

## 人工魚礁の部材形状及び素材別の 衝撃強度に関する研究

実施機関 水産工学研究所水産土木工学部漁場施設研究室  
担当者名 高木儀昌・森口朗彦・内山裕三・大村智宏  
共同調査機関 北海道・新潟県・山形県  
調査実施年度 平成5年度～平成7年度

### 1 まえがき

魚礁設置事業には多くの人工魚礁ブロックが用いられているが、設置時における破損が問題となっており、施工現場での設置状況調査においても多くの破損が認められている。破損の原因としては、沈設時のブロック間の衝突や海底面での衝撃が上げられ、重大な破損の大半はブロックを海底に積み上げる時に発生する衝撃力によるものと推察されている。

そこで人工魚礁の安全性向上と設計、施工法の改良を検討するため、沈設時における破損の原因となる衝撃力とそれに対する強度の把握を目的とし、今後の改良の方針、具体的な改良案を検討した。

### 2 調査方法

#### 2.1 実験に用いた魚礁の種類

実験対象は、円筒型魚礁（ $\phi 1.8\text{m}$ 、3t）とし、既往のものから丸窓タイプ（図-1.1、鉄筋D10）、角窓タイプI（図-1.2、鉄筋D10）、角窓タイプII（図-1.3、鉄筋丸鋼）を用いた。また、実験結果より、同じ円筒型魚礁であっても、窓形状、仕様鉄筋及び配筋によって強度が異なり、特に丸窓型に比べて角窓が弱いことが確認されたため、角窓型の実用的な改良として改良タイプI（図-1.4）、改良タイプII（図-1.5）を提案した。具体的には、角窓タイプIをたたき台として、型枠の改良が軽微で、鉄筋量、コンクリート量の変化が少ない改良（案）を、県、施工業者との意見交換をとおして検討した。

なお、配筋図からもわかるように、円筒型魚礁の底面には円型の窓の開いた底板がある。

#### 2.2 実機を用いたの着底衝撃力と強度の把握

##### (1) 落下実験

円筒型魚礁ブロックをクレーンで吊り下げ、一定速度で落下させることにより地面に衝突させ、この時の衝撃を加速度計で測定した。ブロックは角窓タイプIIを用い、着底時のブロックの姿勢は底面から（CASE-1.1）と側面から（CASE-1.2）の2とおりとした。なお、実験を行った地点の地盤は、概ね深度3mまでN値4未満の粘性土の軟弱地盤である。

##### (2) 衝突実験

円筒型魚礁ブロックをクレーンで吊り下げ、一定速度で落下させて地上に置いてある同型ブロックに衝突させ、この時の衝撃を加速度計で測定した（写真-1）。衝突させる個所は、角窓タイプIIについてはブロック底面と側面上方（CASE-2.1）及び底面と側面下方（CASE-2.2）、円窓タイプについてはブロック底面と側面上方（CASE-2.3）とした。さらに、改良タイプIIについても同実験を行い、亀裂発生パターンか

ら従来型と強度を比較した（CASE-2.4）。

### （3） 衝撃実験

振り子式のハンマー（318kg）を台座に固定した円筒型魚礁ブロックの側面上方に衝突させ、この時の衝撃を加速度計で測定した（写真-2）。ブロックは角窓タイプIIを用いた（CASE-3.1）。同時に、この時の最大ひび割れ幅をクラックゲージで測定した（CASE-3.2）。

## 2. 3 数値模型を用いた応力解析

魚礁を要素・接点分割し、3次元有限要素法（FEM）による弾塑性解析を行い、汎用的な強度の把握方法を検討した。当初、従来より角型魚礁の構造解析に用いてきた手法を既往型の円筒型魚礁の解析に適用したところ、角窓タイプI、角窓タイプII、丸窓タイプの順に鉄筋の塑性開始強度が低くなる結果となった。これは、実機を用いた実験とは逆の結果であり、従来の解析手法が円筒型に適合していないことが推察されたことから、ひび割れ発生位置を従来法のように一定の範囲に分散するようなモデルではなく、実機を用いた実験から得られたひび割れの過程をパターン化し、解析に取り込む手法に改良した。これにより、解析手法の適合性が確認されたことから、改良型に対し、さらに配筋の見直しを行い、改良の方針を決定した。

解析ケースは、実験を再現するケース（丸窓タイプ、角窓タイプI、改良タイプI、改良タイプII）4ケースと配筋設計検討ケース4ケースの計8ケースとした。

2. 2 (1)～2. 3までの実験ケースを表-1にまとめた。

## 2. 4 設置に関する施工試験

着底時の衝撃の緩和および損傷の低減に関しては、魚礁の構造・強度の強化に加えて、設置に関する施工法を見直し、改良することも、重要な対策となる。そのため、設置に関する施工法について、今後の対策を検討するための試験を実施し、施工法および設計の改良方向を検討した。

## 3 調査結果

### 3. 1 実機を用いたの着底衝撃力と強度の把握

#### （1） 落下実験

実験結果図-2.1より、底面からと側面からの落下方法による衝撃の違いはほとんど見られない。衝撃加速度としては、今回実験を行った地盤では、落下速度1m/sの場合、4G程度がブロックに作用していることがわかった。

#### （2） 衝突実験

実験結果を図-2.2に示す。CASE-2.1は0.4m/sの時の約2Gより、落下速度を上げても加速度はあまり増加せず、この時点で破損が進んでいることが推察される。CASE-2.2については、落下速度の増加に比例して加速度も増加しており、CASE-2.1と比較して剛性の高いことが明かとなった。CASE-2.3についてCASE-2.1と比較すると、傾向としては類似しているが、CASE-2.3の方が加速度が大きく、角窓タイプと円窓タイプとの構造の相違による剛性の違いが確認された。

地面に衝突させた場合と比較すると、落下速度1m/sの場合、CASE-2.1で3G弱、CASE-2.2で13G以上、case-2.3で5G程度となっており、魚礁ブロック同志の底面と側面下方が衝突したときは非常に大きな衝撃力となり、危険であることがわかった。

破損状況については、角窓タイプのは隅角部での応力集中によるせん断ひび割れが顕著であった。黙視では加速度計のデータに裏付けされるように、角窓タイプの方が円窓タイプのものに比して大きな破損が観察された。

同実験におけるひび割れ発生状況を丸窓タイプ、角窓タイプII、改良タイプIIについて図-2.3に示す。ひび割れ発生順序はいずれも載荷点直下の円筒内面と側方円筒外面に沿ったひび割れが入り（1次ひび割れ）、次に窓の周囲を起点にして、円筒周に沿うひび割れが入る（2次ひび割れ）。そして、それらが軸方向ひび割れに達し、また軸方向のひび割れが貫通素津用に反対面に現れてほぼ破壊したと見なせる状況になるという経過をたどる。2次ひび割れ発生の様相は窓形状の影響が大で、丸窓タイプは発生する荷重も角窓タイプに比して高く、比較的短い亀裂を分布する傾向がある。角窓タイプでは隅角部を起点に亀裂が比較的早く成長し、1次ひび割れに達しやすい。これは隅角部の応力集中が亀裂の発生を進展を促進するため、角窓タイプが比較的粘りのない構造として振る舞う原因であると考えられる。改良タイプIIでは多少応力集中が押さえられる傾向がある。

### (3) 衝撃実験

CASE-3.1、CASE-3.2の結果を図-2.4、図-2.5に示した。ハンマー速度1.5m/s付近まではハンマー速度と発生する加速度の関係がほぼ線形であるが、その後は非線形関係となっている。これに呼応するように、ひび割れ幅はハンマー速度1.5m/s以降急速に増大しており、魚礁ブロックの破損が進行していることがわかる。

## 3. 2 数値模型を用いた応力解析

実験再現ケースの結果は、図-3.1に示したとおりで、丸窓タイプ、改良タイプIおよび改良タイプII、角窓タイプIの順に鉄筋塑性開始荷重が大きくなっている。この結果は、実験結果とほぼ一致する結果であり、解析手法の改良が適正であったことがうかがえる。また、角窓タイプIと改良タイプI、改良タイプIIの結果を比較した場合、17%程度の強度増加となり、丸窓型に近づいている。破壊実験から得られたひび割れ状況や全体の破損状況との比較では、解析結果は十分に実験結果を表しているとは言い難いものであるが、形状および配筋の改良に対して、実験結果と同様の傾向を示していることから、配筋決定に関しては改良された解析モデルを使用することとした。

配筋設計検討ケースでは、実際の施工現場において損傷が生じ易い状況、すなわち既設の魚礁上に衝突する場合を想定し、その際に発生する衝撃荷重に対して必要な配筋および鉄筋量を算定しようとするものである。なお、このケースにおける解析結果の評価に用いられるコンクリートおよび鉄筋の塑性開始引張強度は、設計基準（沿整指針 p.126）に基づいた数値（コンクリート $3\text{kgf/cm}^2$ 、鉄筋 $1,800\text{kgf/cm}^2$ ）を用いた。

着底時衝撃計算の結果、既設の円筒型魚礁に1m/sの落下速度で2層目の魚礁が衝突した場合に発生する衝撃力は約13.3tfとなった。したがって、実験再現ケースにおいて計算した形状は、限界強度に相当する評価基準を用いた場合、2層積施工に耐える強度を有する結果となる。これを、設計基準に基づいた評価基準で評価した場合、CASE-4.5、CASE-4.6の場合は、鉄筋塑性開始荷重が11.2tfとなり、現状の改良案でも衝撃荷重に対して強度不足となることが判明した。そこで、改良タイプIIの鉄筋をD10からD13（CASE-4.7）、D16（CASE-4.8）にした場合を計算した結果、CASE-4.7で鉄筋塑性開始荷重が14.4tf、CASE-4.8で19.2tfとなった。この結果より、設計基準に準拠した計算では、現状のD10をD13以上の鉄筋にすることが、安全性確保の条件となる。そこで、鉄筋全体を太くすることが、強度の増大に対して経済的である

か否かを検討する意味で、CASE-4.6において鉄筋が塑性した部分だけをD16 に変更したもの（CASE-4.9）と更に斜め筋を現状のD10 からD16 に変更したもの（CASE-4.10 ）について、解析を行った。その結果について、CASE-4.7を加えて表-2に示した。また、表-3には、CASE-4.6、CASE-4.7、CASE-4.9、CASE-4.10 に関する鉄筋量を示した。この結果から、CASE-4.9およびCASE-4.10 における鉄筋塑性開始荷重は15.2tfと同様の値を示し、CASE-4.7に比べて6%程度高い値を示した。また、鉄筋量に関しても、CASE-4.6と比較した場合は1.2および1.5倍の増加となるが、全鉄筋をD13 とするCASE-4.7との比較では、少ない鉄筋で同等以上の強度となっている。

### 3.3 設置に関する施工試験

現状の人工魚礁の設置は、クレーン船等の設置用重機を設置予定海域に電波測位機等により誘導し、アンカーを設置する。その上で、ワイヤーの操作により設置点に船を固定し、魚礁を設置している。問題は、吊り上げた魚礁が水中に入った段階で、手探り状態の中で海底まで降ろし、海底面等と衝突した時点で自動的にワイヤーが外れ、魚礁は海底に着底していることである。一般に、海洋工事で施設を計画的に施工する場合には、水中作業あるいは水中での誘導のため、潜水作業員を配置している。しかし、魚礁事業の場合には作業水深が深く、潜水時間に制約が大きいことが障害となって、現状のような施工となっていることが考えられる。

そこで、海底付近での既設魚礁との衝突や海底面での衝撃を緩和する目的で、水中での作業時間の制約が無い、水中テレビカメラを用いた施工を試みた。現状では、水中テレビカメラも無動力のものは、数十万円で手に入れることができるようになっており、設置された魚礁の20%に損傷が生じることを考えれば、非常に安価な対策となる。

実験は、山形県温海町沖合の天然礁（大瀬）近傍の水深65mの海域において実施した。

施工手順は、電波測位機で設置予定海域に250tクレーン船を誘導し、予め設置しておいた係船アンカーに前後2箇所係留、固定した。クレーンのフックにテレビカメラを固定し、映像送信用のケーブルはワイヤーと接触しないように作業員が誘導し、カメラの操作部と映像モニターをクレーンオペレーターの操縦席付近に設置した。カメラを取り付けた状態で、フックにワイヤーを取り付け、円筒型魚礁4基をまとめて吊り上げた。クレーン船の位置から、魚礁設置点に対するブームの水平・垂直角度は予め計算されており、この計算結果にしたがって、ブームを操作し、魚礁を海中に降ろした。この作業を3回行い、計12個の円筒型魚礁を海底に設置した。

最初の設置は、既設の大型魚礁を目標に設置し、2回目、3回目は最初に設置した魚礁にできるだけ近づけるように設置した。カメラからの映像は、水深30m付近までは、濁りの関係から不明瞭であったが、海底に近づくにしたがって明瞭となり、既設の魚礁を確認できた。また、既設の魚礁との間隔も、あらかじめ魚礁寸法が判っているため、ある程度把握することができた。また、目標物が視認できることによって、降下速度を低下させ、位置の確認や衝突の有無等を予測することができた。また、衝突した場合でも、降下速度が遅いため衝撃も小さく、再度上昇させた上でブーム角度を調整し、1m程度の精度で既設魚礁の近傍に設置できた。

## 4 考察

### (1) 円筒型魚礁の構造に関する提案

応力解析の結果、CASE-4.9が強度的にも経済的にも有効と考えられたことから、これを最終の改良案とした。新配筋案は、図-4.1および表-4のとおりである。

## (2) 円筒型魚礁の施工に関する提案

施工試験の結果から水中テレビを用いた設置工事は、衝突および衝撃力緩和に有効であることを確認した。問題点は、1回当たりの設置時間がこれまでに比べて長くなることによって、クレーン船の使用料と施工量の関係が成立するかどうかである。しかし、ここで実施した施工が普及した場合には、着底時の衝撃力を必ずしも設計荷重とする必要がなくなり、安全性主体の設計から機能を重視した設計に変わる可能性が出てきた。

## 5 適用

- ・ 魚礁本体の形状あるいは配筋等を損傷発生原因を究明し、改善することによって、ある程度の強度の強化を図ることができた。
- ・ 応力解析に関しても、実験結果を解析に取り込むことによって、実態に即した結果が得られるソフトを開発することができた。
- ・ しかし、今回行った構造の改良は、損傷原因の一部に対してのものであり、根本的な問題の解決につながるものではない。
- ・ 魚礁の損傷問題は、現状の施工方法に根本問題があり、今回試みとして実施した水中テレビを利用する設置手法は問題解決の糸口となるものと考えられる。
- ・ 今後の最大の課題は設計から施工にいたる一連の流れの抜本的な見直しを実施できるかどうかであり、魚礁の損傷を防止するためには早期の検討が望まれる。

## 参考文献

- 1) 青柳征夫：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの基礎的研究，セメント技術年俵，1965
- 2) 上田茂他：衝撃荷重を受けるRCおよびPCばりの変形と強度，港湾技研資料No.430，1982
- 3) 明田定満，高木儀昌他：角型魚礁の設計法に関する研究，日本水産工学会学術講演会論文集，1991
- 4) 高木儀昌他：角型魚礁の応力解析（その1解析手法の開発），日本水産工学会学術講演会論文集，1992
- 5) 高木儀昌他：角型魚礁の応力解析（その2角型魚礁の限界強度と設置速度），日本水産工学会学術講演会論文集，1992
- 6) 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針，1992

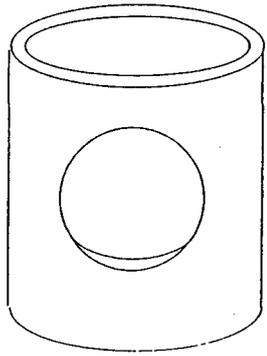


図-1.1 丸窓タイプ

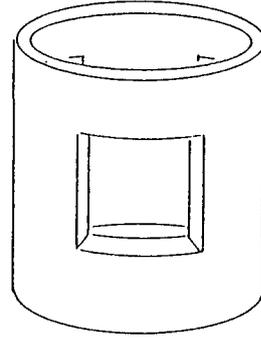
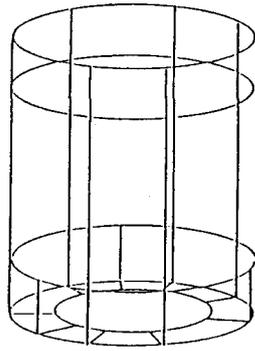


図-1.2 角窓タイプI

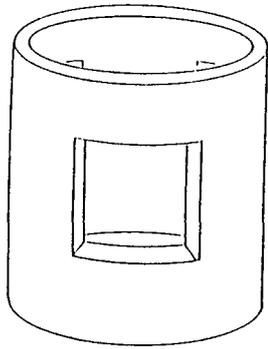
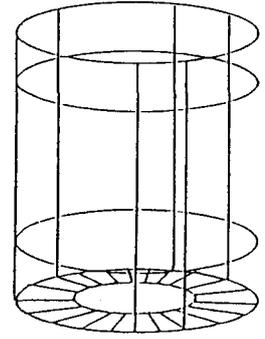


図-1.3 角窓タイプII

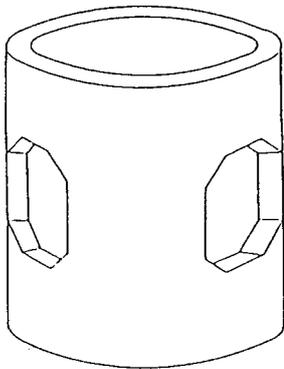
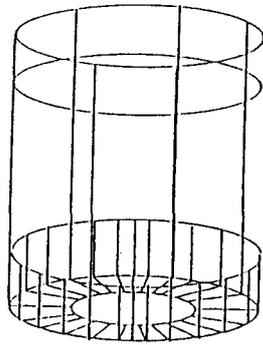


図-1.4 改良タイプI

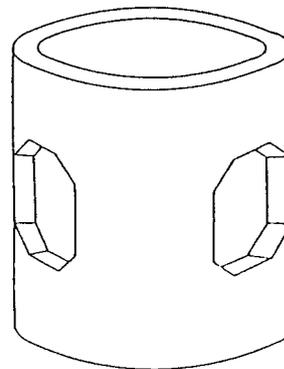
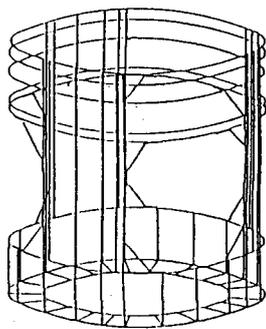


図-1.5 改良タイプII

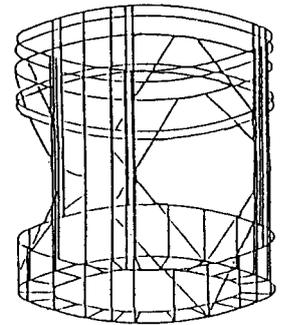


表-1 実験ケースのまとめ

CASE No.	実験名	目 的	モデル	円筒型魚礁タイプ
CASE-1.1	落下実験	底面着底時の衝撃力の把握	実機	角窓タイプII
CASE-1.2	//	側面着底時の衝撃力の把握	//	角窓タイプII
CASE-2.1	衝突実験	底面と側面上方衝突時の衝撃力の把握	//	角窓タイプII
CASE-2.2	//	底面と側面下方衝突時の衝撃力の把握	//	角窓タイプII
CASE-2.3	//	底面と側面上方衝突時の衝撃力の把握	//	丸窓タイプ
CASE-2.4	//	底面と側面上方衝突時の亀裂発生パターン	//	改良タイプII
CASE-3.1	衝撃実験	ハンマー側面上方衝突時の衝撃力の把握	//	角窓タイプII
CASE-3.2	//	ハンマー側面上方衝突時のひび割れ幅の把握	数値	角窓タイプII
CASE-4.1	応力解析	窓形状の影響検討	//	丸窓タイプ
CASE-4.2	//	同 上	//	角窓タイプII
CASE-4.3	//	実験モデルの補強効果の検証	//	改良タイプI
CASE-4.4	//	同 上	//	改良タイプII
CASE-4.5	//	鉄筋量の算定	//	改良タイプI, D10
CASE-4.6	//	同 上	//	改良タイプII, D10
CASE-4.7	//	同 上	//	改良タイプII, D13
CASE-4.8	//	同 上	//	改良タイプII, D16

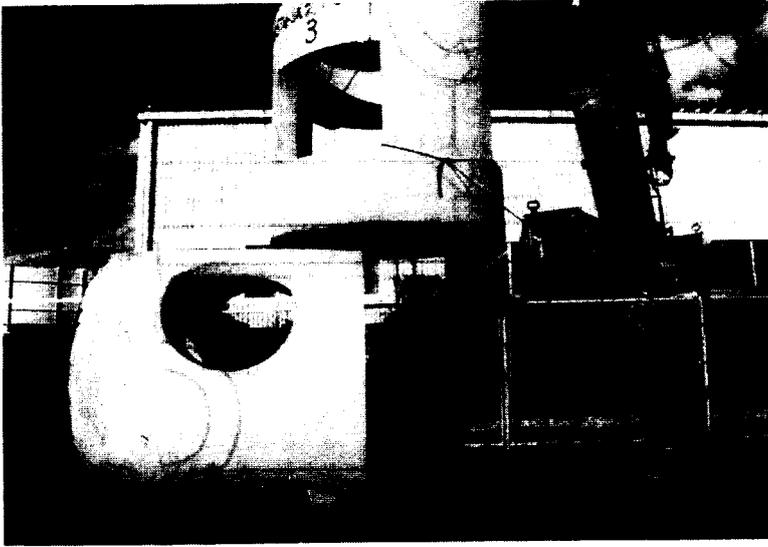


写真-1 衝突実験風景

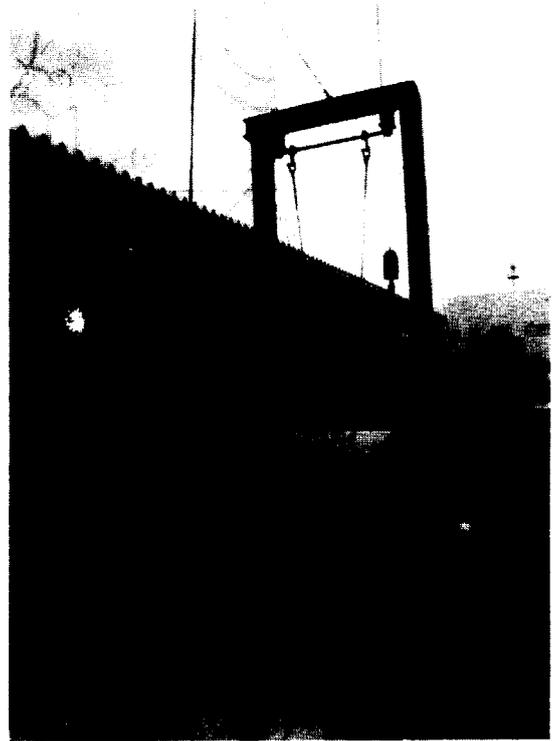


写真-2 衝突実験風景

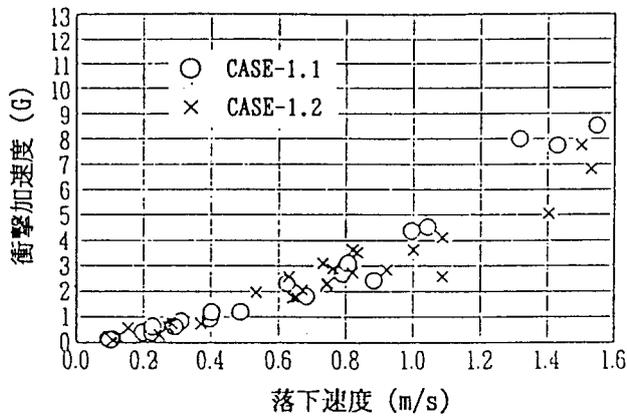


図-2.1 落下実験における落下速度と衝撃加速度の関係

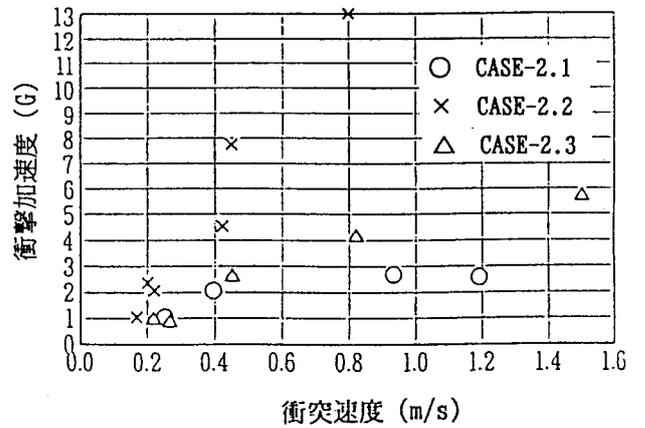


図-2.2 衝突実験における衝突速度と衝撃加速度の関係

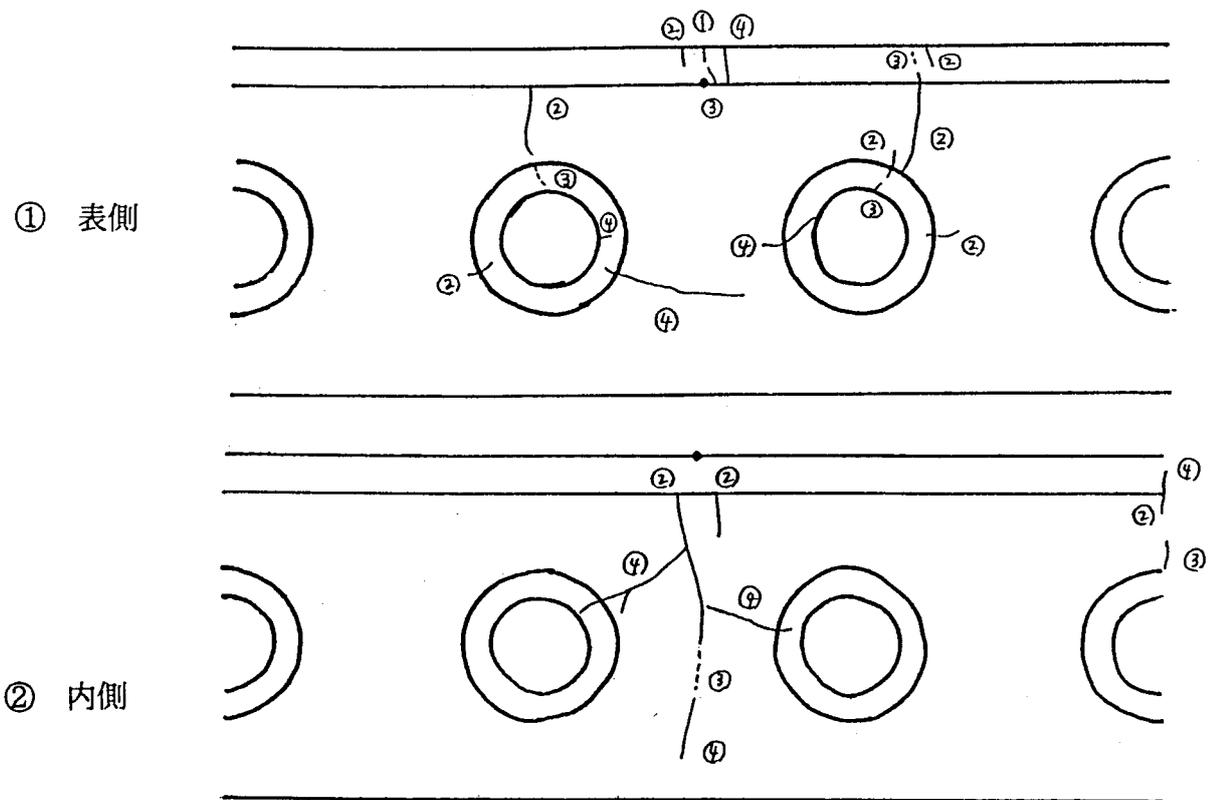


図-2.3 (1) 衝突実験における亀裂発生状況 (丸窓タイプ)

(数字はひび割れの順番。衝突回数は+1をする。・印は載荷点位置)

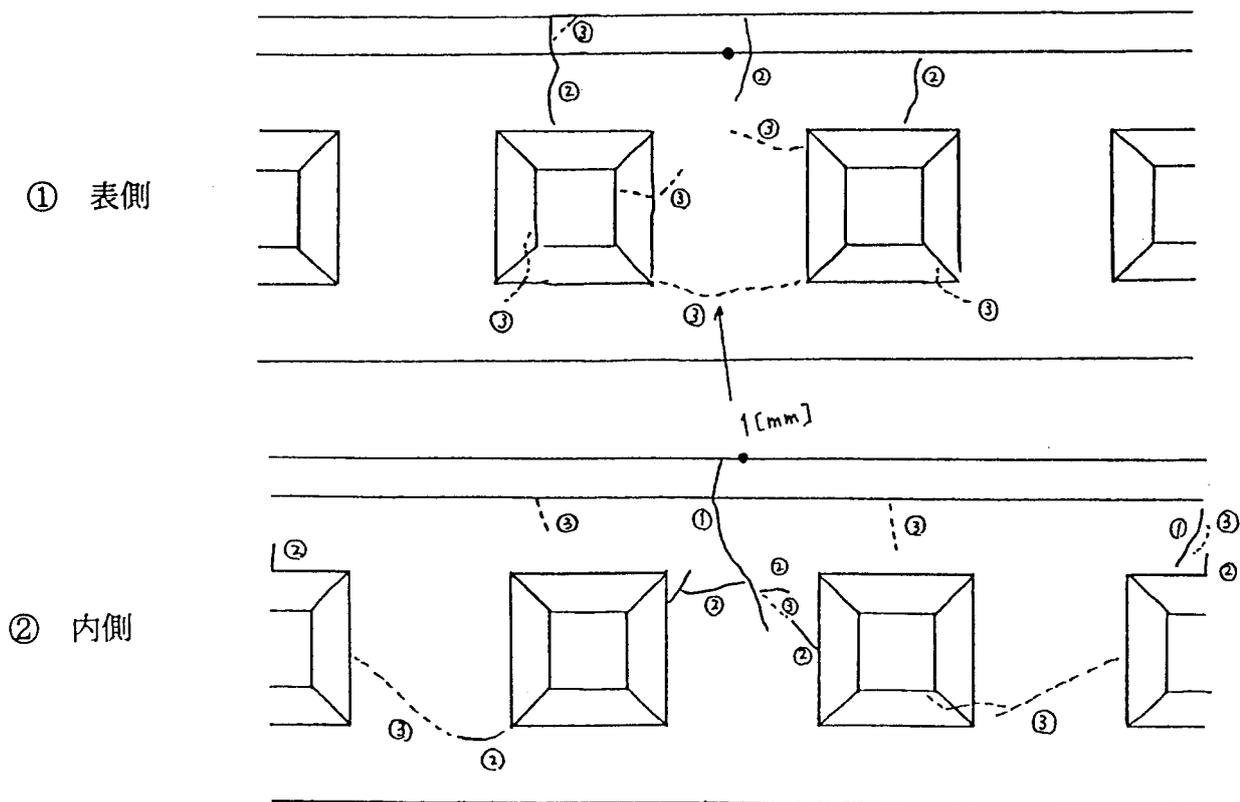
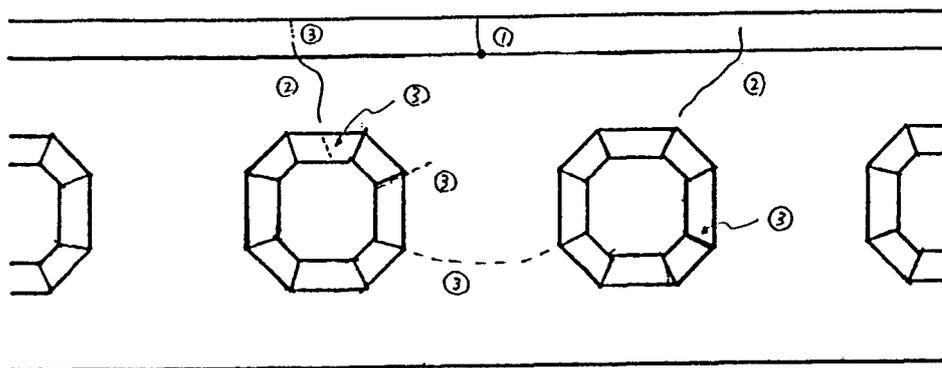


図-2.3 (2) 衝突実験における亀裂発生状況 (角窓タイプII)

(数字はひび割れの順番。衝突回数は+1をする。・印は載荷点位置)

① 表側



② 内側

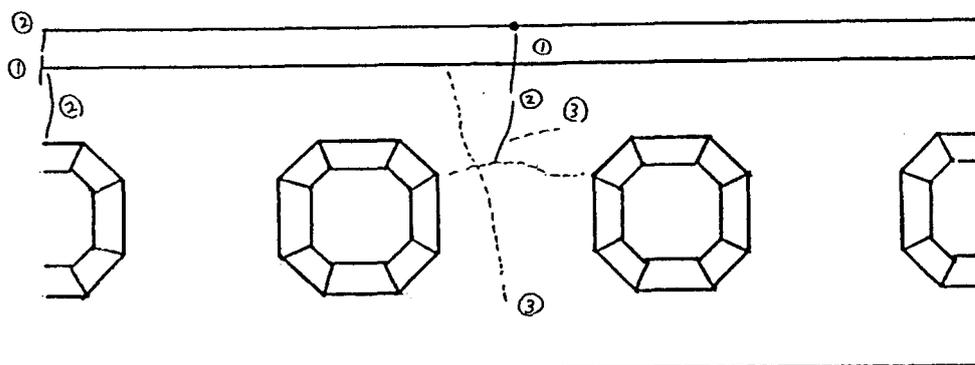


図-2.3 (3) 衝突実験における亀裂発生状況 (改良タイプII)

(数字はひび割れの順番。衝突回数は+1をする。・印は载荷点位置)

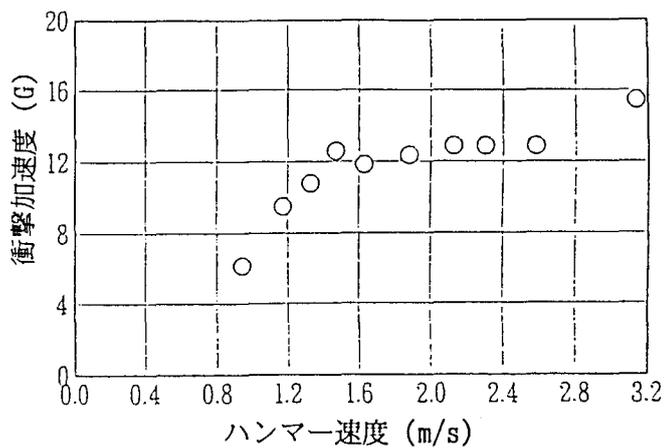


図-2.4 衝撃実験におけるハンマー速度と衝撃加速度の関係

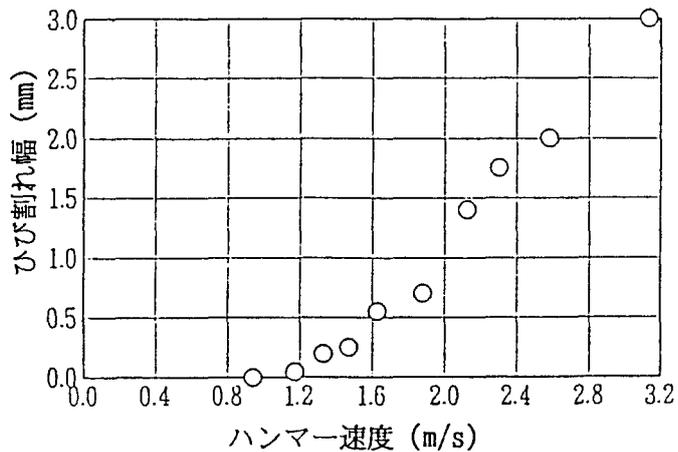


図-2.5 衝撃実験におけるハンマー速度とひび割れ幅の関係

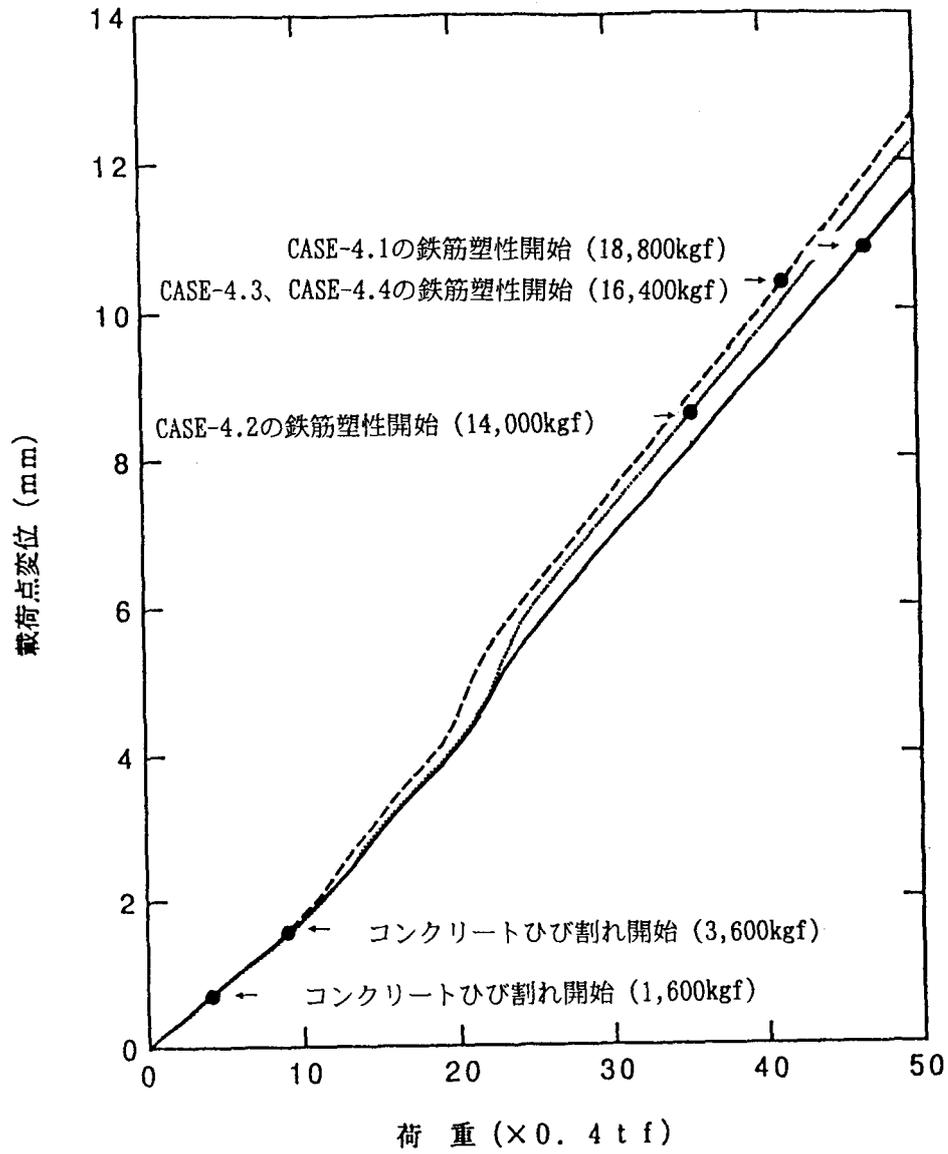


図 6 荷重—変位特性 (実験再現ケース)

表-2 配筋設計検討結果

ケース名	型式	使用鉄筋径	コンクリートクラック発生	鉄筋塑性開始
CASE-4.7	改良タイプII	D13	1.6 tf	14.4 tf
CASE-4.9	改良タイプII	D10+D16 (塑性部分のみ)	1.6 tf	15.2 tf
CASE-4.10	改良タイプII	D10+D16 (斜め筋全部)	1.6 tf	15.2 tf

表-3 鉄筋数量の比較

ケース名	仕様鉄筋径	総鉄筋量	比率
CASE-4.6	D10	48.51kg	1.0
CASE-4.7	D13	85.77kg	1.8
CASE-4.9	D10+D16 (塑性部分のみ)	59.25kg	1.2
CASE-4.10	D10+D16 (斜め筋全部)	73.85kg	1.5

表-4 新配筋案における使用鉄筋数量

横筋①	5,439mm × 4本	21.75m
横筋⑧(D16)	5,439mm × 2本	10.87m
底部内側②	4,120mm × 1本	4.12m
縦筋③	1,860mm × 12本	22.32m
縦筋④	560mm × 9本	5.04m
縦筋⑤	1,300mm × 6本	7.80m
斜筋⑥	1,152mm × 6本	6.91m
斜筋⑦	1,301mm × 6本	8.80m
D10計		75.74m
D16計		10.87m
総鉄筋延長		86.61m
鉄筋重量(D10)	75.74m × 0.56kg/m	42.41kg
鉄筋重量(D16)	10.87m × 1.55kg/m	16.84kg
総鉄筋重量		59.25kg

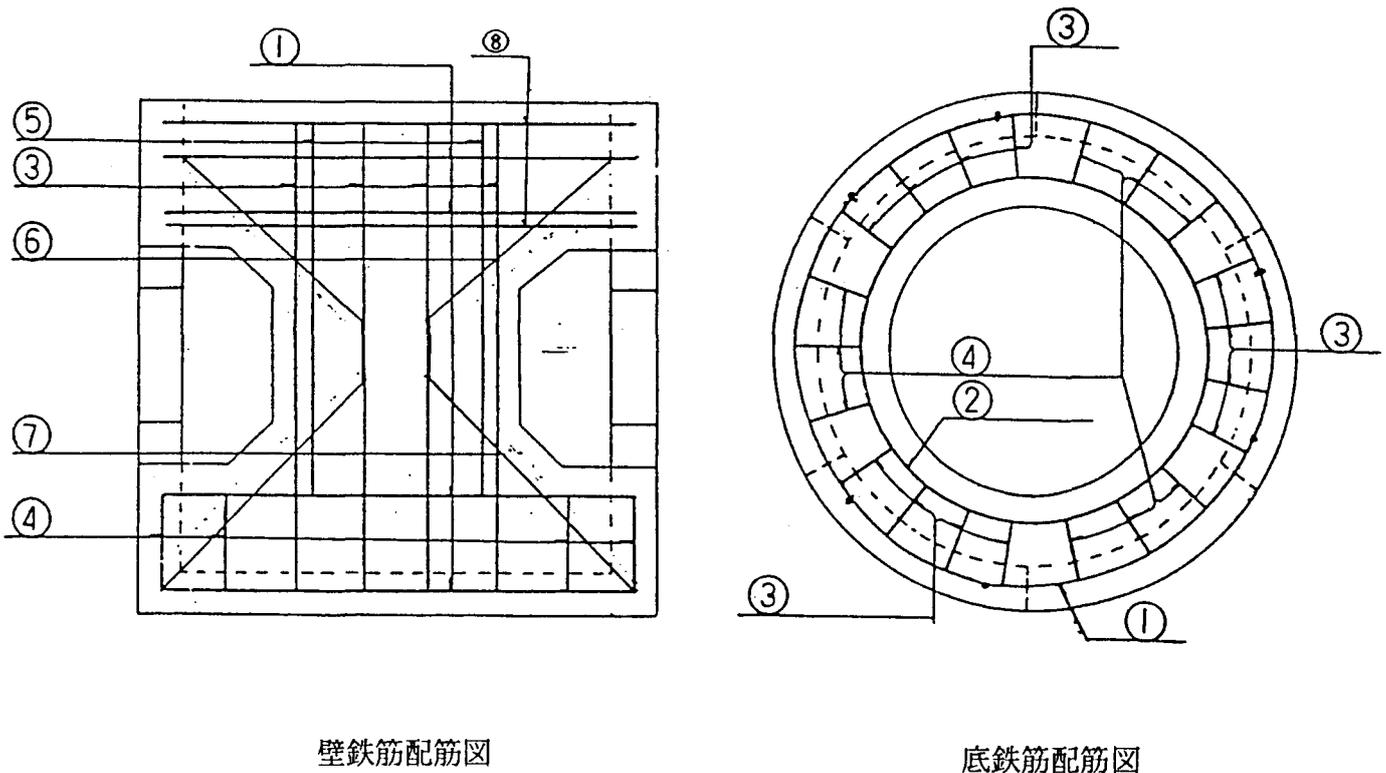


図-4.1 新鉄筋配筋案