

# 魚礁ブロック設計法の改良に関する研究

水産工学研究所水産土木工学部

高木儀昌\* ・ 明田定満\*\*

森口朗彦\*\*\* ・ 大村智宏\*

調査実施年度：昭和63～平成4年度

## 緒言

人工魚礁ブロックによる漁場造成は、集魚、漁獲の手段として有効なものであり、かつ魚礁ブロック自身の経済性、施工性といった面で優れていることもあり、広く行われている。しかしながら、魚礁ブロック設置時におけるこれらの破損については、これまで十分考慮されてきたとは言えず、施工性、供用性といった面に焦点を当てた、魚礁ブロックの構造設計法の提案が期待されていた。そこで、本研究では魚礁ブロックの設計計算法の改良を行うために、魚礁ブロックの設計条件、各構造諸元ならびに設置後の実態について調査し、設計計算法の標準化および設計精度向上に必要な資料を収集し整理した。また、魚礁ブロックの構造設計において最も重要な着底姿勢について、水理模型実験や現地での潜水調査等から検討を行った。これらより、魚礁ブロックの合理的な構造設計法を作成するとともに、標準的な魚礁ブロックの構造諸元の提案を目的とした。

## 調査方法

本研究においては、調査研究の段階を以下の5項目に分類し、これらを順に追うことにより調査分析を行った。

- ①魚礁ブロックの設置状況調査
- ②魚礁ブロックの着底衝撃力
- ③魚礁ブロックの抗力係数
- ④魚礁ブロックの応力解析手法の開発
- ⑤魚礁ブロックの応力解析

まず、現状把握を行うためのフィールドワークとして「①魚礁ブロックの設置状況調査」を行った。つづいて、魚礁ブロック投入時における破壊原因の究明を行うため「②魚礁ブロックの着底衝撃力」について実験を行い、また着底衝撃力の要因である「③魚礁ブロックの抗力係数」について調査した。更に、「④魚礁ブロックの応力解析手法の開発」として魚礁ブロック構造設計プログラムを開発し、本研究にて得られたデータを用いることにより「⑤魚礁ブロックの応力解析」を行った。

これら個々について下にそれぞれ詳述してゆく。

### 1. 魚礁ブロックの設置状況調査について

現在、沿整事業にて施工されている魚礁ブロックの設計施工法および構造諸元の整理と類型化を行った。また、魚礁ブロックの洗掘埋没、移動、破損等の設置状況について、都道府県の沿整事業実施機関に対するアンケート調査を行うとともに、魚礁ブロックの構造諸元の差異による設置状況の相違に関する潜水調査を行った。調査の内容としては

#### 1-1 魚礁ブロックの製作、沈設方法の把握

\*現 水産工学研究所

\*\*現 北海道開発局

\*\*\*現 北海道開発庁

- 1-2 魚礁ブロックの集積配置の状況
- 1-2-1 魚礁ブロックの集積配置の状況
- 1-2-2 魚礁ブロック周辺の洗掘埋没の有無とその状況
- 1-2-3 魚礁ブロックのひび割れ等の破損の有無と破損の状況
- 1-2-4 魚礁ブロック周辺の底質状況
- 1-3 魚礁ブロック設計施工法、構造の整理と類型化

である。

なお、潜水調査地点は、・代表的な魚礁を使用、・沈設直後、・潜水調査が可能、・魚礁ブロックの設計施工法の差異（部材寸法、ハンチの有無、主鉄筋およびスターラップ筋の配筋、設置方法）による設置状況の比較が可能といった点を考慮した上で17カ所の魚礁漁場を選定した。

## 2. 魚礁ブロックの着底衝撃力について<sup>1) 2)</sup>

実験は水産庁水産工学研究所の深水波増波水槽において行った（表1）。モデルは、1辺2mの鉄筋コンクリート製角型魚礁ブロックの水深50mへの設置を想定したものであり、縮尺は1/25とした（図1）。

実験においては、模型投下時の初期姿勢と着底姿勢、着底姿勢と着底衝撃荷重との関係を調べるものとし、同時に投下による魚礁ブロックの施工精度を検証した。

模型は投下装置により初期姿勢を保持し、水に没する状態から水底に設置したロードセル上に投下する。ここでは、模型の初期状態を図2に示す<正位置>、<綾位置>、<点位置>の3ケース設定している。

模型の着底時の衝撃荷重および着底姿勢は、それぞれペンレコーダ、ビデオカメラにより記録した。また、着底位置をロードセル上に設けたスケールにより測定することで、その設置精度を評価した（図3）。

解析において着底姿勢は、水底に対して向かい合う面とのなす角が5°以下を<面着>、その他を模型の着底部位から<綾着><点着>とし、それぞれ5°~10°、10°~20°、20°~30°、30°~45°に分類している。

## 3. 魚礁ブロックの抗力係数について<sup>3)</sup>

実験は水産庁水産工学研究所の漁船推進性能試験水槽において行った（図4、表2）。

模型は1辺1m、部材断面12.5cm×12.5cmであり、その隅角部分をジグを介してロードセルにより支持し、台車により曳引する（図5、図6）。模型の曳引方向に対する角度は0°、15°、30°、45°とし、曳引速度は、0.1~2.0m/secの範囲で20ケース設定した。ロードセルは波による抵抗の増加を考慮し、翼断面のジグ内部に収めている。

測定結果は、模型の遮影面積を8125cm<sup>2</sup>として抗力係数を求め、角度別にレイノルズ数に対する抗力係数の変化を調べる。

## 4. 魚礁ブロックの応力解析手法の開発について

解析手法の概要を以下に示す。

RC（鉄筋コンクリート、以下RCと略す）角型魚礁ブロックのようなRC構造物の限界強度を数値解析で求める場合には、次のような点を考慮する必要がある<sup>4) 5)</sup>。

- 1) RCを構成する素材（コンクリートと鉄）の材料的非線形性
- 2) コンクリートのひび割れ進展に伴う構造変化による幾何学的非線形性

これらを比較的容易に評価するため、複合部材の断面を有限個のファイバーの組み合わせでモデル化し、1つの梁要素とみなすアルゴリズム（ファイバーモデル）にコンクリートのひび割れ処理を組み合わせた解析プログラムFBSP-3Dを開発した。この手法ではデータ作成が容易であり、軸と曲げの連成した荷重に対して弾塑性解析が可能である。

このプログラム扱うのは、曲げ、ねじり梁要素と、RCを想定したファイバー梁要素である。この要素

では、断面内の各ファイバーの座標と物性値の組み合わせから、等価な梁要素を組み立てる。ファイバー梁要素の構成例を図7に示す。ここでの座標系は、要素の①端を原点として、ファイバーモデル要素の軸に沿った座標系をx軸とし、断面をy-z平面とする要素座標系とする。

各要素断面における物性値を、中心 $(y_i, z_i)$ 、断面積 $A_i$ 、ヤング係数 $E_i$ 、せん断弾性係数 $G_i$ とすれば、y軸ならびにz軸廻りの断面2次モーメント $I_y, I_z$ は次のように表される。

$$A = \sum A_i \quad \dots \dots \dots (a)$$

$$E = \frac{\sum E_i A_i}{A} \quad \dots \dots \dots (b)$$

$$I_y = \frac{\sum E_i A_i (y_i - y_o)^2}{E} \quad \dots \dots \dots (c)$$

$$I_z = \frac{\sum E_i A_i (z_i - z_o)^2}{E} \quad \dots \dots \dots (d)$$

$$G = \frac{\sum G_i A_i}{A} \quad \dots \dots \dots (e)$$

ここで $(y_o, z_o)$ は要素の中立軸である。要素断面内の構造不均質のみをモデル化できるので、スターラップ筋のような軸方向に分布する不均質性はモデルに含まれない。

このモデルにおいては、梁の曲げ応力度は各ファイバーの軸応力に対応する。ねじりによるせん断応力はファイバーの軸に垂直な面でのせん断応力にて表現される。ひび割れを含めた応力解析は、荷重増分法により行う。本プログラムでは、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルで与えられ、各ファイバーの軸応力からひび割れ、塑性状態を判定し、ファイバー毎に剛性を変化させる。そして、荷重ステップ毎に中立軸の移動の処理を行う。このモデルでは、ひび割れた際に要素全体の剛性を変化させるので、コンクリートを直交異方性材料とみなす分布ひび割れモデルの一種であるといえる。ただし、この場合は応力を評価する方向が軸方向であることから、軸力と曲げによって発生する軸と直交するひび割れを評価することになる。

中立軸が移動していくと要素断面の力学的な中心がモデルの節点からずれるので、コの字型の要素形状を仮定して剛性マトリックスで評価しなおす。これを模式的に表したのが図8である。

ひび割れが発生した要素では塑性と異なり、要素が受け持っていた応力を解放する必要がある。FBS P-3Dでは、ひび割れの発生したファイバーの応力を要素中心での等価な軸力とモーメントに変換し、要素両端の節点に載下する方法をとっている。

### 5. 魚礁ブロックの応力解析について

解析モデルとしては、ハンチのある2m角型魚礁ブロックを解析対象とした。図9、図10にその外形図と部材断面図を示す。

この魚礁ブロックはハンチ部と梁部材から成る。梁部材の部分はファイバーモデルによる梁要素を用い、断面を図11のように鉄筋とコンクリート部でモデル化した。ハンチ部は剛体とみなし、十分剛性の高い弾性単純梁要素でモデル化を行った。全体で110節点112要素の有限要素分割となっている。部材の主鉄筋にはSD30で、D10, D13, D16の3種類を想定した。スターラップ筋については考慮していない。ここで使用した物性値を表3に示す。

荷重条件としては、本解析では自重と載荷点荷重を考慮する。そのために、まず地上重量に対して自重解析を行い、その結果を初期応力として設定した。その後、魚礁ブロック上部の梁中央部に対し鉛直下方向に集中荷重を載荷した。荷重条件は1点から4点までの4通りである。図12に荷重条件と載荷点位置を示す。

この荷重条件は既設魚礁ブロックの上にさらに魚礁ブロックが設置されるとき、魚礁ブロック間の衝突

による衝撃を静的荷重として単純にモデル化したものである。

## 結果

前節にて分類した5項目に関してそれぞれ結果を述べてゆく。

### 1. 魚礁ブロックの設置状況調査について

#### 1-1 魚礁ブロックの設置方式

魚礁ブロックの設置方式は、設置水深、魚礁ブロックの積み方ならびに構造計算に用いる着底衝撃力により選択されるが、吊り下げ方式の方が、海上投入方式（海面下投入方式を含む）より設置精度が良い（図13）。なお、どちらの方式でも設置精度は海上の位置出し精度に左右される。

#### 1-2 魚礁ブロックの集積配置

多層積みされた魚礁ブロックは、波、流れの作用を受けて、力学的に安定な魚礁群形態になるように移動しやすいが（多層積み→短層積みあるいは底層積みへ）、魚礁機能が低下するほどの逸散はみられなかった（図14）。このことから、魚礁群の高さ維持は難しいが、魚礁群の面的な維持は比較的容易であることがわかった。

#### 1-3 魚礁ブロック周辺の洗掘埋没状況

波浪の影響を受け易い浅海砂浜域に設置された魚礁ブロックは魚礁群周辺に砂連の生成があり、魚礁群周辺に洗掘が見られた。また、軟弱地盤に設置された魚礁ブロックは、底板の付加、軽量コンクリートの使用、施工法の改善等の埋没対策が必要な事例も見られた。

#### 1-4 魚礁ブロックの破損状況

1-4-1 海上投入方式による魚礁ブロックの設置では、部材の諸元や配置に関係なく、魚礁ブロック同士の衝突により梁部にひび割れ、隅角部の剥離等の微細な破損箇所（図15）が見受けられたが、破損の割合は数パーセント程度であり、魚礁機能を損なうような事例は殆ど見られなかった。なお、吊り下げ方式による魚礁ブロックの設置の方が、破損の程度、割合が小さいという傾向が見受けられた。

1-4-2 海底地盤への着底時における衝撃力に対しては、魚礁ブロックは海底地盤（岩盤は除く）の種類、硬軟の程度に関わらず、ひび割れ等の破損は殆ど見られない。このことから、魚礁ブロックを海底面に短層積みする場合における、現行の魚礁ブロック設計法の妥当性が確認された。

1-4-3 既設魚礁ブロックの上に魚礁ブロックを設置する場合には、魚礁ブロック部材の耐力を越える衝撃力が生じることがあり、微々たる割合ではあるが大きな部材変形を生じた事例がみられた。このことから、今後の検討課題として、多層積みする場合の魚礁ブロックの設計施工法の改善が求められている。

1-4-4 沈設後長期間経過した魚礁ブロックの設置状況調査から、沈設時に破損した部分の破損拡大は殆ど見受けられず、また設置後の波、流れによる破損も見受けられないため、微細なひび割れ等であれば洗掘埋没を受けない限り、将来的にわたり魚礁機能を満足するであろうことが推測された。

1-4-5 主鉄筋およびスターラップ筋の配筋ならびにハンチの有無は、破損の有無にはあまり関係しないが破損程度に関与している。

#### 1-5 魚礁ブロック周辺の底質

砂質海底に設置された魚礁ブロック周辺の底質は、魚礁ブロック内部およびその周辺での底質の粗粒化を示す事例が多く見られた。同様に、 $\phi 10\text{mm}$ の鉄棒による貫入試験からも、魚礁ブロックに近づく程硬くなる傾向が見られ、魚礁ブロック周辺の粗粒化傾向を裏付けられた。

## 1-6 魚礁ブロックの設計条件、構造諸元の整理類型化

- 1-6-1 魚礁ブロックは、辺長1.5mと2.0mのものが殆どである。また、1.5m魚礁ブロックはハンチ無しが多く、2.0mのものはハンチ有りが多い。
- 1-6-2 魚礁ブロック部材としては、正方形部材（1.5m魚礁ブロックは部材幅20cm、2mのものは部材幅25cm）が最も多く使用される。
- 1-6-3 1.5m魚礁ブロックはD10またはD13規格の鉄筋を複数配筋するのが大半であった。2m魚礁ブロックは、D13またはD16規格の鉄筋を複数配筋するのが大方であった。
- 1-6-4 魚礁ブロックの単位体積重量は、 $2.45\text{t/m}^3$ を用いる事例が殆どである。

## 2. 魚礁ブロックの着底衝撃力について

実験はそれぞれの初期姿勢について150回づつ行った。

魚礁ブロックの設置精度についての結果を表4に示す。ここでは着底位置をスケール上のA～Cの領域により表している。現在の魚礁ブロックの設置精度は、水深の1/10であり、全ケースがその範囲内にある。特に正位置からの投入は、その98.7%が水深に対して1/20の範囲にあり、施工精度の高いことがわかった。これらは魚礁ブロックの初期姿勢が落下時の安定性に影響を与えることを示している。

つづいて表5に各初期姿勢に対する着底姿勢の割合を示す。この結果より模型の着底姿勢は、初期姿勢もしくはそれに近い状態であることがわかる。これはそれぞれの初期姿勢が模型の落下において安定性の高い状態であるためと考えられる。上記設置精度における正位置からの投下の結果を合わせることで、面的な落下が最も安定性が高いと予想される。

次に初期姿勢別の衝撃荷重の分布を図16a～cに示す。ここで、衝撃荷重は基準とした衝撃荷重を用いて無次元化している。図にはそれぞれの着底姿勢の割合を重ねて記してある。全体として、衝撃荷重の増加とともに綾着、点着の割合が高くなっている。

図17a～cは、これらをもとに着底衝撃荷重の発生の割合を横軸方向に累積することにより得られたものである。

この結果より、初期姿勢に対する各着底姿勢の割合は変化するものの、着底衝撃荷重に関して初期姿勢は影響せず、着底姿勢のみ依存していることがわかる。この図を用いることにより、基本となる着底姿勢に関する着底衝撃力が算定できれば、各着底姿勢に対する衝撃力も概算でき、また安全率と設計精度との関係を示すことができる。

## 3. 魚礁ブロックの抗力係数について

実験結果を図18a～dに示す。

これらの図より、抗力係数はレイノルズ数 $Re = 5 \times 10^4$ 付近まで各曳引角度ともほぼ一定の値をとっている。この時の値は、現在用いられている抗力係数の3/5程度であるが、魚礁ブロックの角度による変化のないことから、低速での落下においては現行の方法が有効であることがわかる。

さらにレイノルズ数が増大すると、それに伴い抗力係数も上昇し、 $Re = 1.5 \times 10^4$ 前後を最大として、その後急速に減少している。その値は0.7程度であり、現在のほぼ1/3程度である。この抗力係数の増大による魚礁ブロックの落下速度は約1.7倍であり、魚礁ブロック設計における安全率を考慮しても無視できないものである。

ここで、抗力係数の角度変化を図19に示す。これにより落下速度の速い場合、角度による抗力係数の差が大きくなり、その落下姿勢に影響を与えることが予想される。

このような抗力係数の低下は、角柱単体についても同様に現れるが、この場合、得られた結果の乱れなどから魚礁ブロックの部材間の相互作用の影響も強いと考えられる。

#### 4. 魚礁ブロックの応力解析手法の開発について

F B S P - 3 D の解析結果を、実験値<sup>6)</sup>ならびに汎用解析プログラム D I A N A (オランダ T N O) による解析結果<sup>7)</sup>と比較する。解析対象は R C 門型ラーメンであり、3 t の静的荷重をスパン中心近傍に載荷している。F B S P - 3 D と汎用解析プログラムおよび実験の変位とひび割れパターンの比較を図 2 0、図 2 1 に示す。

#### 5. 魚礁ブロックの応力解析について

調査方法にて述べた荷重条件に基づいて解析を行った結果から、各ケースのひび割れ開始荷重と鉄筋降伏開始荷重について図 2 2、図 2 3 に示す。理解しやすいように縦軸は載荷点 1 点あたりの荷重とした。ここでひび割れ開始荷重とは、いずれかの要素のコンクリートファイバーがひび割れを起こした時の荷重である。また、鉄筋降伏開始荷重とはいずれかの要素の主鉄筋ファイバーが圧縮または引張りにより降伏した時の荷重である。

表 3 からわかるように、設計時のコンクリートの引張限界応力は非常に低いため、ひび割れが始まっても鉄筋が弾性域にある限り魚礁ブロックは破損に至っていないものと考えることができる。また、鉄筋が降伏した時点でひび割れが開口し魚礁ブロックが破損したと考えることにより、鉄筋降伏荷重を魚礁ブロックの設計限界荷重とみなすことができる。

図 2 2、図 2 3 から次のことがわかる。

- 1) ひび割れ開始荷重は鉄筋径によらずほぼ一定である
- 2) 載荷点 1 点あたりに換算した限界荷重 (鉄筋降伏荷重) は荷重点数によらずほぼ一定である
- 3) 限界荷重は鉄筋断面積に比例して増加する傾向にある

図 2 4 に 3 点載荷時の魚礁ブロック (D13) の変位図を示す。

次に、既設魚礁ブロックの上にさらに魚礁ブロックを上積みする場合の設置速度について検討する。まず沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針 (昭和 5 9 年、以下「設計指針」と略す) に基づき、既設魚礁ブロックに落下速度  $V$  で魚礁ブロックが衝突するときの衝撃力を等価な静的荷重に変換する。その荷重が接触点に均等に載荷されるものとし、図 2 5 に落下速度と 1 点あたりの荷重の関係を示す。

魚礁ブロックが上積み設置される時の状況を平均的に 3 点接触であると仮定すると、図 2 4、図 2 5 から設置速度の限界を推定できる。表 6 に鉄筋径と限界設置速度の関係を示す。

この魚礁ブロックを海面下投入した時の落下速度を設計指針に基づいて計算すると、設置水深 1 0 m の時で、落下速度は面着時 2.3m/s、稜着時 2.0m/s になる。

### 結言

魚礁ブロック沈設時に魚礁ブロック同士の衝突の危険性が有る場合、魚礁ブロックの設置方法は吊り下げ方式とし、危険性が薄い場合には、設置水深と設置精度等から海上投入方式 (あるいは海面下投入方式) または吊り下げ方式を選択することが望ましい。

高レイノルズ数下における角型魚礁ブロックの抗力係数の低下が確認された。その値は、現在の魚礁ブロック設計等に用いられてきた値  $C_d=2.0$  に対して 0.7 程度であった。また、この時抗力係数の角度変化が認められた。

魚礁ブロックに用いる鉄筋は D 1 3 以上が望ましい。

魚礁ブロックの構造設計プログラムの作成により、都道府県、市町村設計担当者の設計業務の軽減が図られる。

## 摘要

抗力係数は魚礁ブロックの落下速度、姿勢に影響することから、今後の魚礁ブロック設計等において更に検討すべき課題である。

角型魚礁ブロックについて、3次元弾塑性解析を行なうことにより限界荷重ならびに設置速度を求めたのであるが、この解析においてはスターラップの影響を考慮したものではないため、実際の設計、施工の際はスターラップ間隔の魚礁ブロック強度への影響を十分検討した上で解析結果を評価する必要がある。

## 引用文献

- 1) 中村充・上北征男、1977：人工魚礁の着底衝撃力に関する研究－水中落体の着底衝撃力の解析－。農業土木試験場報告、16。
- 2) 松見吉晴・横山忠広・瀬山明、1988：海上投入法による魚礁の安定配置に関する研究。海岸工学講演会論文集、35。
- 3) 田島泰、1984：角型魚礁に働く流体力－波と流れの共存場において－。昭和59年度日本大学工学部卒業研究。
- 4) S.Valliapan・T.F.Doolan、1972：Nonlinear Stress Analysis of Reinforced Concrete. Journal of the Structure Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineering, ST4, 885-898.
- 5) A.C.Scordelis 野口博抄訳、1974：鉄筋コンクリート構造物の有限要素法による解析。コンクリートジャーナル、12(9)、68-80。
- 6) J.G.M.van Mier、1987：HERON、Examples of non-linear analysis of reinforced concrete structures with DIANA、32(3)、1-57。
- 7) 鷺津久一郎他編、1981：有限要素法ハンドブック。培風館。

付図付表

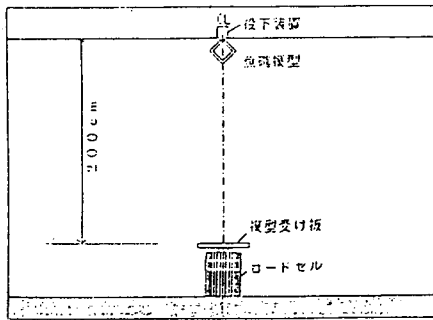


図1 実験モデル

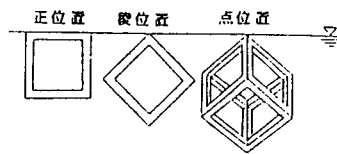


図2 模型初期姿勢

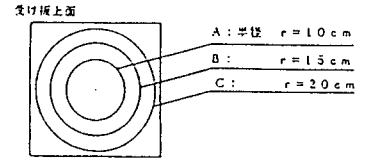


図3 受け板上スケール

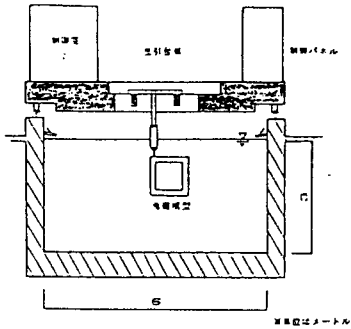


図5 模型設置位置

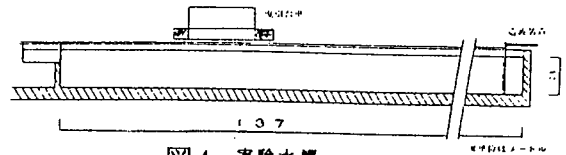


図4 実験水槽

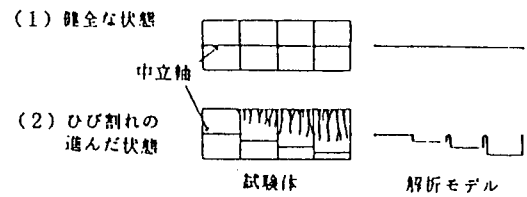


図8 ひび割れの進展とモデルの変化

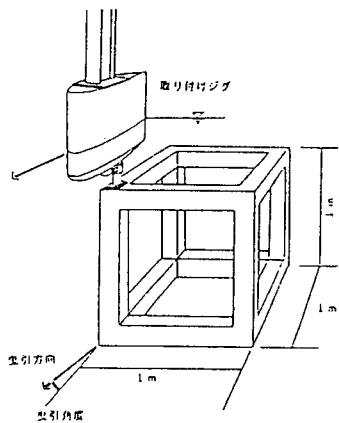


図6 実験模型および曳引角度

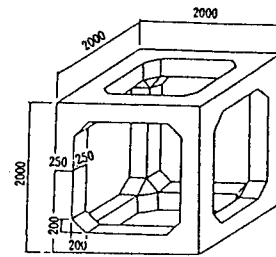


図9 魚鱗外形図

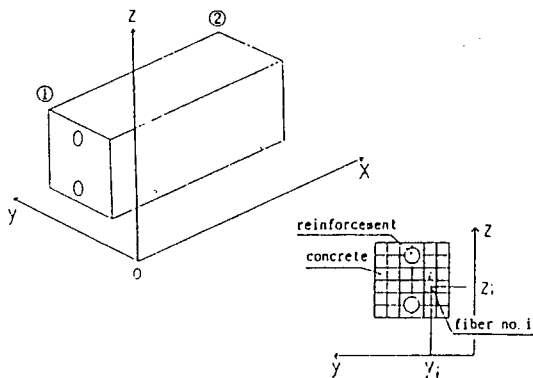


図7 層層はり要素の構成方法

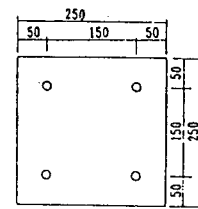


図10 部材断面図

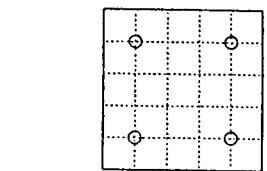


図11 断面のファイバー分割図 (丸い部分が主鉄筋)

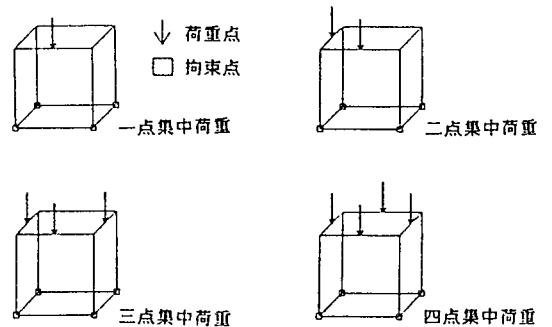


図12 荷重条件と載荷点位置図



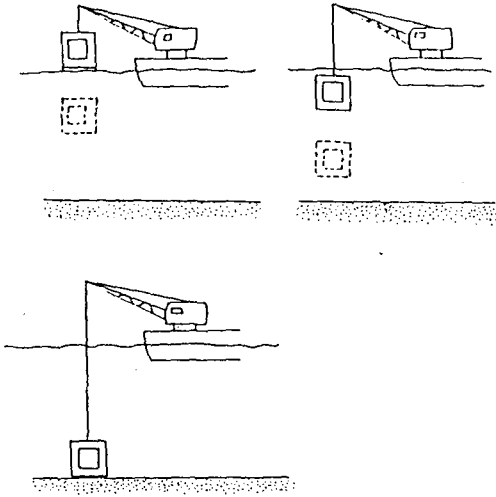


図13 魚礁の設置方式  
 上左図：海上投入方式  
 上右図：海面下投入方式  
 下図：吊下げ方式

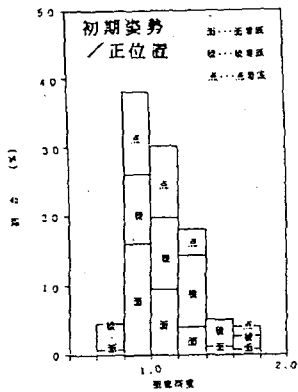
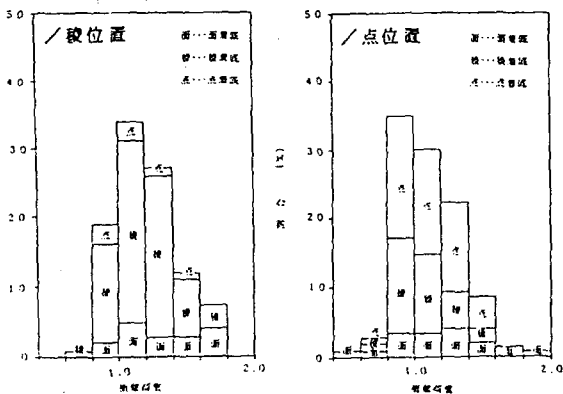


図16 (a) 衝撃荷重分布



16 (b) 衝撃荷重分布 図16 (c) 衝撃荷重分布

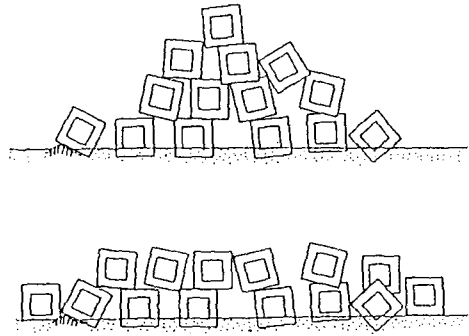


図14 魚礁群形態変化の様式図  
 (上図：設置直後，下図：波流れの作用後)

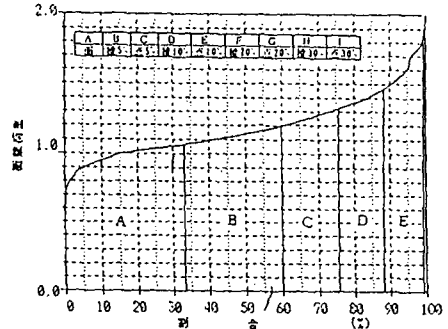


図17 (a) 衝撃荷重累積曲線 初期姿勢/正位置

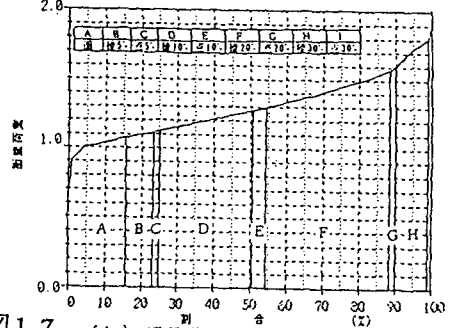


図17 (b) 衝撃荷重累積曲線 /線位置

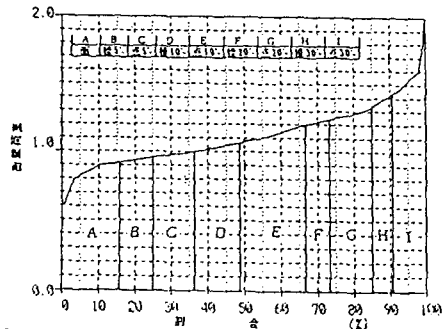


図17 (c) 衝撃荷重累積曲線 /点位置

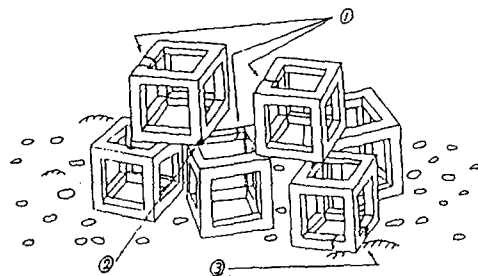
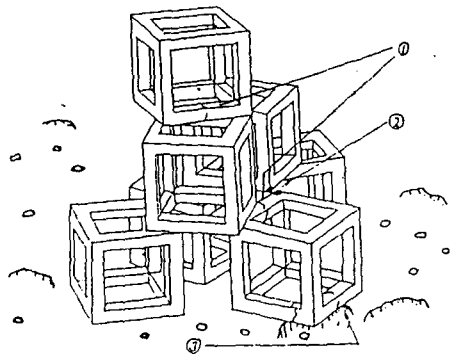


図15 魚礁の損傷部位の様式図  
 ①魚礁同士の衝突による梁部のひび割れ  
 ②魚礁同士の衝突による隅角部の剥離  
 ③岩盤上に着底

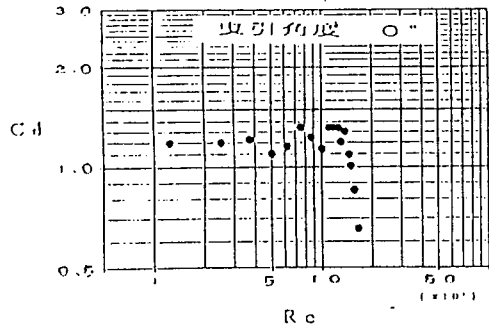


図18 (a) レイノルズ数に対する抗力係数変化

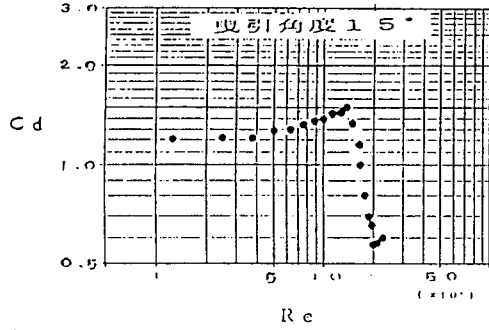


図18 (b) レイノルズ数に対する抗力係数変化

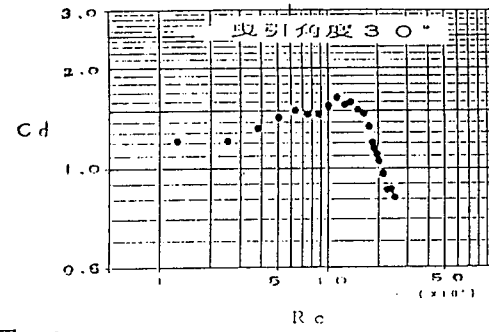


図18 (c) レイノルズ数に対する抗力係数変化

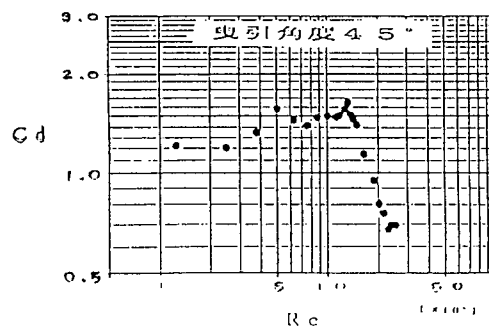


図18 (d) レイノルズ数に対する抗力係数変化

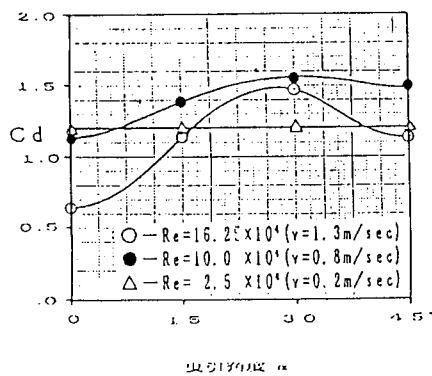


図19 抗力係数の角度変化

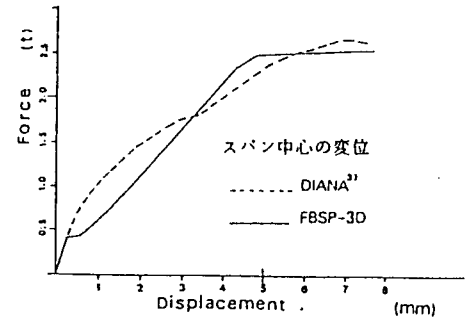


図20 FBSP-3Dと汎用コードによるひび割れ進展状況

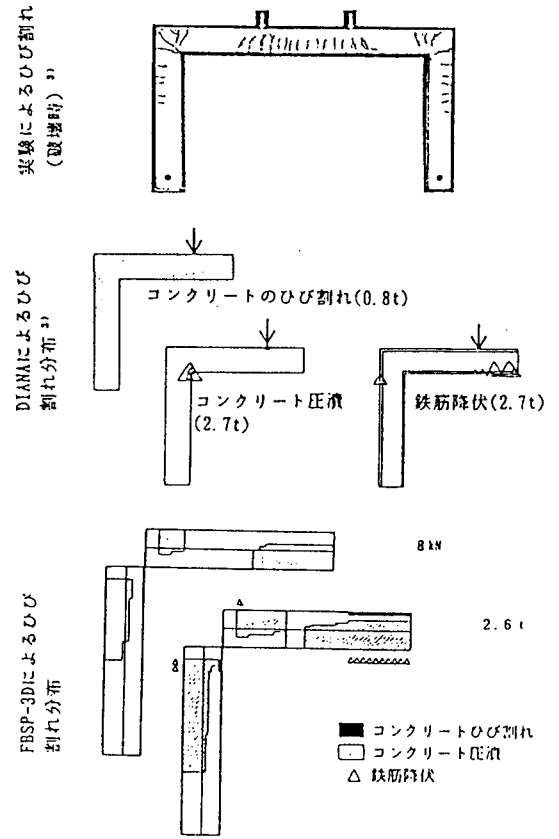


図21 FBSP-3D, 汎用コード及び実験によるひび割れ進展状況

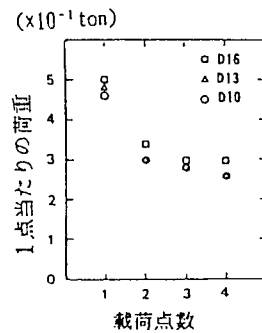


図22 ひび割れ開始荷重

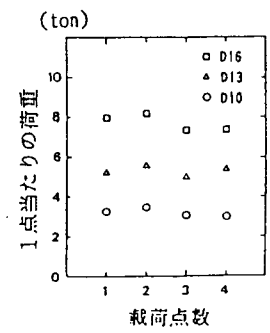


図23 鉄筋降伏開始荷重

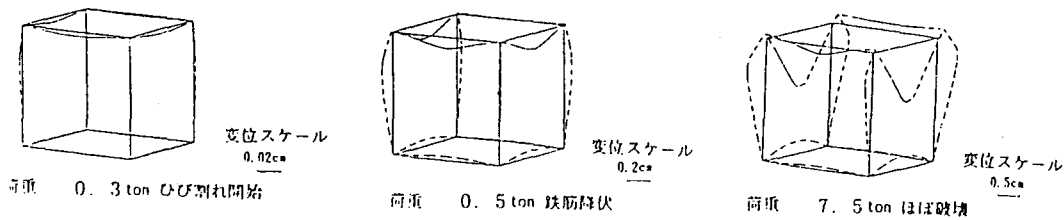


図24 変位図(3点載荷時, D13)

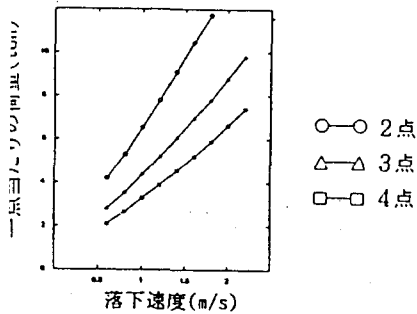


図25 落下速度と荷重

水槽諸元および実験模型

|     |  |
|-----|--|
| 換水槽 | 水産工学研究所深水波造波水槽<br>(長さ 100m、幅 1m、水深 2.4m)               |
| 蔗模型 | アルミニウム製<br>梁断面 1cm×1cm、一辺 8cm立方体<br>比重 2.69<br>重量 218g |

表2 水槽諸元および実験模型

|       |   |
|-------|---|
| 実験水槽  | 水産工学研究所長水槽<br>(長さ 137m、幅 6m、水深 3m)                |
| 実験模型  | 一辺 100cm立方体ラーメン構造<br>部材断面 12.5cm×12.5cm<br>比重 1.4 |
| 曳引台車  | 走行速度 0.05~3.0m/s<br>加速度 0.02G<br>減速度 0.015G       |
| ロードセル | 3方向 500kg防水型                                      |

表3 使用物性値

|                               | コンクリート                | 鉄筋(主筋)                                    |
|-------------------------------|-----------------------|---|
| 単位体積重量 (kg/cm <sup>3</sup> )  | 2.30×10 <sup>-3</sup> | 7.85×10 <sup>-3</sup>                     |
| ヤング率 (kg/cm <sup>2</sup> )    | 2.1×10 <sup>5</sup>   | 2.1×10 <sup>6</sup>                       |
| せん断弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 9.0×10 <sup>4</sup>   | 8.1×10 <sup>5</sup>                       |
| 圧縮許容応力 (kg/cm <sup>2</sup> )  | 5.5×10                | 1.8×10 <sup>3</sup>                       |
| 引張許容応力 (kg/cm <sup>2</sup> )  | 3.0×10                | 1.8×10 <sup>3</sup>                       |
| 降伏後の剛性低下率                     |                       |   |
| 圧縮時                           | 0.001                 | 0.001                                     |
| 引張時                           | ひび割れ                  | 0.001                                     |
| 断面積 (cm <sup>2</sup> )        |                       | 0.7133(D10)<br>1.267 (D13)<br>1.986 (D16) |

表4 着底範囲

| 初期姿勢     | 半径 r=10cm | r=15cm | r=20cm |
|----------|-----------|--------|--------|
| 正位置(0°)  | 98.7      | 1.3    | 0.0    |
| 稜位置(45°) | 29.3      | 54.0   | 16.7   |
| 点位置      | 47.3      | 48.7   | 4.0    |

(単位%)

表5 模型初期姿勢に対する着底姿勢割合

| 初期姿勢 | 面着底  | 稜着底  |      |      |      | 点着底  |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 正    | 32.7 | 40.7 |      |      |      | 26.7 |      |      |      |
|      |      | 5°~  | 10°~ | 20°~ | 30°~ | 5°~  | 10°~ | 20°~ | 30°~ |
|      |      | 26.7 | 12.0 | 2.0  | 0.0  | 16.0 | 10.7 | 0.0  | 0.0  |
| 稜    | 16.0 | 76.0 |      |      |      | 8.0  |      |      |      |
|      |      | 5°~  | 10°~ | 20°~ | 30°~ | 5°~  | 10°~ | 20°~ | 30°~ |
|      |      | 6.7  | 26.0 | 34.0 | 9.3  | 2.0  | 3.3  | 2.0  | 0.7  |
| 点    | 16.0 | 32.7 |      |      |      | 51.3 |      |      |      |
|      |      | 5°~  | 10°~ | 20°~ | 30°~ | 5°~  | 10°~ | 20°~ | 30°~ |
|      |      | 9.3  | 11.3 | 6.0  | 6.0  | 11.3 | 19.3 | 12.0 | 8.7  |

(単位%)

表6 鉄筋径と限界設置速度

| 鉄筋  | 限界設置速度 (m/s) |
|-----|--------------|
| D10 | 0.6          |
| D13 | 1.1          |
| D16 | 1.6          |