a + 2b)\theta_2 - AS_{12} = 0 \dots (11)$$

$$\delta_2 - (3a + 2b)\theta_2 - m\varphi_2 - AS_{13} + Bq = 0 \dots (12)$$

$$\delta_6 - (3a + 2b)\theta_6 - m\varphi_6 - AS_{71} = 0 \dots (13)$$

$$\delta_6 - (3a + 2b)\theta_6 - AS_{72} = 0 \dots (14)$$

$$\delta_6 - (3a + 2b)\theta_6 + m\varphi_6 - AS_{73} = 0 \dots (15)$$

$$\delta_2 - \delta_4 + (2a + b)(\theta_2 - \theta_4) - m(\varphi_2 - \varphi_4) - 2A'S_{31} = 0 \dots (16)$$

$$\delta_2 - \delta_4 + (2a + b)(\theta_2 - \theta_4) - 2A'S_{32} = 0 \dots (17)$$

$$\delta_2 - \delta_4 + (2a + b)(\theta_2 - \theta_4) + m(\varphi_2 - \varphi_4) - 2A'S_{33} = 0 \dots (18)$$

$$\delta_4 - \delta_6 - (2a + b)(\theta_4 - \theta_6) - m(\varphi_4 - \varphi_6) - 2A'S_{51} = 0 \dots (19)$$

$$\delta_4 - \delta_6 - (2a + b)(\theta_4 - \theta_6) - 2A'S_{52} = 0 \dots (20)$$

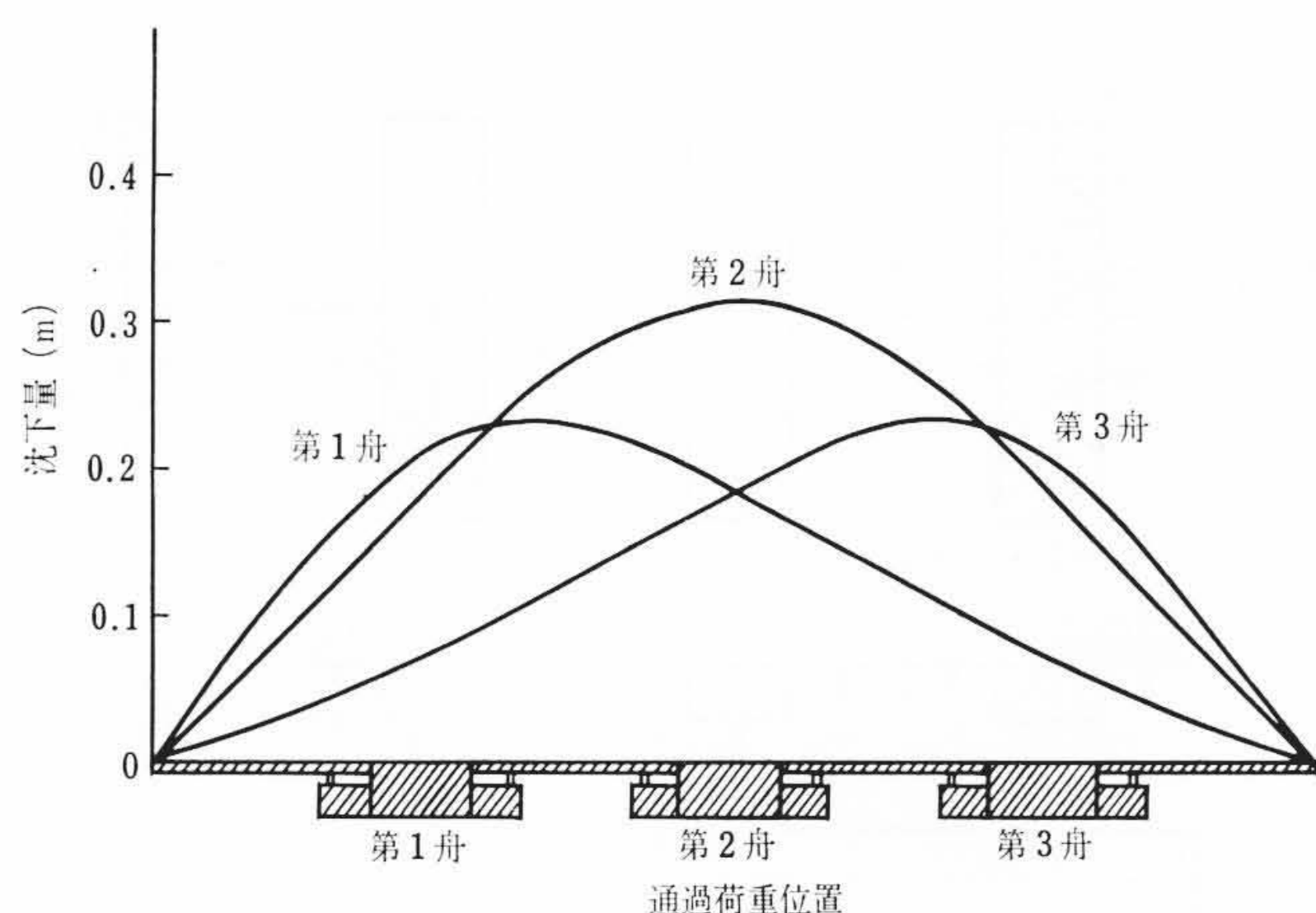


図11 3舟浮橋の沈下量影響線図

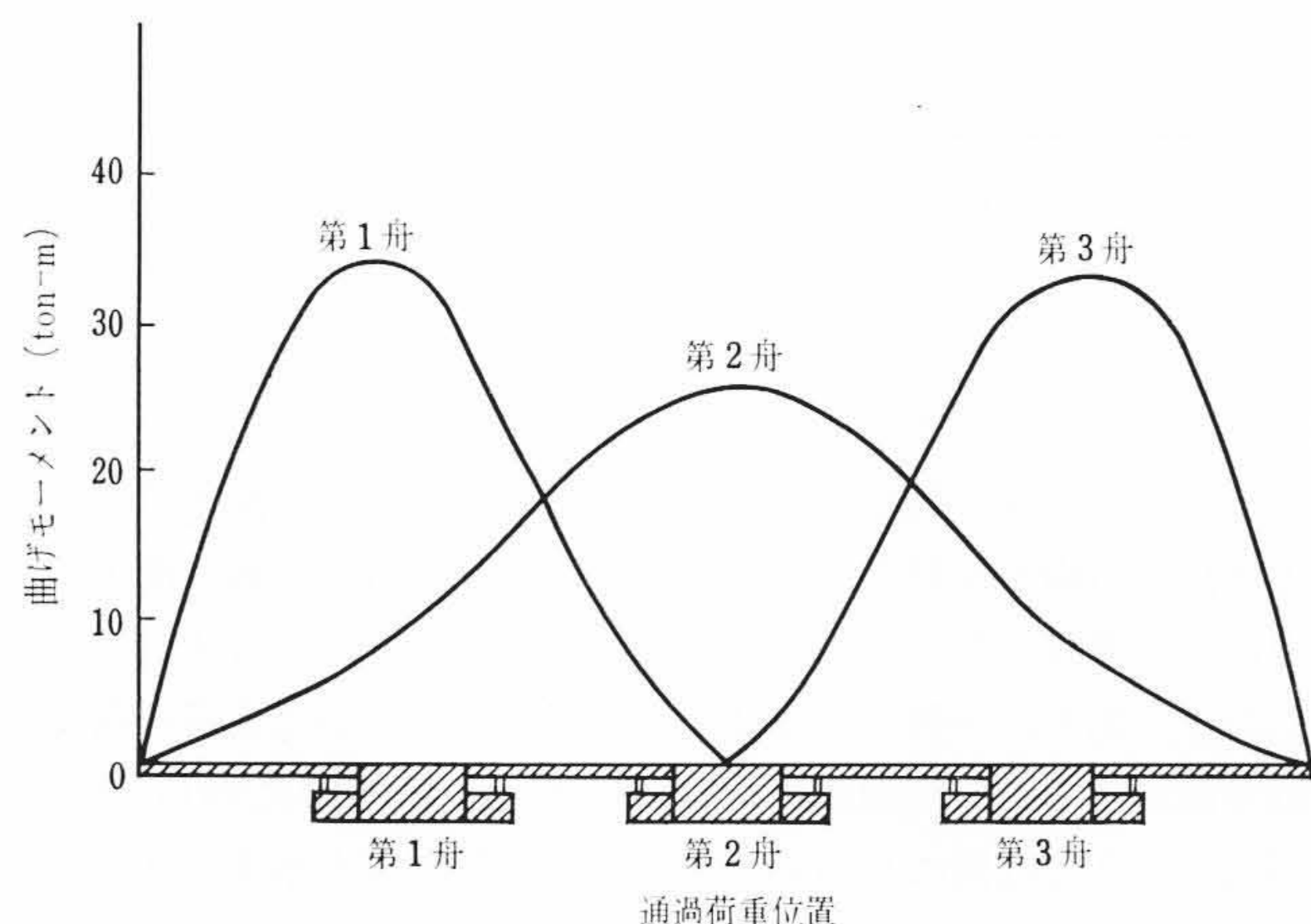


図12 3舟浮橋の曲げモーメント影響線図

$$\delta_4 - \delta_6 - (2a+b)(\theta_4 - \theta_6) + m(\varphi_4 - \varphi_6) - 2A'S_{53} = 0 \dots (21)$$

$$\theta_2 + \theta_4 - 2DM_{31} = 0 \dots (22)$$

$$\theta_4 - \theta_6 + 2DM_{51} = 0 \dots (23)$$

$$M_{31} = M_{32} = M_{33} \dots (24) \quad (25)$$

$$M_{51} = M_{52} = M_{53} \dots (26) \quad (27)$$

(注) 係数項

$$A = 2(a+2b)^2(a+b)/3EI + 4(a+b)^2/a^2/k_0$$

$$A' = (a+b)b^2/3EI + (a+b)^2/a^2/k_0$$

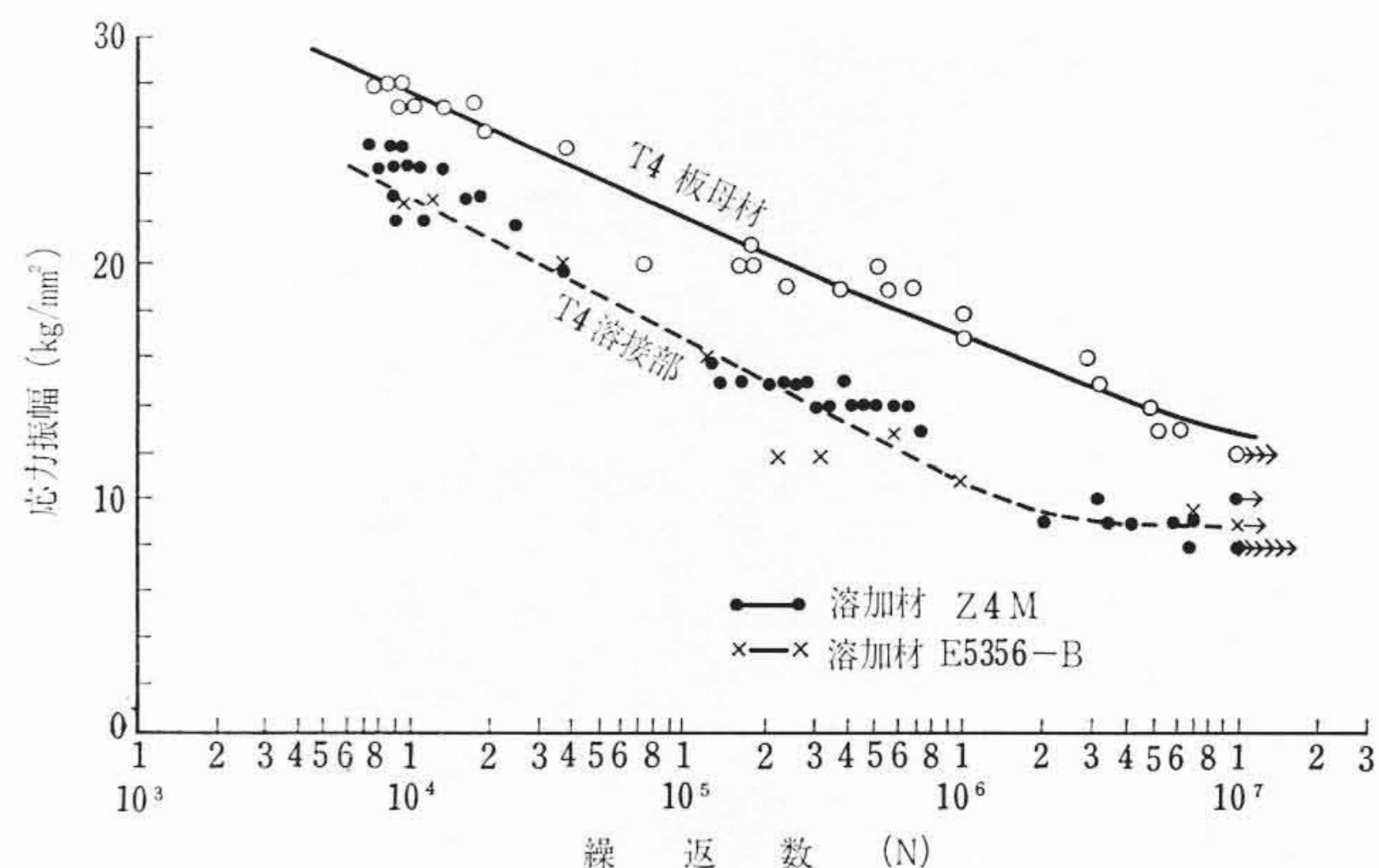
$$B = \{(c-d_0+2a)a^3 + (3d_0-6a-4c)(d_0-2a)^3\}/48EI \\ + (a+b)(d_0-a)^2/a^2/k_0/2$$

$$D = (a/3+b)/EI + 1/a^2/k_0$$

なお、浮橋、門橋はこのほかに各種の組合せがあり、通過荷重の位置も移動、偏倚するので計算量はぼう大なものになるが、コンピュータによりこれを処理した。図11、図12は3舟浮橋で荷重が偏倚しないで通過する場合の各舟の沈下量と曲げモーメントの影響線図を示したものである。これにより、喫水は中央舟が最大となり、浮体が水没する限度を越えない範囲で十分大きく沈下している。また、曲げモーメントは橋端舟が最大であることがわかる。

## 6. 主構造材料の許容応力と時間強度設計

許容応力については主構造材料であるAl-Zn-Mg合金T4、T6材について $N=10^4$ から $10^7$ までの広い範囲で平滑材および切欠材の疲労試験を行ない、バラツキを考慮した下限値のS-N曲線と $\alpha$ - $\beta$ -N線図(切欠感度)を求め、さらに実際に浮橋に作用する荷重スペクトラムを予測し、これの繰返しに対する寿命をあらかじめ定めて、特定の標定荷重に対する時間強度許容応力を決定した。実働応力値はこれに対し適当な安全率をもたせてある。図13は回転曲げ平滑材による疲労試験結果、図14は切欠材による $\alpha$ - $\beta$ -N線図を示した



(母材は入荷後5~6ヶ月、溶接材は溶接後2.5~4ヶ月にて試験)

図13 Al-Zn-Mg合金-T4平滑材の回転曲げS-N曲線

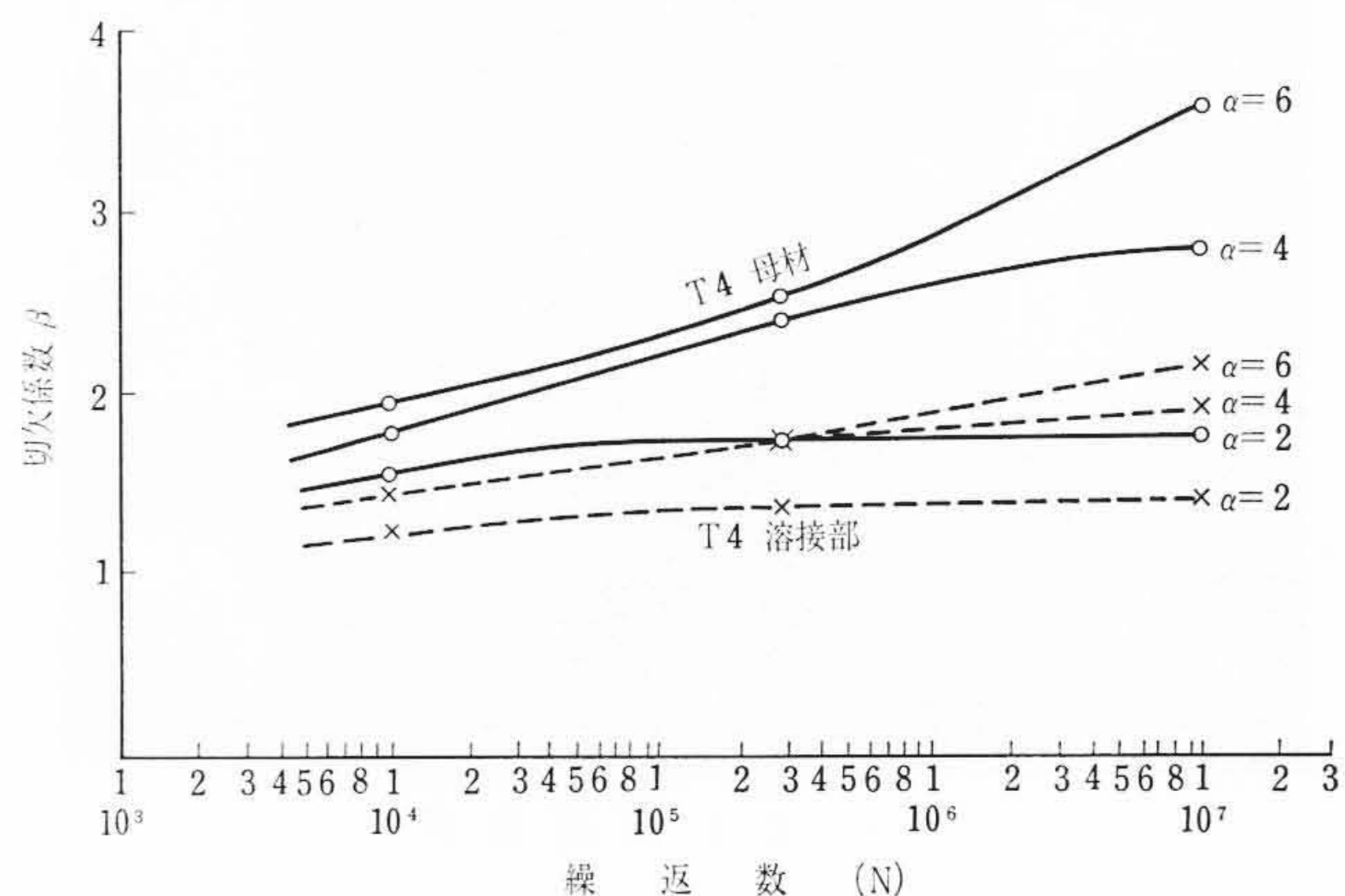
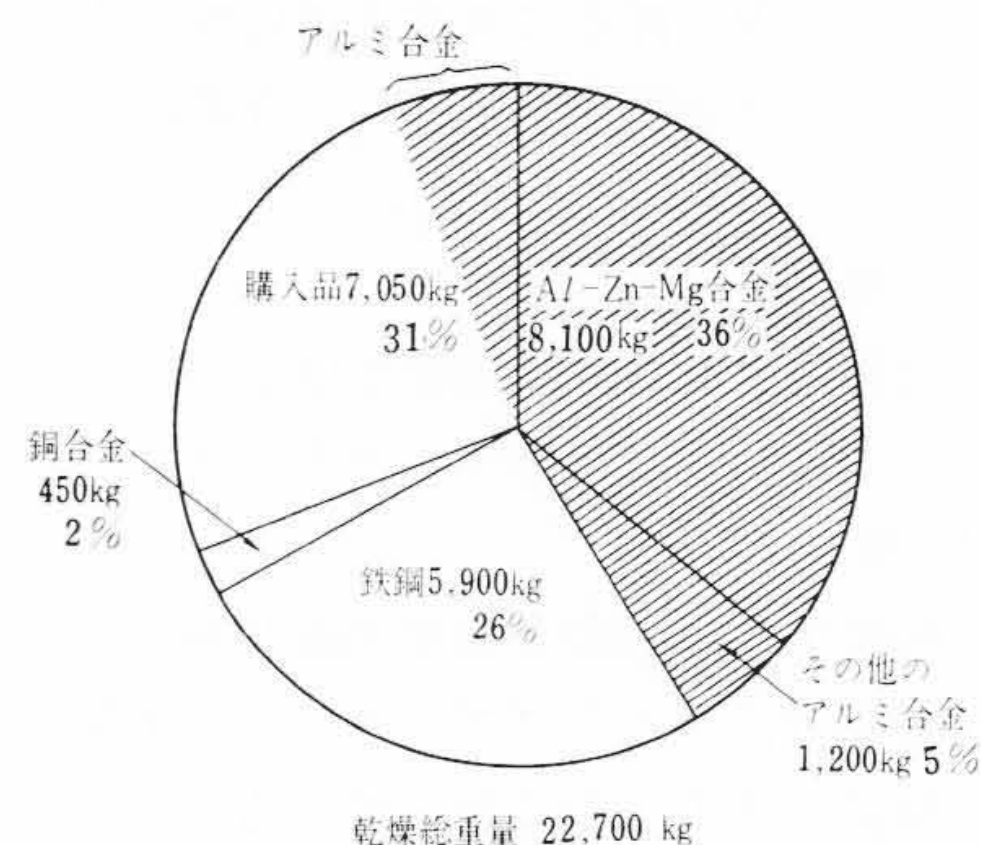
図14 Al-Zn-Mg合金-T4切欠材の回転曲げ $\alpha$ - $\beta$ -N曲線

図15 自走浮橋に使用した材料の比率

ものである。

なお、本製品に対する荷重スペクトラムは比較的低サイクル部分に大きい荷重が集中しており、この点で従来主として溶接構造用として用いられている5083(Al-Mg系合金)と比較して特に低サイクル疲労強度の大きいAl-Zn-Mg系合金の使用効果が大きであったわけで、前記の時間強度設計とあいまって大幅な軽量化を実現することができた。図15は本車に使用した材料の比率であるが、購入品を含めて全体の約50%がアルミ合金で、そのうちの約90%はAl-Zn-Mg合金である。

## 7. 試験

以上、主として本車の構造と浮橋の強度について述べたが、これの完成までの過程で多くの試験を行なったので、以下そのおもなものについて概要を述べる。

### (1) 強度関係の試験

車体、導板、スイングアーム、クレーン・ブームは強度的最重

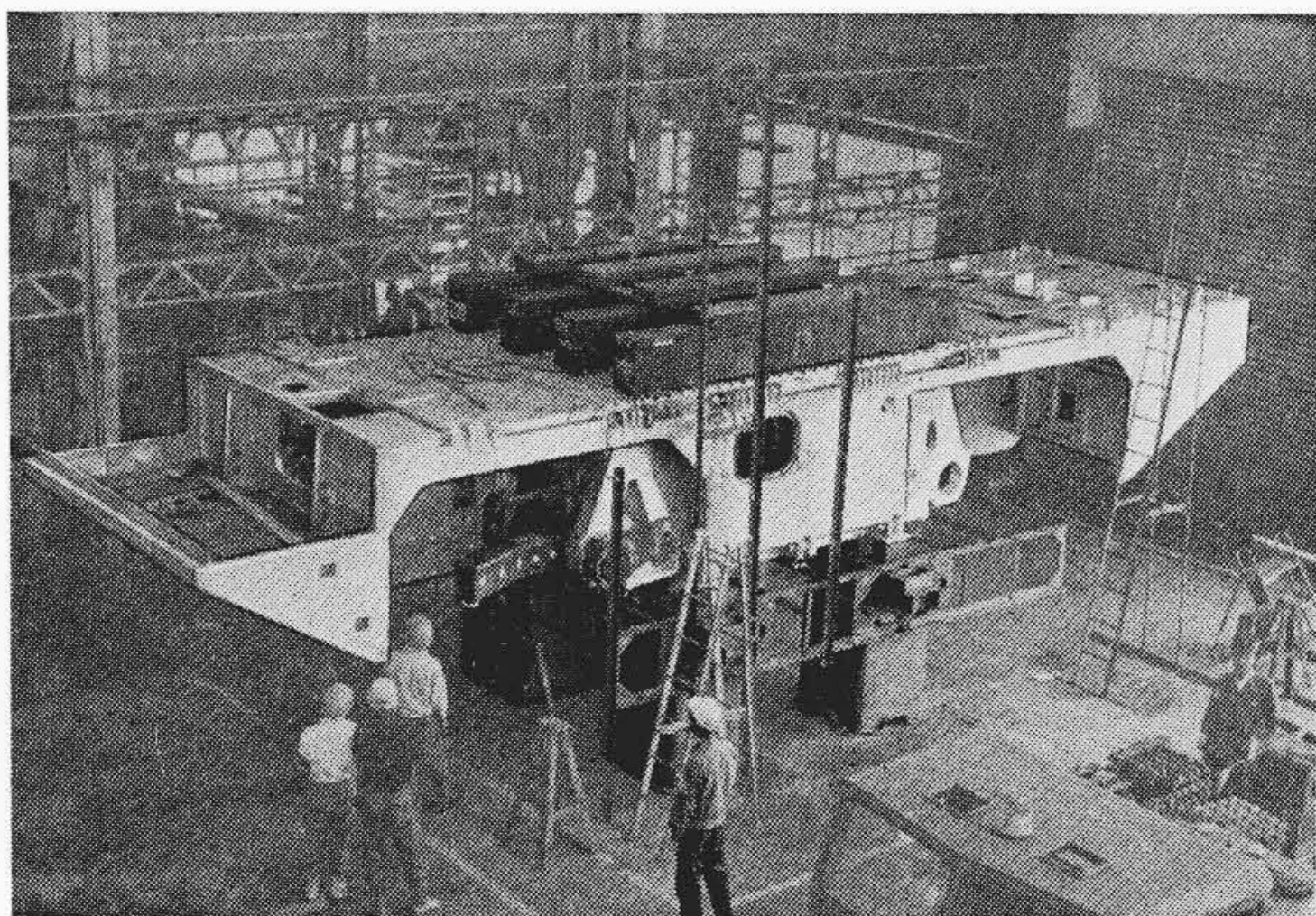


図 16 車体強度試験の状況

要部分であり、かつ全体重量に占める割合も大きく軽量化の必要性も大きいので、製作工程の中間段階で強度試験を行ない、補強あるいは軽量化の資料を得ることにした。図 16 は車体の強度試験の一例であるが、これを含めて測定点の総数は抵抗線ひずみ計 315 点、ダイヤルゲージ 83 点で、測定したデータはひずみ 1872 点、たわみ 155 点の多きにのぼった。結果は局部的に補強の必要な箇所も若干あったが、主部材については計算値とかなりよく一致していることを示した。

図 17 は車体中央かまちで、応力計算においては縦通材による影響は小であると判断して 2 次元のラーメンとして行なったものであるが、実測結果とかなりよく一致している。荷重は浮橋の解析により求めたもので、最悪の負荷条件において 1.2 g の衝撃荷重を作用した場合のものを示している。なお、この「かまち」については模型で光弾性皮膜法により主応力の分布を求めて、荷重集中部に対する補強法などについても検討した。

また実車、完成後地上にて単舟浮橋を構成し、車体の沈下量を測定したが、計算値とほぼ一致を示し、浮橋の解析に使用した弾性諸定数のいくつかは当初の仮定が妥当であったことが立証された。

## (2) 駆動関係の試験

本車の駆動系は長大多岐で慣性、弾性要素も多く、ねじり振動が懸念されたので、各変速段、各接続について固有振動数と規準弾性曲線を計算により求め、さらに減衰力を入れた強制振動計算を行なうとともに、実車完成後共振点および振動加速度の実測を行なった。図 18 は第 3 速後輪駆動の場合の一例を示したものであるが、実測値では計算値よりも低いほうに共振点がずれている。振幅はかなり小さく、十分減衰しているので問題はないことがわかった。

## (3) 操舵関係の試験

本車の操舵系は 4 輪操舵のため制御系が長大多岐で、自励振動の問題があり、かつホイールアライメントとの関係でシミ、操向安定性も懸念された。制御系の自励振動については安定判別を行なってブースタのスプール変位に対する油圧ゲーンを十分低くとり、入出力系の剛性、ダンピングを適度に決定して問題なきを得た。また、シミ、操向安定性についても試験の結果特に問題はなかった。

## (4) 制動装置の試験

試験台上にて浸水後の制動力回復試験、泥水に対する回復試験を行なったが、出水後 1~2 回の制動後はほとんど 100% 近く制動力が回復することを確認した。

## (5) 走行試験

JIS に規定されている試験はほとんどすべて実施したが、そのほか車体の上下、前後の振動加速度の測定を行なった。本車の懸架ばね系はタイヤのみであるが、低圧広幅タイヤであるからばね

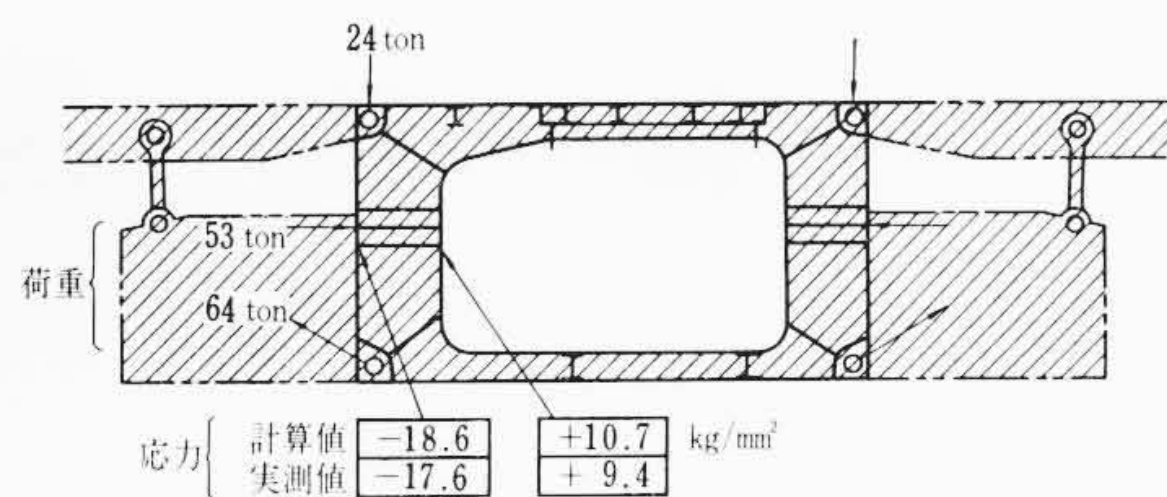


図 17 車体中央かまちに付加する荷重と応力

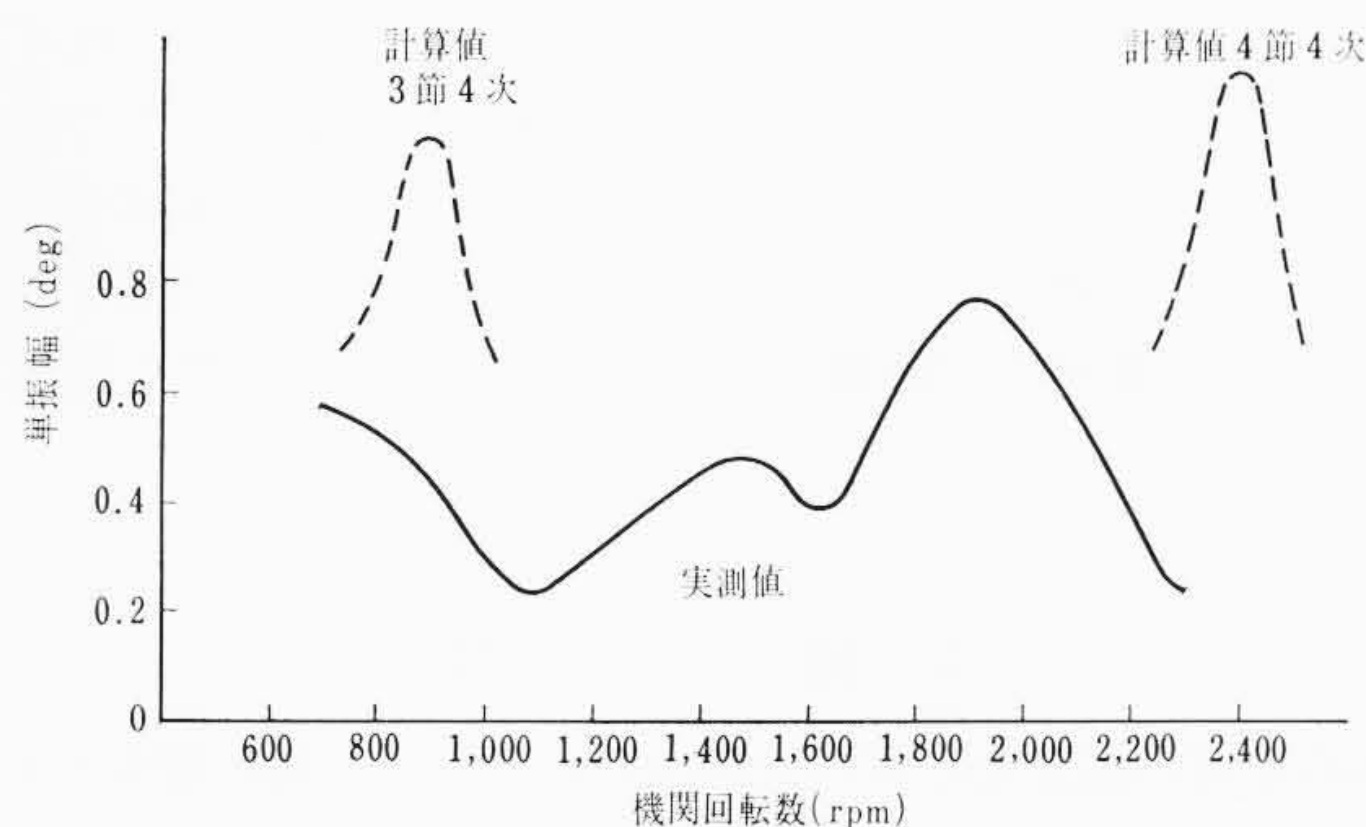


図 18 変速機入力軸のねじり振動 (第 3 速後輪駆動時)

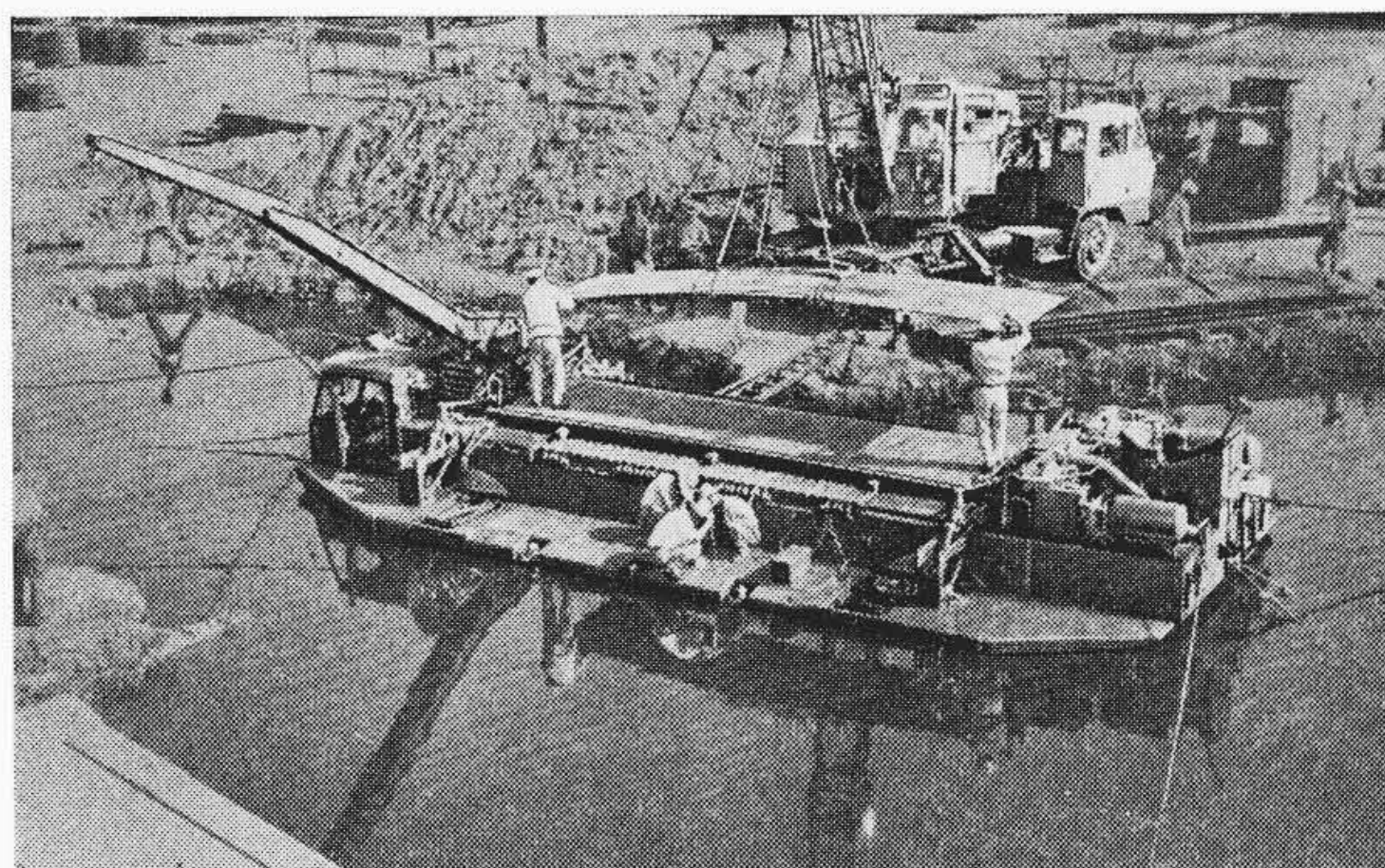


図 19 水上荷重試験の状況

定数は柔らかく、系の固有振動数は 2 c/s 程度で十分に低い。また、振動加速度も実測値は最大  $1 \pm 0.8$  g 程度で、問題ないことが確認された。

## (6) 水密関係の試験

外板のリベット継手、配管などの貫通部、マンホールなどの開閉部分のシールはそれぞれ部分模型により水圧試験を実施した。また、スイングアーム軸受、車軸のナックル球面部シール、プロペラ駆動軸ボールジョイントの水密ブーツなどは特に重要かつ問題の部分であるから水中での耐久試験を実施した。また、実車については車体、浮体の水張り試験、車輪室の気密試験なども実施した。

## (7) 水上試験

工場内の池に浮べて載荷し、喫水と排水量の測定、トリムの測定、プロペラスラストの測定その他各種機能試験を実施した。喫水と排水量は計算値ときわめてよく一致し、トリムも良好であった。また、これらの試験と同時に車体の水漏れに対する最終かつ総合的点検を行なったがこれも良好な結果が得られた。図 19 は試験の状況を示したものである。

## 8. 結 言

以上、試作自走浮橋について構造、設計および試験の概要を述べたが、本車の完成により渡河作業の機動化、能率化に大いに貢献することができるものと信ずる。

終わりに本試作に際し種々ご指導をいただいた防衛庁技術研究本部技術開発官(陸上担当)ならびに、第 4 研究所の各位、笠戸工場関係者各位に深く謝意を表する。