

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.44 NO.1 March 2005

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 44 卷 第 1 号 (Vol. 44, No. 1), 2005年3月 (March 2005)

目 次 (CONTENTS)

1. 内湾干潟海域における 3次元凝集性土砂輸送およびそれに伴う地形変動のモデリング
.....内山 雄介 3
(Modeling three-dimensional cohesive sediment transport and associated morphological variation in estuarine intertidal mudflats
..... Yusuke UCHIYAMA)
2. 長周期波対策護岸構造の最適化に関する検討
.....平石 哲也23
(Optimization of Long Period Wave Absorbing Sea Wall
..... Tetsuya HIRAISHI)
3. 消波ブロックによるケーソン壁面押し抜きせん断破壊に関する研究
.....有川 太郎・池辺 将光・大寄 菜々子・黒田 豊和・
織田 朋哉・下迫 健一郎43
(Study on punching shear failures of caisson wall caused by the impulsive force of dissipating blocks
..... Taro ARIKAWA, Masamitsu IKEBE, Nanako OSAKI, Toyokazu KURODA,
Tomoya ORITA, Kenichiro SHIMOSAKO)

消波ブロックによるケーソン壁面押し抜きせん断破壊に関する研究

有川 太郎*・池辺 将光**・大嵯菜々子***・黒田 豊和****・織田 朋哉*****・
下迫健一郎*****

要 旨

消波ブロック被覆堤において、ケーソン壁に穴あき等の局所破壊が生じており、そのメカニズムのひとつとして消波ブロックの衝突による押し抜きせん断破壊が考えられている。しかし、ブロックによる衝突力の算定方法や押し抜きせん断破壊の判定方法は明らかではない。そこで、本研究では、それらの手法の提案、および穴あき被災対策の提案を目的として、大規模な実験を行った。

はじめに、質量 0.5t の消波ブロックを用いたつり下げ衝突実験を行い、衝突速度と衝突力との関係から衝突力算定式を提案した。そのうえで、実際に現地で起きていると想定される衝突パターンとしてロッキング・転落・水平移動という3つを取り上げ、それぞれの衝突力を測定し、衝突速度ならびに波浪条件との関係から、その算定方法を検討した。

次に、衝突力と押し抜きせん断破壊との関係を調べるために、5t ブロックおよびコンクリート壁面を用いた衝突破壊実験を行った。そして、ひずみの測定結果ならびに破壊状況の観察により、静的な押し抜きせん断耐力を用いて、破壊判定を行う妥当性を確認した。それを基にして現地に適用し、消波ブロックによる被災の可能性を検討した。

最後に、ゴムによる緩衝効果やコンクリートの圧縮強度を上げることによる効果を実験により検討し、その効果に基づいて、対策方法とその経済性を論じた。以下に本研究での結論をまとめる。

1. 消波ブロックによる衝突力の算定式を提案した。重心位置での速度を用いることで、ロッキングや転落といった回転運動による衝突に対しても適用可能であることがわかった。
2. ケーソン壁面の押し抜きせん断破壊は、押し抜きせん断耐力式を用いて判定することが可能であることを確認した。
3. 現地被災事例に本研究の手法を適用したところ、消波ブロックによる押し抜きせん断破壊の起こりうる可能性があることがわかった。
4. ゴムの緩衝効果に対する実験結果より対策方法を検討した結果、局所的なゴムの使用により衝突力の低減が期待できることがわかった。

キーワード：せん断押し抜き破壊、ケーソン、衝突力、消波ブロック、局所破壊

* 海洋・水工部主任研究官

** 海洋・水工部耐波研究室研修生

*** 海洋・水工部耐波研究室

**** 九州地方整備局関門航路事務所（元 海洋・水工部耐波研究室）

***** シバタ工業株式会社（元 海洋・水工部耐波研究室 研修生）

***** 海洋・水工部耐波研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail：arikawa@pari.go.jp

Study on punching shear failures of caisson wall caused by the impulsive force of dissipating blocks

**Taro ARIKAWA¹, Masamitsu IKEBE², Nanako OSAKI³, Toyokazu KURODA⁴,
Tomoya ORITA⁵, Kenichiro SHIMOSAKO⁶**

Synopsis

A caisson breakwater covered with wave dissipating blocks is one of the typical breakwaters in Japan. Wave forces can reduce by the blocks, but the impulsive forces by the collision of the blocks occasionally cause the damage of caisson walls. In this study, a series of large scale model experiments have been carried out to evaluate the impulsive forces caused by the blocks, to investigate the countermeasure, and to propose the design method of the caisson wall.

The collision forces against the wall produced by the swing of the pendulum of the 0.5 ton concrete block were measured with a load cell, and the calculation formula to evaluate the forces from the velocity of block was proposed according to the experimental results. The effect of rubber plate attached in front of the wall to reduce the collision forces was also investigated.

Then the collision forces by the actual movement of the blocks induced by waves were measured by the large scale hydraulic model experiment. Three collision patterns, which are rocking motion, falling down, and horizontal movement, were assumed and reproduced in the experiment. The proposed calculation formula was proved to be applicable to actual collision patterns by estimating the velocity of the block at the center of gravity.

Collision experiments by the swing of the pendulum and hydraulic experiments were also conducted using the prototype concrete walls and 5 ton concrete block in order to examine the punching shear failure mechanism of concrete walls. The results of strain measurements and the damage observations indicated that the static punching shear strength can be applied to judge the possibility of the low speed punching shear failures.

From an economical standpoint, increasing the thickness of the caisson wall is one of the most effective countermeasures to improve the static punching shear strength.

Keyword: punching shear failure, caisson wall, collision, impact load, wave dissipating block, local damage

1 Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

2 Trainee, Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department

3 Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department

4 Kyushu Regional Development Bureau (Former Maritime Structures Division)

5 Shibata Industrial Co., LTD. (Former Trainee, Maritime Structures Division)

6 Head, Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Japan 239-0826

Tel: 0046-844-5043 Fax : 046-842-7846 e-mail : arikawa@pari.go.jp

目次

第1章 はじめに	47
第2章 被災事例と既往の研究	47
2.1 穴あき被災事例	47
2.2 想定される衝突パターン	50
2.3 コンクリート版の押し抜きせん断破壊に関する研究	52
2.4 物体の衝突力に関する研究	54
2.5 本研究の目的	54
第3章 ブロック衝突荷重測定実験	56
3.1 つり下げ衝突実験	56
3.2 ロッキング衝突実験	58
3.3 転落衝突実験	61
3.4 衝突荷重の算定方法の提案	62
第4章 コンクリート版破壊実験	66
4.1 実験模型および測定項目	66
4.2 吊り下げ衝突実験	67
4.3 ロッキング衝突実験	74
4.4 転落衝突実験	75
4.5 破壊判定の現地適用	77
第5章 局所破壊に対する設計へのアプローチ	78
5.1 ブロック衝突力と壁厚の関係	78
5.2 穴あき被災の軽減に対する一考察	79
5.3 設計手法に対するアプローチ	82
第6章 まとめ	83
参考文献	83

第1章 はじめに

1980年頃より、大型のブロックが用いられている消波ブロック被覆堤において、ケーソン壁に穴や亀裂という局所破壊が生じる被災数が多くなっている。これらの被災のうち、消波ブロックの脚が開孔部に陥入しているケースの占める割合が多いことから、その被災原因は、ブロック重量の増加に伴うブロック荷重の増大と考えられる。また、被災によりケーソン構造の崩壊までは到らないものの中詰め砂の流出を生ずることがあり、防波堤の滑動安定性の低下につながっている。こうしたことから、今後、消波ブロックの設置に際し、特に大規模な消波ブロックを用いる際には、ブロックの安定性だけでなく、ブロック荷重を考慮するべきであると考えられるが、これまでのところブロック荷重の算定方法について十分に確立されているとは言い難い。

そこで、本研究では、質量0.5tの消波ブロックを用いた衝突力測定実験、ならびに5tブロックを用いたコンクリート版衝突破壊実験を通して、衝突力の算定方法ならびに、破壊の判定方法を検討することとした。さらに、ゴムの緩衝効果を含めた穴あき被災対策についても検討した。

本論文の構成は以下のようになっている。

第2章において被災事例と既往研究のレビューを行った。被災事例から衝突パターンを想定し、それぞれについて文献調査を行った。また、これまでのコンクリート版に対する破壊に関する研究ならびに、物体の衝突力に関する研究の調査を行った。

第3章では、消波ブロックの衝突荷重を測定する実験を行った。想定された衝突パターンに基づいて、実験水路内にて、それぞれを人工的に創造し、衝突荷重を測定した。消波ブロックには、0.5t型テトラポッドを用いた。

第4章では、第3章と同じ衝突パターンに基づき、実際に厚さ18cmのコンクリート版と5tの消波ブロックを用いて、衝突破壊実験を行った。

第5章では、ゴムや中詰め砂の緩衝効果を、実験を通して検討を行った。また、ブロック荷重の算定方法ならびに、設計の考え方についての考察を行った。

第2章 被災事例と既往の研究

2.1 穴あき被災事例

(1) 防波堤ケーソン壁の局所破壊について

防波堤ケーソン壁の局所破壊(写真-2.1)については、高橋ら(1998)によりまとめられており、その主な原因は衝撃砕波および消波ブロックの衝突によるものであることが報告

されている(表-2.1)。

表-2.1 ケーソン壁の破壊原因

—	衝撃砕波力(高マウンド, 急勾配, 消波工端部)
	消波ブロックの衝突(消波工端部, 消波工沈下)
	その他(ケーソンの衝突, 蓋コンの破壊等)

衝撃砕波に関しては、多くの研究がなされており、高橋ら(1992)による衝撃砕波力係数を用いて、その影響を設計に反映している。衝撃砕波力による破壊ではケーソン壁の壁面全体が破壊することもある。つまり、衝撃砕波力による破壊形態は、衝撃曲げ破壊であると考えられる。一方で、消波ブロックの衝突によるケーソン壁の破壊は、消波ブロックの脚先とケーソン壁との局所的な衝突によるもので、破壊時の形態は、コンクリートが押し抜かれたような現象となり、押し抜きせん断破壊と呼ばれる(図-2.1)。

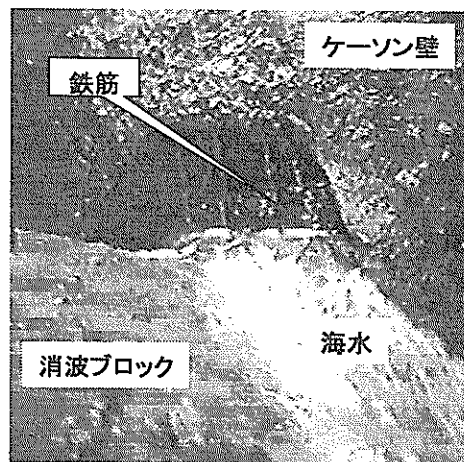


写真-2.1 穴あき被災事例

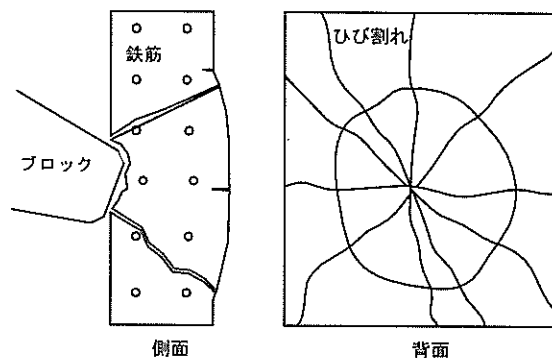


図-2.1 押し抜きせん断破壊の模式図

(2) 穴あき被災事例

1946年からこれまでに発生した消波ブロック被覆堤における穴あきおよびひび割れの主な被災事例を表-2.2に示す。

表-2.2 消波ブロック被覆堤におけるケーソン壁被災事例

施工状況	被災年月日	被災時期	気象	側壁厚(m)	消波BL	波高 $H_{1.3}$ (m)		周期(S)		被災状況
						設計	被災時	設計	被災時	
1965	1966.3.5 ~6	半年	低気圧	0.4	8t	5.5	4.0	11.0		・多数のケーソンに亀裂。1函崩壊。 ・消波BL散乱。
1975	1980.10.2 5~27	5.5年後	低気圧	0.4	25t	6.5	6.5	12.0	12.2	・ケーソン前壁に穴。中詰砂流出。
施工中	1981.8.1 ~2	施工中	台風10号	0.5	50t	9.5	7.2	16.0	13.0	・ケーソン4函移動。内1函に損傷。 ・被覆石隆起。消波BL天端が0.5m低下。5個破損。
施工中	1981.8.23 ~24	施工中	台風15号	0.4	32t	6.3	5.9	15.0	9.9	・ケーソンに穴1mの穴。中詰砂流出。
1981	1986.8.25 ~26	約5年後	台風13号	0.5	50t	8.2	12.3	16.8	16.8	・根固BLおよび消波BLが飛散、破壊。基礎捨石洗堀流出。 ・ケーソン移動、上部工破損。
1986	1987.8.30 ~31	約1年後	台風12号	0.4	50t	8.0	10.0	12.0	12.9	・ケーソン本体が滑動、破損。 ・消波BL散乱、破壊。
施工中	1990.7.6	施工中	台風2号	0.4	12.5t	5.8	4.8	10.0	9.0	・ケーソン4函移動。うち2函に亀裂。 ・被覆石および消波BL散乱。
1990	1991.2.15 ~18	約1年後	冬季風浪	0.5	64t	7.9	19.1	12.0	13.7	・ケーソン4函破損。4箇所滑動。上部工破損。 ・消波工散乱、破損。
1985	1991.2.16 ~17	約6年後	冬季風浪	0.4	50t	5.3	8.7	13.0	11.4	・ケーソン7函移動。内3箇所滑動。ケーソンに破損あり。 ・消波BL散乱破損。基礎工、被覆工、根固工散乱。
1985	1991.2.16 ~17	約6年後	冬季風浪	0.65	40t	6.9	9.9	13.0	13.4	・ケーソン8函移動。内2函に穴あき。1函沈没。 ・消波BL散乱。
1994	1993.10~ 1994.3	1ヶ月後		0.4	50t	7.5	7.7	12.4	11.3	・ケーソン壁に穴。
施工中	1996.9	施工中	台風17号	0.4	32t~ 64t	8.0	7.4	12.0	12.0	・ケーソン滑動破損。中詰砂流出。 ・消波BL散乱。
1997	1996.8.14	1ヶ月後	台風12号	0.5	80t	11.5	6.3	16.0	10.4	・ケーソン壁に穴。中詰砂流出。
1986	1997.8.17	約11年後	台風13号	0.5	50t	12.2	8.3	15.8	12.0	・根固BLが飛散。ケーソン壁損傷。防波堤網罟。 ・消波BLと上部コンクリートの一部も破損。
施工中	2000.9.12 ~13	施工中	台風14号・15号	0.5	80t	11.5	3.1	16.0	11.6	・消波BL沈下移動、ケーソン壁破損。

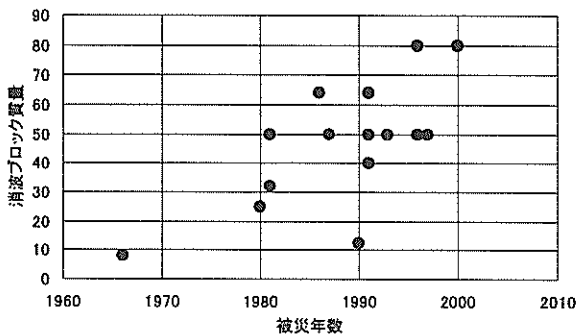


図-2.2 消波ブロック重量と被災年代との関係

表より、消波ブロック重量と被災年代との関係を図-2.2に示す。これを見てもわかるように、1980年頃より、重量50トンを超える大型消波ブロックによる壁面破壊の事例件数が増加している。1990年に、12.5t型の小さいブロックによる被災もあるが、これは、ケーソン壁の亀裂にとどまっていることから、穴あきのようなケーソンの機能損失につながるような被災は、大型ブロックによるものが多いことがわかる。また被災が発生する時期については、表からもわかるように防波堤が完成してから時間が経過していないことが多い。表から、施工中から1年程度の件数は、15件中10件となっている。また、エラー! 参照元が見つかりません。に被災場所を示す。それを見ると、全国で被災が生じており、特定の場所だけの問題ではないことがわかる。

2つの事例における被災状況を簡単にまとめる。まず、K港における被災例では、ケーソン壁に穴があき鉄筋が露出していた。ケーソンの高さは-10.0m~-13.0mで、ケーソンは基準面より-7.0m~-10.0mのマウンド上に設置されており、前面には32t~64t型の消波ブロックが設置されていた。穴あきが確認されたケーソンは15函、コンクリートが剥離し鉄筋が露出していたケーソンは4函で、主に設計波高の高いところで穴あきが発生していた。

また水深方向に対する穴あき位置について、基準面より+0.5m~-6.0mと幅広く、穴あきの大きい消波ブロックの脚先とほぼ等しいものであり、穴あき被災の原因については、消波工に不連続部分がありそこで衝撃的な波力が発生し、消波ブロックがケーソン壁に衝突したと考えられる。

次に、H港における被災例では、穴あき部分に消波ブロックが接触しており、穴あきが確認されたケーソンは15函、鉄筋の露出が確認されたケーソンは5函であった。ケーソンの高さは13.5m~14.5mで、基準面より-11.0m~-12.0mのマウンド上に設置され、前面には40t~50t型の消波ブロックが設置されていた。図-2.3は、1ケーソンの断面を示す。

穴あきの水深発生位置は基準面より+1.3m~-2.5mと水面付近に発生していた。また穴あきの大きさはK港同様消波ブロックの足先の大きさにほぼ等しいものであった。図-2.4に穴あき位置の例を示す。

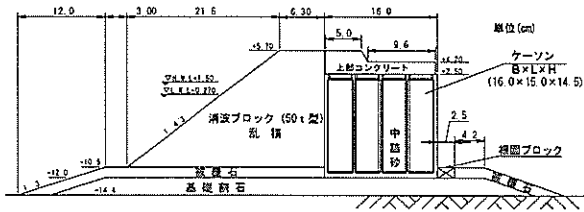


図-2.3 H港中央防波堤断面図

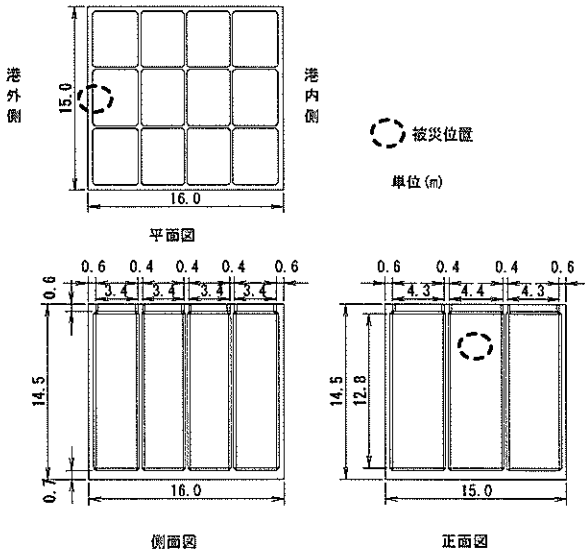


図-2.4 ケーソン壁穴あき位置の例

図-2.5 に各港別の穴あき被災の発生位置と、その件数を度数分布にし、さらに、それらを合計したものを図-2.6 に示す。これを見ると明らかなように、基準面付近に被災が多く発生していることがわかる。

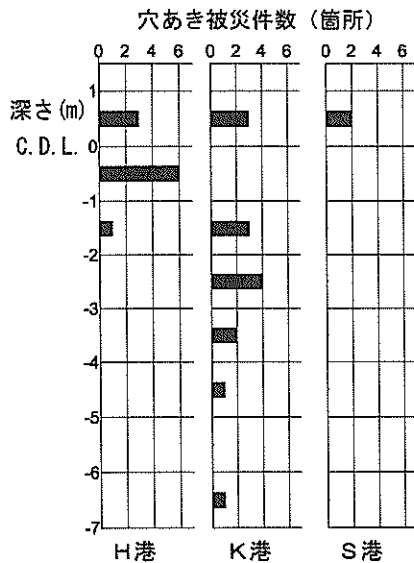


図-2.5 各港別穴あき位置と件数

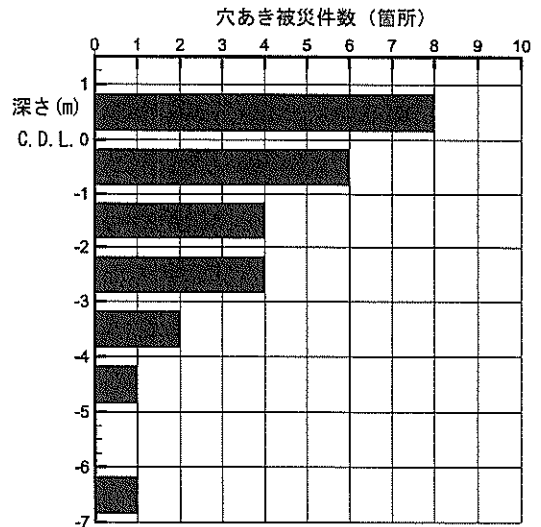


図-2.6 穴あき位置と件数 (全体)

なお、K港では、かなり深い位置まで被災が生じているが、施工中であったこともひとつの原因と考えられる。

これらのことから、

- ・ 静水面付近で穴あき被災が発生しやすいこと
- ・ ブロック重量が大きい場所で発生しやすいこと
- ・ 施工直後や、施工中のブロックが、かみ合わせの緩い状態のときに発生しやすいこと

が読み取れる。そこで、これらの事例をもとに、衝突パターンとして想定されるものを次項で説明する。

(3) 壁厚について

穴あき被災が生じているケーソン壁厚は0.4~0.5mがほとんどである。図-2.7 は消波ブロック被覆堤のケーソン壁厚について直轄港湾において調べたものであるが(国土総合技術研究所・港湾施設研究室より提供データ)、ほとんどの港湾において0.4~0.5mの壁厚になっていることがわかる。

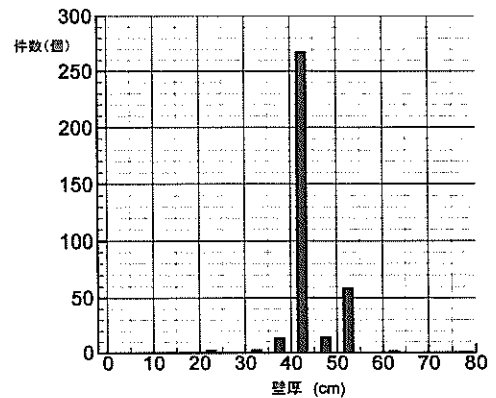


図-2.7 直轄港湾における消波ブロックの壁厚

また、壁厚と最大波高との関係を図-2.8 に示す。これを見ると壁厚と波高との関係はみられない。消波ブロックの重量は、波高に比例することを考えると、消波ブロックの大きさに依存していないことがわかる。

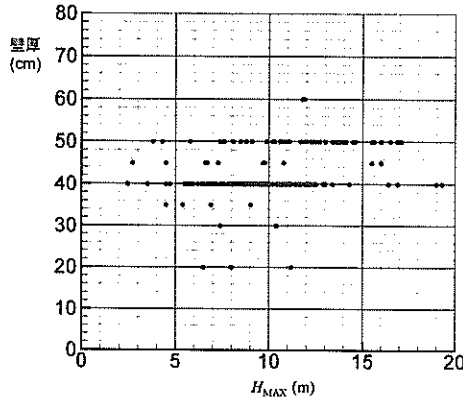


図-2.8 壁厚と最大波高の関係

2.2 想定される荷重の分類

消波ブロックがケーソンに及ぼす荷重は、消波ブロックが集合体で作用する荷重と、単体で衝突する荷重に分けられる。

集合体での荷重は、消波ブロックは常にケーソンに対し寄りかかっている状態で、ケーソンが波によってロッキングすることによって生ずると考えられる。

消波ブロックが単体で衝突する場合は、消波ブロックが前後に繰り返し回転運動を行うロッキング衝突、隙間にブロックが転落する転落衝突、上段付近の消波ブロックが波力により水平に移動する水平移動衝突の3パターンに分類できる。

(1) 集合体での荷重

消波ブロックがケーソンに寄りかかる水平荷重(図-2.9)は、廣本ら(1983)、島田(1984)、田中ら(1985)、高橋ら(1990)、小林・三浦(1998)により調べられている。

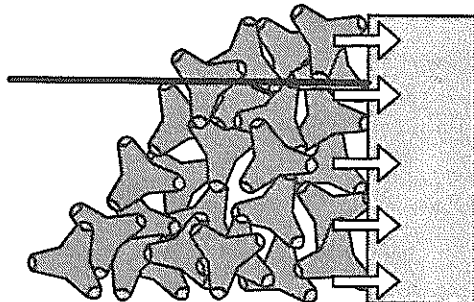


図-2.9 寄りかかる消波ブロックの水平荷重

ケーソンに寄りかかる水平荷重 F_B は、静水時のブロック荷重 F_{BS} と波作用時の変動値 F_{BD} を用いて

$$F_B = F_{BS} + F_{BD} \quad (2.1)$$

で表される。

廣本ら、島田、高橋らは、静水時のブロック荷重を求めるのに、土圧理論を適用し、

$$F_{BS} = K_S \left\{ \rho_r g (1 - \varepsilon) (h' + h_c)^2 - \rho_w g (1 - \varepsilon) h'^2 \right\} / 2 \quad (2.2)$$

とした。ここに、 K_S : 土圧係数に相当する係数

ρ_r : ブロックの単位体積質量 (2.3 t/m³)

ρ_w : 水または海水の単位体積質量

ε : ブロックの空隙率 (50%), g : 重力加速度

h' : ケーソン基面水深, h_c : 天端高

である。一方で、田中らは、寄りかかり荷重に影響するブロックの領域を仮定し、その領域内におけるブロック群重量はケーソンからの水平力ならびに、影響ブロック領域の境界面での反力により支えられているとして、

$$F_{BS} = W_a \cot(\theta + \phi_a) + W_w \cot(\theta + \phi_w) \quad (2.3)$$

とした。ここに、

W_a, W_w : 荷重影響領域内の空中部および水中部のブロック全重量

θ : 鉛直面と境界面のなす角度 (15度)

ϕ_a, ϕ_w : 静止時内部摩擦角 (実験より 25.9, 20.6度)

である。

波作用時には、ケーソンのロッキング滑動が生じるために、その荷重は変動する。波力が最大のときには、ケーソンがブロックから離れ主働状態となり、波が引いたときには、ケーソンが元の位置に戻るために、静止状態もしくは、多少の受働状態になると考えられる(図-2.10)。

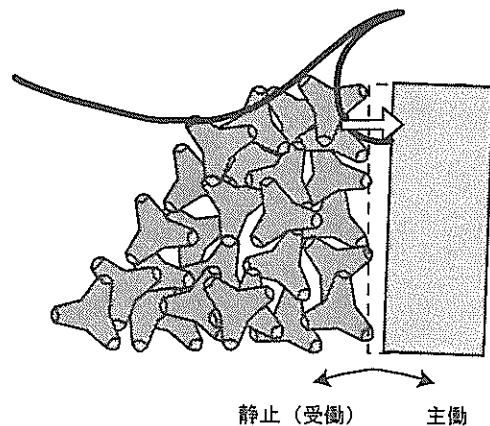


図-2.10 ケーソンのロッキング滑動に伴うブロックの水平荷重の変動

しかし、実験の結果より、波が引いたときの受働状態によるブロック荷重の増大が問題になったことはなく、波力がピーク時におけるブロック荷重の低減に焦点がおかれ、

$$F_{BD} = -\alpha_B F_{FP} \quad (2.4)$$

としている。ここで、 F_{FP} はブロックの間隙から作用する波

力、 α_B は比例定数を表している。

各研究における K_S ならびに α_B 値を表-2.3 に示す。

表-2.3 K_S ならびに α_B 値

	K_S	α_B
廣本ら(1983)	0.63	0.5程度
島田(1984)	0.42~0.66	0.68
田中ら(1985)	—	0.4
高橋ら(1990)	0.77	0.7程度

表より、大きな違いがないことがわかる。なお、高橋らの K_S 値が他と比較して大きいのは、ブロックの波による締め固まり具合によるとしている。また、ブロックがあまり締め固まっていない場合は、ブロックの変位が大きいことから、波作用時のブロック荷重の減少量が小さくなり、 α_B 値も小さくなることを指摘している。

(2) 単体での衝突

特に、ブロックの締め固まりが進行していないときには、ブロック単体で、大きな移動速度をもってケーソン壁に衝突することが考えられる。そこで、回転しつつ衝突するものと水平に移動しながら衝突するものに向け、単純な動きに模式化したものを図-2.11 から図-2.13 に示す。ここでは、その代表例として、ロッキング衝突、転落衝突、水平衝突を示すこととする。

a) ロッキング衝突

消波ブロックのかみ合わせの程度によっては、ブロックが不安定な状態となる。このとき、水位の上下変動や水塊の衝突によって消波ブロックが前後に短い距離の回転運動を起こすことがある。このとき、消波ブロックと壁面の位置関係によっては、その都度、衝突することになる。このような衝突をロッキング衝突と呼ぶ(図-2.11)。

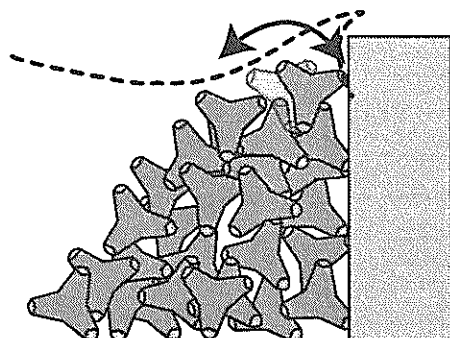


図-2.11 消波ブロックのロッキング衝突

b) 転落衝突

吸い出し現象による消波ブロックの沈下やケーソンの滑動

などにより、一時的に消波ブロックとケーソンの間に隙間が生じた場合、その隙間にブロックが転落するということが考えられる。この衝突挙動を転落衝突とする(図-2.12)。

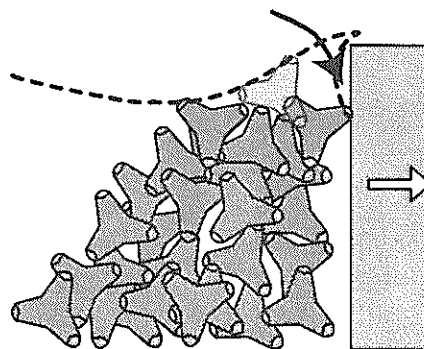


図-2.12 消波ブロックの転落衝突

c) 水平移動衝突

転落衝突と同様に、吸い出し等の影響により消波ブロックが全体的に沈下すると、ケーソンに不完全被覆状態の場所が生じる。完全被覆状態と比較すると、消波ブロック天端上で砕波することが多くなると考えられる。そのようなときに高波浪が来襲すると、ブロックの積み方によっては最上段の消波ブロックが水平方向に走るような移動をされると考えられる。このような衝突挙動を水平移動衝突とする。転落衝突との違いは、回転支点をもつかどうかであり、衝突する点の速度と重心位置での速度が異なる場合とする(図-2.13)。

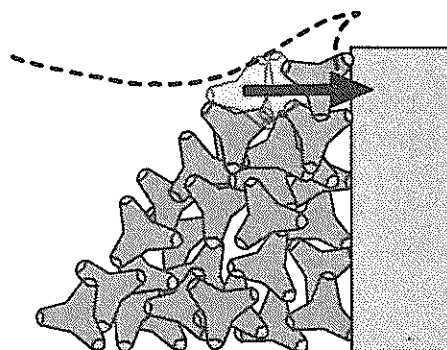


図-2.13 消波ブロックの水平衝突

(3) 衝突パターンの分類

衝突パターンをまとめると、表-2.4 のようになる。

表-2.4 荷重の分類

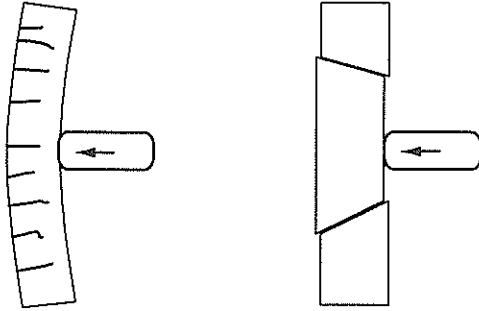
	荷重の形態	備考
集合体	寄りかかり	ケーソンロッキング滑動に伴う荷重の変化
単体	回転移動	ロッキング・転落
	剛体移動	水平移動

単体の衝突に関しては、既往の研究がないことから、その荷重の求め方等が必要となる。

2.3 コンクリート版の押し抜きせん断破壊に関する研究

(1) 衝撃荷重を受ける版の破壊状況

図-2.14は、ソフトな衝撃荷重下でみられる破壊モードを示したものであり(土木学会構造工学委員会, 1994), 降伏線の形成によるコンクリート版の全体的曲げ破壊モードおよび押し抜きせん断破壊モードの2つとなる。



全体曲げ応答 押し抜きせん断破壊
図-2.14 ソフトな衝撃に対する破壊モード

また、静的荷重下では、押し抜きせん断耐力のほうが、曲げ耐力よりも大きくなるが、衝撃作用を受けるコンクリート構造物では、載荷速度の増大とともに、押し抜きせん断破壊が生じやすくなることがわかっている。したがって、最初は曲げ破壊先行であったものが、載荷速度を漸増させていくと、ある載荷速度を超えると押し抜きせん断破壊のほうが生じやすくなることになる。

(2) 静的な荷重による押し抜きせん断耐力

a) 角田らの実験

コンクリート版の押し抜きせん断破壊の耐力について、角田ら(1974)は、コンクリート圧縮強度 f'_c 、スパン長 l 、有効高 d 、鉄筋径 ϕ 、鉄筋比 p 、載荷周長 u_0 および載荷位置について、それぞれの押し抜きせん断耐力 V_{pcd} に与える影響を実験的に調査した。その結果、押し抜きせん断耐力はコンクリート圧縮強度 f'_c 、有効高 d 、載荷周長 u_0 および鉄筋比 p に依存していることが確認された。結果より押し抜きせん断破壊に対する算定式(2.5)を提案した。

$$V_{pcd} = \frac{0.563(u_0 + 3\pi d)d\sqrt{f'_c} \left(1 + 0.5 \frac{pf_y}{\sqrt{f'_c}}\right)}{\left(1 + \frac{d}{20}\right)} \quad (2.5)$$

ここに、 f_y は鉄筋の降伏応力であり、 $pf_y/\sqrt{f'_c} > 2.5$ のときは2.95の値を用いる。

b) コンクリート標準示方書(土木学会, 1996)

次にコンクリート標準示方書(土木学会, 1996)において、示されている押し抜きせん断耐力式は、

$$V_{pcd} = \beta_d \beta_p \beta_r f_{pc} u_p d / \gamma_b \quad (2.6)$$

であり、ここに、

公称せん断強度: $f_{pc} = 0.6\sqrt{f'_c}$

d についての寸法効果: $\beta_d = \sqrt[3]{1/d}$

ただし、 $\beta_d > 1.5$ のとき $\beta_d = 1.5$

p についての影響係数: $\beta_p = \sqrt[3]{100p}$

ただし、 $\beta_p > 1.5$ のとき $\beta_p = 1.5$

u_0/d についての影響係数: $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u_0/d)$

仮想面の周長: $u_p = u_0 + 2\pi \cdot d/2$

部材係数: $\gamma_b = 1.3$

である。

c) 両式の比較

両式について、同じパラメータを含み共通点が多いことから算定式を、

$$V_{pc} = A_{pc} \times f'_{pc} \times d_{pc}$$

の3項目の積の形に置き換えに整理した(表-2.5)。ここに、

A_{pc} : 仮想破壊面の面積

f'_{pc} : せん断強度

d_{pc} : 有効高さの影響係数

である。

表-2.5 せん断耐力算定式の比較

	角田ら	示方書
仮想破壊面の面積	$(u_0 + 3\pi d)d$	$\beta_r u_p d$
公称せん断強度	$0.563(\sqrt{f'_c} + 0.5pf_y)$	$\beta_p f_{pc} / \gamma_b$
有効高さの影響係数	$1/(1 + d/20)$	β_d

各項目について、両式での違いをみるため、有効高 $d = 16\text{ cm}$ で表-2.6の計算条件にて計算を行った。その計算結果について表-2.7に示す。これを比で見ると、仮想断面の総面積は1.3、公称せん断強度は1.9、有効高さの影響係数は0.5であった。

表-2.6 せん断耐力計算条件

計算条件	
載荷周長 u_0	40cm
主鉄筋	2.865cm ² (@1.25)
配力鉄筋	1.936cm ² (@1.5)
鉄筋比 p	0.113
コンクリート許容応力度 f'_{ck}	240kgf/cm ²
鉄筋の許容応力度 f_{yk}	1800kgf/cm ²

表-2.7 せん断耐力計算結果

	角田ら	示方書	比
A_{pc}	3053	2333	1.31
f'_{pc}	14.45	7.45	1.94
d_{pc}	0.556	1.154	0.48

ここでさらに有効高 d に対する押し抜きせん断耐力の変化について両算定式を比較した。有効高 d を 16cm~60cm まで 4 cm 間隔で変化させ計算を行った結果、図-2.15 のような結果が得られた。

有効高 d が小さいうちは両式ともほぼ変わらない値となっているが、有効高が大きくなるにつれ、角田らの算定式の方が、押し抜きせん断耐力を小さく算定していることがわかる。

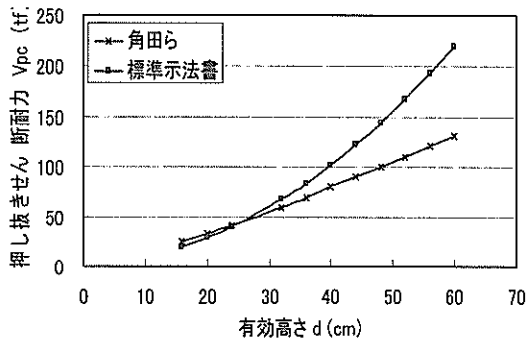


図-2.15 各算定式による押し抜きせん断耐力と有効高

(3) 剛な高速物体の衝突

a) 貫通限界および裏面剥離限界版厚

原子力発電所のような高度な安全性を要する施設において、施設の安全性を守るために、施設のコンクリート構造物に対し、飛行機などの剛な飛来物の高速衝突についての研究が行われている。

この実験の主たる目的は、剛な飛来物が高速に衝突したときの破壊モードを検討し、飛来物の速度、重量、大きさから、裏面剥離や貫通を防ぐ鉄筋コンクリート壁の限界版厚を決定することにある。

伊藤ら(1991)は、鉄筋コンクリート床版を用いた衝撃実験(速度は 40m/s~250m/s)を行うことにより、既往算定式の適用性や衝撃応答に及ぼす因子の影響について検討を行い、適切な貫通限界版厚 T_c および裏面剥離限界版厚 T_s の評価式を提案している。

$$T_c = 0.90 \beta \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{\phi_f f_c} \right)^{0.5} \quad (2.7)$$

$$T_s = 1.75 \alpha \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{(MV^2)^{0.4}}{\phi_f^{0.2} f_c^{0.4}} \quad (2.8)$$

ここに、 M : 飛来物質量、 ϕ_f : 飛来物直径、 V_0 : 基準速度 (60.9m/s としている)、 V : 衝突速度、 f_c : コンクリート圧縮強度、 α : 裏面剥離に対する形状係数(平坦: 1.00, 球状: 1.13, 鋭い: 1.18)、 β : 貫通に対する形状係数(平坦: 1.00, 球状: 1.15, 鋭い: 1.21)である。

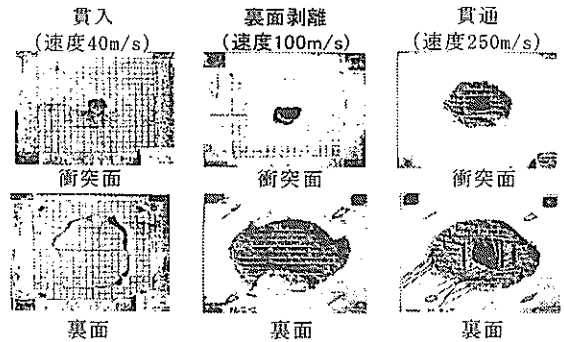


写真-2.2 速度による破壊モードの変化

写真-2.2 は、伊藤ら(1991)の実験結果であるが、速度の増加とともに、破壊モードが貫入、裏面剥離、貫通と推移していく様子わかる。速度が 40m/s においては、曲げによるひび割れと押し抜きせん断破壊による押し抜き円が混在し、また速度が 100m/s になると押し抜き円状に裏面剥離が生じる。さらに速度が増加し速度が 250m/s になると貫通する。

また裏面剥離状態について、速度 250m/s の方が 100m/s よりも若干小さくなっている。これは、曲げおよび押し抜きせん断破壊によるひび割れの発生が不十分うちに飛来物が突き抜けていくためと考えられ、このことから速度が極限まで増加すると飛来物の径と等しい貫通孔が生じると推測される。

b) 最大衝突荷重

衝突速度と最大衝突荷重の関係について図-2.16 に示す。これはコンクリート強度 24N/mm² の床版に質量 100kgf の飛来物を衝突させたものである。ひび割れおよび裏面剥離の段階では、衝突速度の増加とともに衝突荷重が増加している。しかし、さらに速度が増加し貫通が発生すると、衝突荷重が低下している。これは速度が増加すると衝撃荷重が最大値に達しないうちに床版に貫通が発生し、それ以上衝突荷重が増加しないためである。

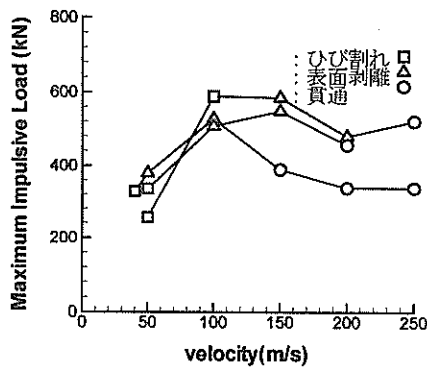


図-2.16 衝突速度と最大衝突荷重の関係

c) 動的荷重に対する押し抜きせん断耐力への影響

Tubota *et. al.* (1998) は鉄筋コンクリート版を用いて、2.0m/s の速さで載荷した場合と、静的に載荷した場合との違いについて実験を行った。その結果、動的に載荷したほうが、10%から15%程度の降伏強度が増加すると報告している。

2.4 物体の衝突力に関する研究

(1) 落石等の衝突力

山岳部道路の落石覆工における落石衝撃力に関する研究が行われており、衝撃力を緩和・分散するため落石覆工上部に敷かれている砂の上に落ちる石の衝撃力について、下記算定式(2.9)が提案されている(落石対策便覧, 2000)。これは Hertz の衝突理論を用いて導かれた式であり、衝突体を球形、被衝突体を平面と仮定し、落石の比重を 2.6 としている。

$$P_{max} = 2.108(mg)^{2/3} \lambda^{2/3} H^{2/3} \quad (2.9)$$

ここで、 P_{max} : 落石の衝撃力、 m : 落石質量、 g : 重力加速度、 H : 落下高さ、 λ : 被衝突体(落石)のラーメ定数である。ラーメ定数 λ の与え方に関して松尾ら(1995)は、実験により敷砂層厚 T と落石の直径 D との関係から、

$$T/D > 1 \dots \lambda = 1,000$$

$$T/D \leq 1 \dots \lambda = 1,000 \times (T/D)^{-0.5}$$

となることを提案している。これらの実験は実規模にて行われており、衝突速度は 4m/s から 25m/s 程度である。

また、衝突に対する対策実験として川瀬ら(2002)は、緩衝材を二層緩衝構造(表層材に RC 版、裏層材に発砲スチロール)に置き換えることによる耐衝撃向上に関する実験を行っており、かなりの緩衝効果が得られている。

(2) 流木による衝突力

地震の津波時などにおいて、漂流した流木による構造物などへの衝突力について、松富(1999)が検討している。

a) 実験結果による衝突力の評価式

ここでは、空中実験により、衝突力に影響を与える因子について調査を行っている。実験の結果、細長比 L/D (流木の長さ L と直径 D の比) および衝突角度 θ にはそれほど依存性はなく、衝突速度 v_{A0} および降伏応力 σ_f に依存性がみられた。この結果から衝突力の評価式(2.10)を提案している。

$$\frac{F_m}{\gamma D^2 L} = 1.6 C_{MA} \left\{ \frac{v_{A0}}{(gD)^{0.5}} \right\}^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{0.4} \quad (2.10)$$

ここで、 γ : 流木の単位体積重量、 g : 重力加速度、 C_{MA} : 見かけの質量係数である。

b) 衝突力の理論的検討

さらに松富は衝突力を理論的な面からの検討も行っている。ここでは、流木は衝突直後から塑性変形し、最大衝突力はその塑性化終了時(流木が反発を始めるとき)に発生するものと考えて議論を進めている。

図-2.17 は流木の衝突部分を示しており、塑性変形長を α 、接触面積を A および流木の衝突角度を θ とおき、塑性変形長と接触面積は塑性化終了時まで単調増加するとして、接触面積 A は塑性変形長と衝突角度の関係式(2.11)で表せる。

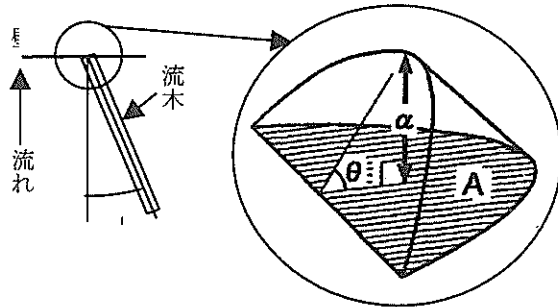


図-2.17 接触面積 A 、塑性変形長 α および衝突角度 θ

$$A = \frac{D^2 \left[\sin^{-1}(1 - B_1^2)^{1/2} - B_1(1 - B_1^2)^{1/2} \right]}{4 \cos \theta}$$

ただし、 $B_1 = 1 - \frac{2\alpha}{D \sin \theta}$ (2.11)

第2近似の精度により

$$A \approx \frac{4D^{1/2} \alpha^{3/2}}{3 \cos \theta \sin^{3/2} \theta}$$

また、運動量保存則、角運動量保存則、ならびに流木の運動学的条件から塑性変形長を計算し、それにより接触面積を算定し、木材の降伏応力を乗じて、衝突力を求めている。その結果を実験と比較し、その妥当性を示している。

2.5 本研究の目的

2.1 で述べたように、ケーソンの穴あき等の局所破壊被災は、特に 50t 以上の大型ブロックの置かれている消波ブロッ

ク被覆堤において生じている。

ブロックのケーソン壁面に対する荷重の分類を、集合体での荷重、1個体での衝突に分類(表-2.4)したところ、1個体での衝突荷重の算定方法が未解明である。

コンクリート版自体の押し抜きせん断耐力は、式(2.5)や(2.6)で求めることが可能であるが、水中において使用可能であるかどうかは検討されておらず、また、ある程度の速度を持っている物体に対して適用可能かどうかもわからない。

そこで、本研究では、まず、ブロック1個体での衝突荷重を実験により測定し、その算定手法を提案する。さらに、そのときの破壊モードならびに、コンクリート版の耐力との関係を、実際に破壊実験を行うことにより検討する。さらに、それらをふまえて、設計への反映のさせ方および対策を緩衝材実験なども用いて検討する。

第3章 ブロック衝突荷重測定実験

ここでは、消波ブロックの衝突荷重をロードセルにより測定する実験を行う。まず、衝突速度と衝突荷重との関係を明らかにするために、ブロックをつり下げて衝突させ、その衝突荷重を測定し、次に、2.2 節で想定した衝突パターンによる衝突荷重の測定を行った。そして、それらの結果より衝突荷重の算定式を提案することを目的とした。

3.1 つり下げ衝突実験

(1) 実験断面ならびに実験条件

実験は図-3.1 に示すように消波ブロックをワイヤーで吊り下げて行った。所定の角度まで振り、勢いをつけず初速度ゼロで放した。実験ケースは、空中・水中にて振り角を5, 10, 15, 20, 25 度と変え、それぞれの角度にて適当な回数試行した(表-3.1)。水中で行う場合は静水位を5mとし、初期状態から消波ブロックが完全に水没するようにした。

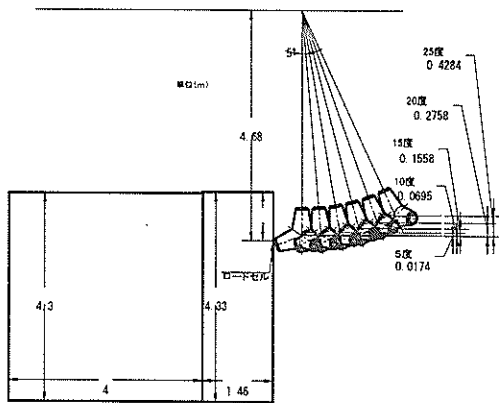


図-3.1 衝突力測定実験断面図

表-3.1 吊り下げ実験衝突回数

	角度	回数		角度	回数
空中	5	30	水中	5	—
	10	40		10	30
	15	41		15	20
	20	30		20	30
	25	13		25	10

衝突体として、0.5t型テトラポッド(重量4.51kN)を用いた。消波ブロックの形状を図-3.2 に示す。被衝突体としては鋼版を用いた。また、衝突力を測定するのに、写真-3.1 に示すロードセルを用いた。ロードセルの仕様は、固有周波数7

kHz, 定格容量500kN, 鋼製である。本実験で用いたロードセルの原理は、支柱部分に貼り付けた防水加工のひずみゲージを用いてひずみ量を測定し衝突力へと換算するものである。ロードセルの受圧部は15cm角となっている。

写真-3.2 のようにロードセルをケーソンに設置し、そのロードセルにワイヤーで吊した消波ブロックを衝突させた(写真-3.3)。ロードセルは、写真-3.3からもわかるように、ケーソンの後部壁面に固定されたH鋼先端部に取り付け、ケーソン壁前面にあらかじめあけた穴から出している。よって本実験ではケーソン壁全体の衝突力を測定したのではなく、局所的な衝突力を測定した。

測定のサンプリングは4000Hzである。

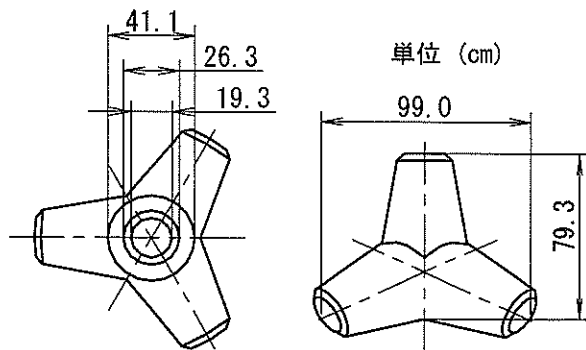


図-3.2 消波ブロックの形状図(0.5トン型)

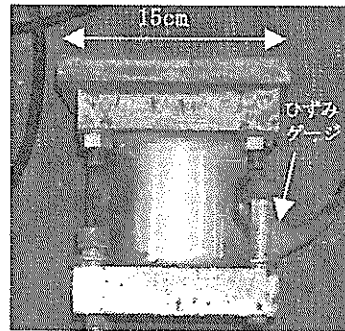


写真-3.1 ロードセル

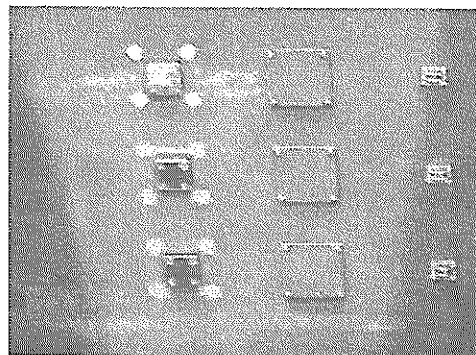


写真-3.2 ロードセルと波圧形の設置状況

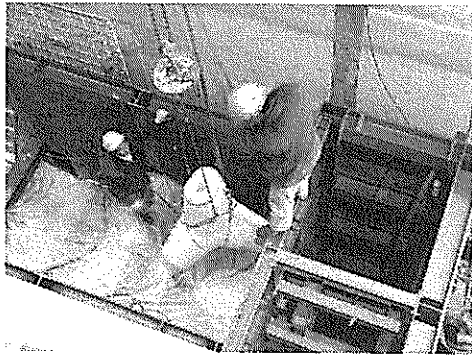


写真-3.3 消波ブロックの設置状況

(2) 実験結果

消波ブロックがケーソンに対して衝突する様子を写真-3.4に示す。

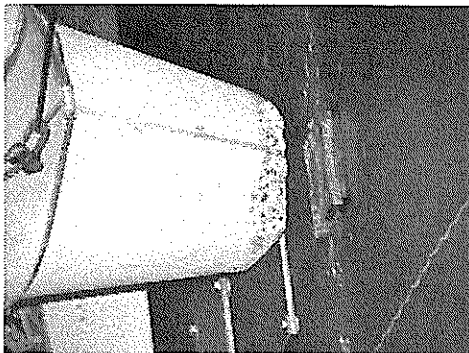


写真-3.4 ケーソンとの接触の様子

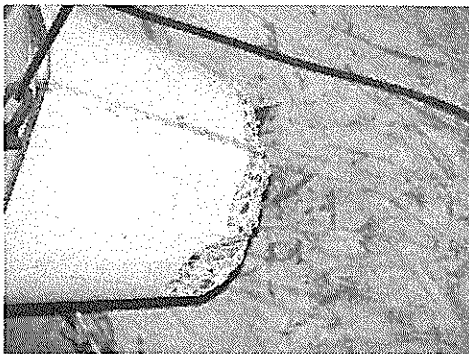


写真-3.5 ブロック先端部の欠けている様子

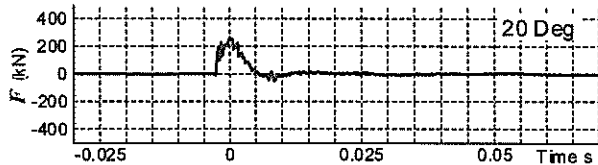


図-3.3 時系列データの例 (つり下げ衝突, 20度)

この写真は実際に衝突する間際の写真ではなく、静止しているところを撮影したものである。衝突する際には、ロードセルの下半分に接触していることがわかる。また、写真-3.5に、衝突力測定実験を60回程度終えたあとの消波ブロック先

端部の様子を示す。ロードセルが鋼製であるので、消波ブロックの方が大きく欠けていた。また、測定された時系列データの一例を図-3.3に示す。

次に、空中実験における各振り角について、最大衝突力の度数分布およびその平均値を図-3.4に示す。ここで、横軸には、それぞれの振り角における落下高さ (H_f) を示し、度数分布は1目盛りが1回とする。図-3.4より、極端なばらつきが少なく、適切に測定できていることがわかる。

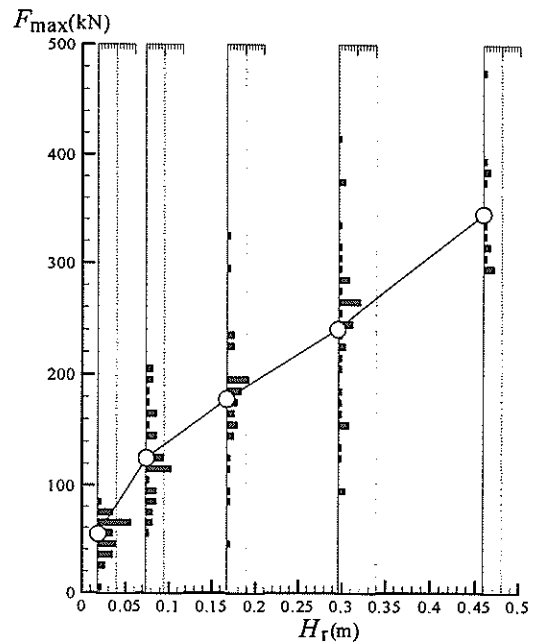


図-3.4 最大衝突力の度数分布(空中)

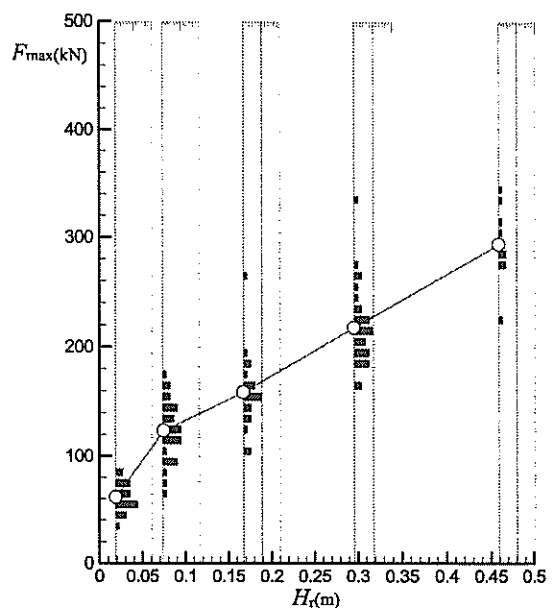


図-3.5 最大衝突力の度数分布(水中)

また、水中での測定結果は、空中の結果よりさらにばらつきは少なかった(図-3.5)。

水中での実験において、振り角が5度、10度のときは、衝突力は空中の場合と大きな差はないが、15度以降水中実験結果のほうが小さい値を示している。

水中においては、浮力が生じているために、見かけの質量は減少するが、一方で、周囲の水を動かすことにより仮想質量が増えるために、5度や10度においてはほぼ同程度となったと考えられる。

また、角度が大きくなったときは、移動速度も大きくなることから、水中では抗力が大きくなり、衝突速度が減少する。そのために、15度以降は小さくなったと考えられる。その理論的な検討については後述する。

さらに、最大衝突力の平均値と落下高さ H より得られる衝突速度 v の関係を調べた結果を図-3.6 に示す。横軸の衝突速度は、 $\sqrt{2gH}$ を用いて換算した。水中では、抗力のために、その衝突速度よりも遅くなると考えられるが、測定できなかったために、空中の速度を用いておくこととした。

図中に線形回帰直線を示し、空中では $F_{max} = 1.31 \times 10^5 v$ 、相関係数は 0.9953 となった。これより、ほぼ衝突速度に衝突加重が比例していることがわかり、測定が良好に行われたことを示している。また、松富(1999)の衝突力式(2.10)のように、速度の 6/5 乗に比例したと考えた場合、空中実験では、 $F_{max} = 1.0 \times 10^5 v^{6/5}$ で、相関係数は 0.9941、水中実験では、 $F_{max} = 9.6 \times 10^4 v^{6/5}$ であった。

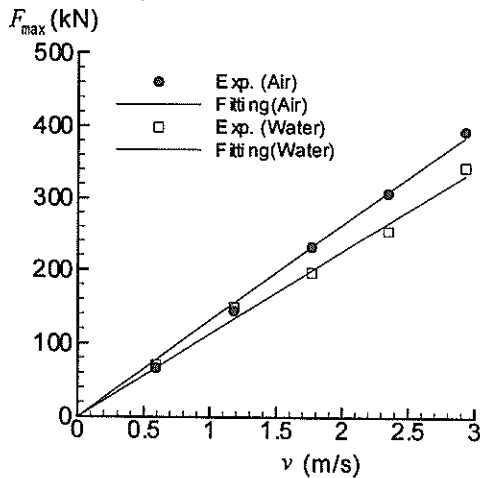


図-3.6 最大衝突力と換算速度の関係(空中・水中)

3.2 ロッキング衝突実験

(1) 実験断面ならびに実験条件

a) 実験断面

写真-3.6 に示すように消波ブロックを乱積みし、ケーソ

ン側の最上段にあるブロックをロッキング衝突させ、ロードセルにて衝突荷重を測定した。消波ブロックは、ロッキング衝突しやすいように積みあげた。

写真-3.7 に示すようにロードセルとブロックの距離は約10cm程度とした。また、再現性を保つために、衝突ブロックがずれた場合、衝突ブロックを同じ位置に戻してロッキング衝突実験を行った。ただし、衝突ブロックより下にある基礎部分が波によって崩れた場合は、できるだけ同じ位置に戻すように全体を積みなおした。

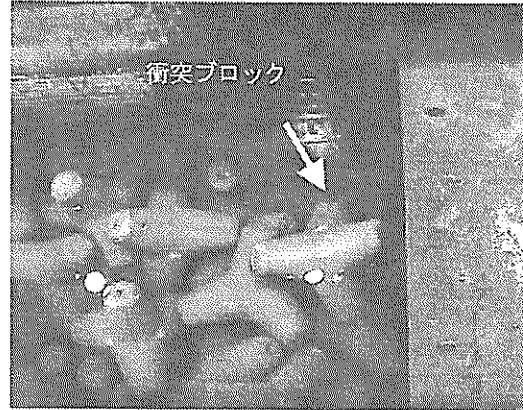


写真-3.6 ロッキング衝突実験設置状況

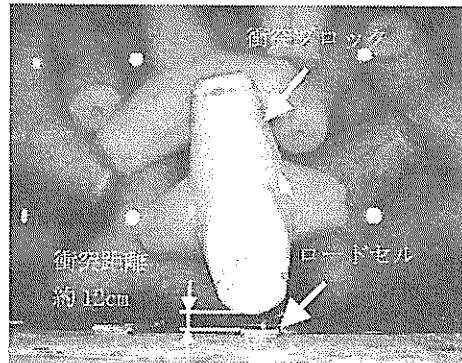


写真-3.7 衝突ブロックの詳細図

b) 実験条件

水深は、静水時に衝突するブロックが約半分水没するように360cmとした。波浪条件として、まず始めに波高を50cmに固定し、周期を3~10秒まで1秒刻みで変化させて、その違いを検討した。次に、周期を4秒で固定し、波高を50cmから200cmまで25cm刻みで変化させて、その違いを確認した。実験波はすべて規則波とした。

(2) 実験結果

a) 波の周期と衝突力との関係

図-3.7は、各周期における衝突荷重の時系列記録を示す。縦軸が衝突荷重、横軸が時間である。図-3.8は、周期4秒の結果における100秒付近の衝突荷重の時系列データを拡大したものである。

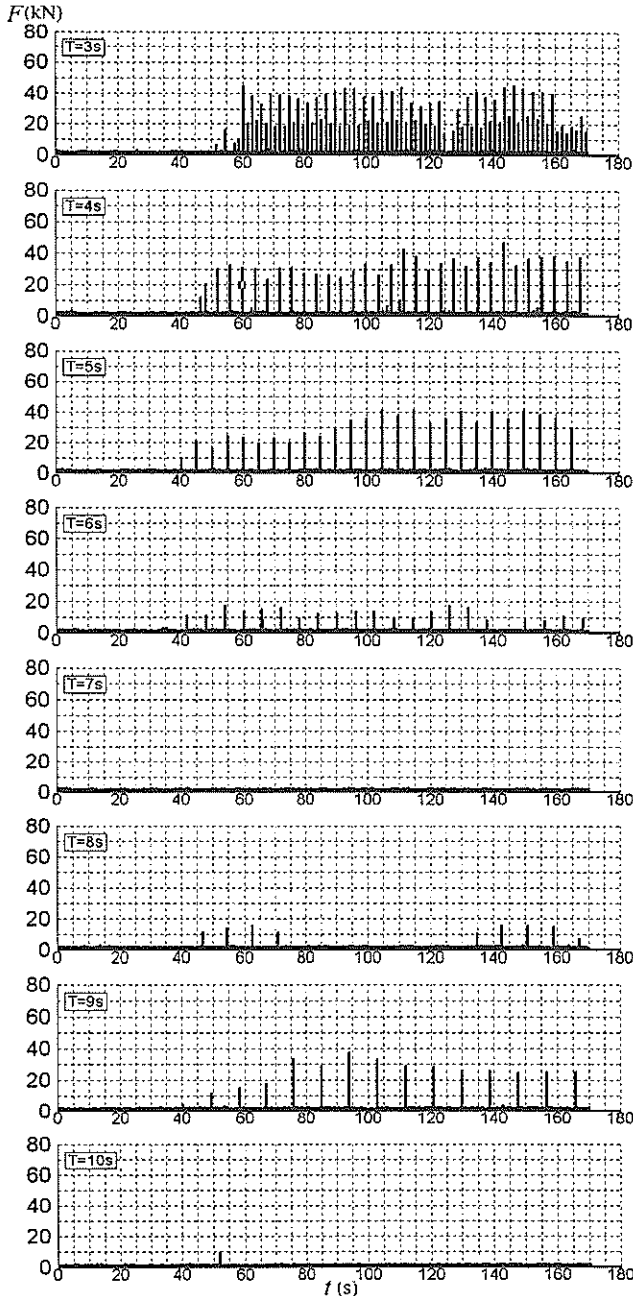


図-3.7 ロッキング衝突荷重の時系列(周期別)

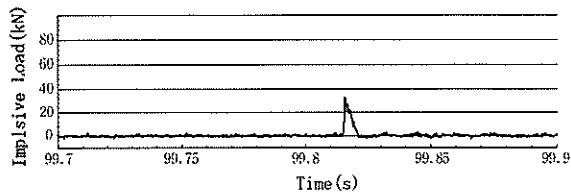


図-3.8 時系列データの拡大図(周期4秒)

非碎波時のロッキング運動は、図-3.9 に示すように、水位変動による浮力の中心（浮心）の位置移動に伴う回転力の発生をきっかけとしてブロックが動き出し、そこに、波力の作用も加わりある程度速度をもって壁に衝突し跳ね返り、

また、元の位置に戻るといふ繰り返し運動である(②→③→④→②)。

周期が3秒のときには、ロッキング衝突速度が速いために、波の上昇時だけでなく、下降時においても衝突しており、それにより、図-3.7 に示すように、1周期において2度衝突する現象が生じている。これは、一旦跳ね返ったブロックが、支えているブロック(図-3.9)に衝突し、もう一度跳ね返るために生じている。その際、波の下降時における水位変動に伴う回転力も、その運動に寄与すると考えられる。

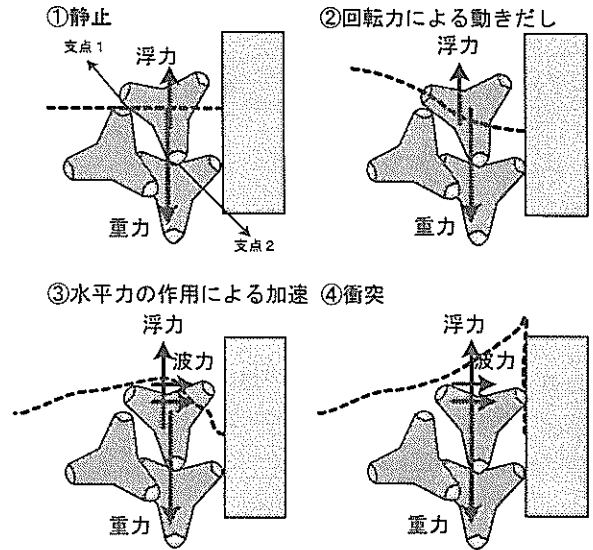


図-3.9 ロッキング運動(非碎波時)

この運動では、波力が強大になるとブロックの脚の支えがずれてしまうことや、壁面とブロックの距離が大きすぎると戻らなくなることにより、ロッキングが停止したり、壁面に衝突しなくなったりする。

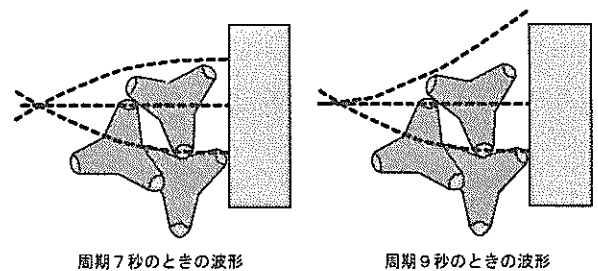


図-3.10 周期による波形の違い

また、図-3.10 に周期7秒と、周期9秒時における水位変動の違いを示す。これを見ると、周期7秒のときは、ブロックの大きさに対して波長が長くなり、浮心の水平移動がほぼないために偶力がほとんど発生せず、さらに、波力も大きくならないために、ほとんどブロックが動かなかったものと思われる。一方で、周期9秒では、非線形性の影響から波峰が尖り、そのために、偶力、波力ともに、大きくなったものと

考えられる。

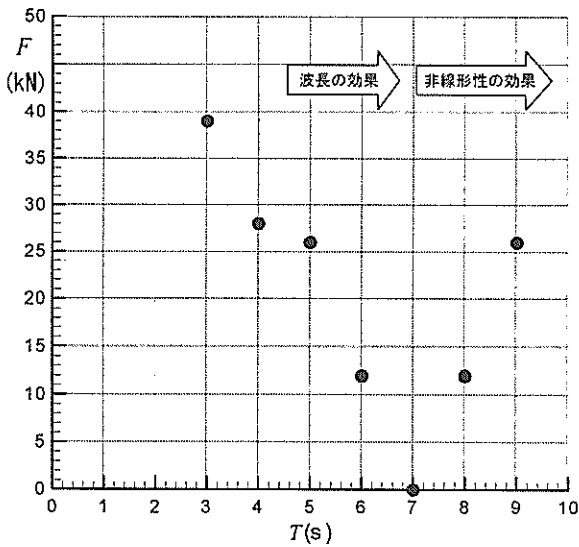


図-3.11 周期と衝突荷重の関係(入射波高 50cm)

図-3.11 に各周期での平均最大衝突荷重をプロットしたものを示す。これを見ると周期7秒までは周期が大きくなるにしたがい、衝突荷重が小さくなっていることがわかる。これは、上述した理由によりブロックに作用する力が小さくなり、衝突速度が小さくなっていることがわかる。そして、周期がさらに長くなると、非線形性が強くなり、ブロックに作用する力が増加するため、衝突荷重は増加していることがわかる。周期10秒に関しては、周期7秒のときと同じような波形になっていたために、ブロックの動きが小さくなっていた。これは、水路の長さ(水路の固有振動)との関係もあると思われる。

b) 入射波高と衝突力との関係

次に、波の周期を4秒とし、波高を50cmから200cmまで25cm間隔で変更した際の衝突荷重の時系列結果を図-3.12に示す。入射波高が1mよりも小さい場合は、水位の上下変動によりロッキングが生じ(図-3.9)、入射波高が1mより大きい場合は、消波ブロックの手前で波が砕波し、水塊の突入によってロッキングが生じていた(図-3.13)。観察から、砕波時におけるロッキングに対して、偶力による寄与はほぼないと推察される。

また、1mよりも入射波高が大きくなった場合、1mよりも小さいときに比べてロッキング運動が安定していないことがわかる。これは、波力が大きくなるために、ブロック脚の支点がずれてしまうことに起因している。つまり、波力が大きすぎても安定したロッキング運動にならないことがわかる。

図-3.14 に衝突荷重の最大値と平均値を示す。これを見ても波高が増大するにつれ、最大値と平均値のずれが大きくな

っており、ロッキング運動が安定しなくなることがわかる。

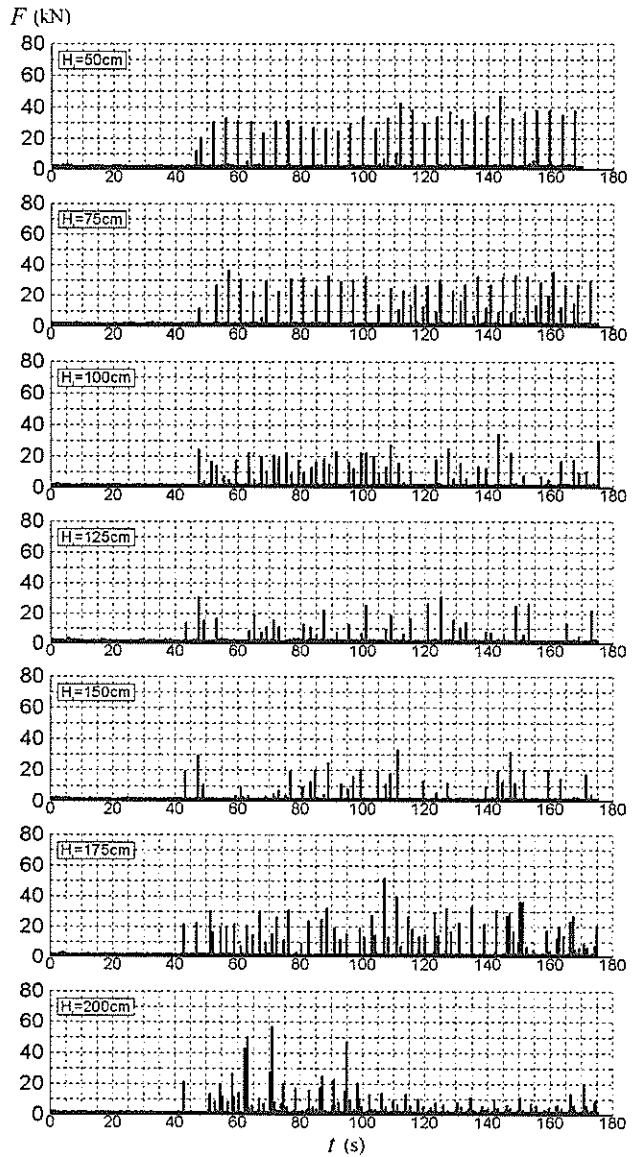


図-3.12 ロッキング衝突荷重の時系列(波高別)

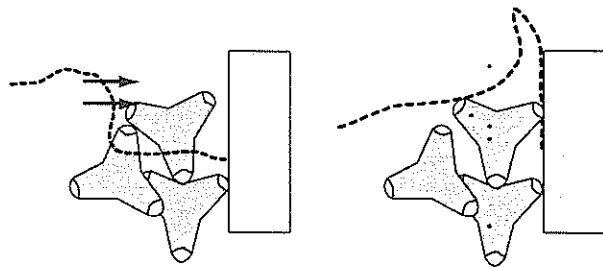


図-3.13 ロッキング衝突(砕波時)

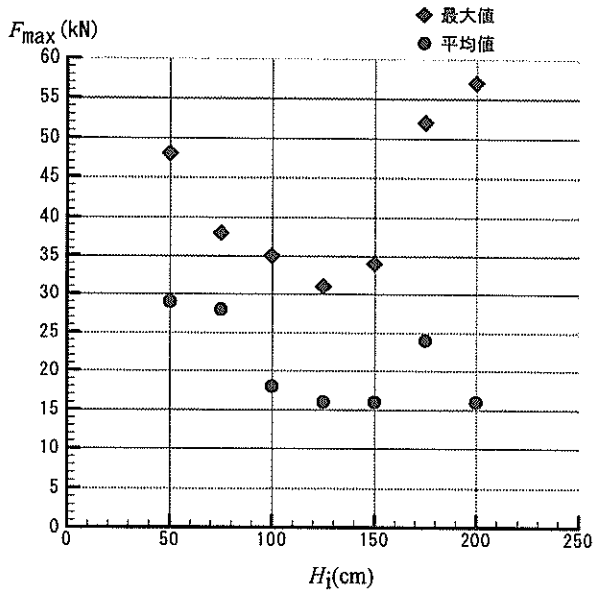


図-3.14 入射波高と衝突荷重の関係(周期4秒)

c) ロッキング衝突速度

ビデオ画像を用いて、入射波高40cm、周期4秒のときの先端部の衝突速度を求めたところ、0.5m/s~0.7m/s程度であった。これは波面上昇速度に依存すると考えられ、その速度は平均として $2H_i/(T/2)$ と与えるものとした。ここで、 H_i は入射波高を表す。

砕波時のロッキング運動においては、気泡の混入も激しく画像から衝突速度を求めることが出来なかったが、衝突加重の結果より同程度の速度であることが予想される。波速は6.7m/s~7.4m/s程度であるため、ロッキング衝突速度は、波速の1/20~1/10程度であることがわかる。よって、ロッキング衝突速度は、非砕波時には $2H_i/(T/2)$ 、砕波時には波速の1/10とする。

3.3 転落衝突実験

(1) 実験断面および実験条件

ロッキング衝突実験と同様に乱積みした消波ブロックの上に衝突ブロックを置き(写真-3.8)、ブロック1個分の高さから転がりながら落下するときの衝突力を測定した(写真-3.9)。現実的に、ブロック2段分ぐらいの大きい隙間が空くことはほとんど無いと思われること、また、高ければ高いほどロードセルに当たる確率が低くなることもあり、ブロック1個分の高さとした。

水深はロッキング時と同じく360cmとした。波浪条件は、入射波高150cm、200cm、250cm、周期7sの規則波とした。

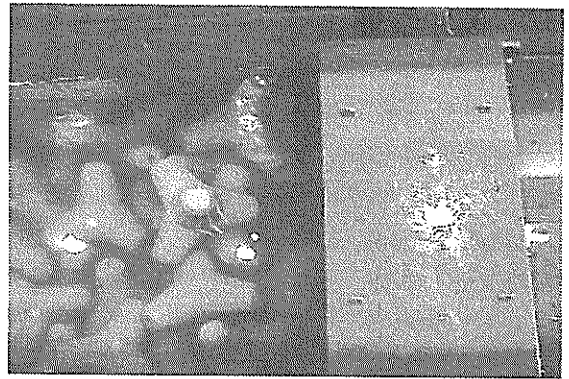


写真-3.8 転落実験ブロック設置状況

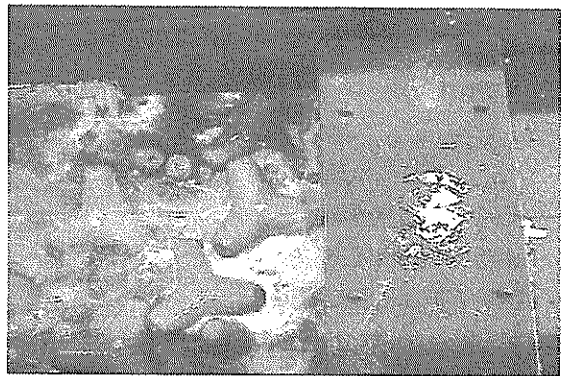


写真-3.9 転落実験ブロック転落後

(2) 実験結果

a) 衝突荷重

転落衝突は、波浪により水平方向の力を受け、それによりバランスを失い、その後回転しながら、ケーソンに衝突する(図-3.15)。

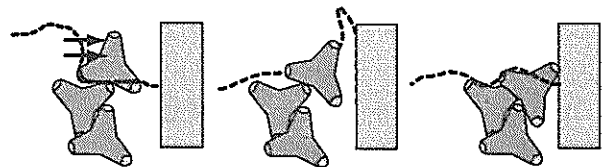


図-3.15 転落衝突

図-3.16は、波高150cmのときの転落衝突荷重の時系列データである。転落後は、ブロックが波によりケーソンを押し続けていることがわかる。

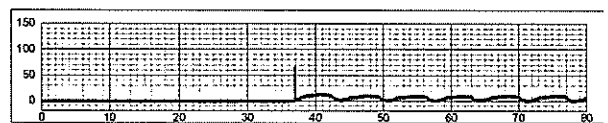


図-3.16 転落衝突荷重の時系列

図-3.17 は入射波高と衝突力の関係を示している。入射波高が 250cm のときは、ばらつきが大きいですが、平均的には入射波高に依存していないことがわかる。これは、一旦転落し始めると波の影響をほとんど受けないためである。

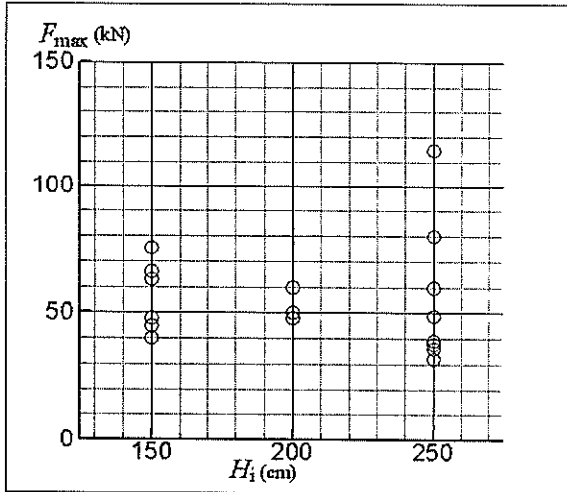


図-3.17 最大転落衝突荷重

b) 衝突速度

重心位置としては、10~20cm 程度の落下であるために、つり下げ実験の結果より 120kN~200kN の衝突力になると考えられるが、今回の結果は平均するとつり下げ時の 30%~50% 程度となっている。これは、つり下げ実験における自由落下速度よりも転落実験の重心速度が遅いことを意味している。

3.4 衝突荷重の算定方法の提案

(1) 衝突力算定式

a) Hertz の弾性衝突理論に基づいた導出

衝突力は運動量保存則から力積を用いて求めることが可能となるが、力の作用時間を定義しなければならない。しかし、力の作用時間 Δt_p に対する一般的な定義はない。松富(1999)は、漂流物による壁面衝突力に対し、衝突速度 v_p 、 Δt_p および衝突物の塑性変形長の関係を、 $v_p \Delta t_p \sim \alpha_p$ と考え、衝突力の算定式を求めている。 $v_p \Delta t_p \sim \alpha_p$ の関係式は理論的考察も含めて実験より決定している。しかし、これは壁面に対して衝突物が柔らかい場合の変形を考慮したものであるため、ここでは、落石などの評価で用いられている Hertz の弾性接触理論を用いて衝突力を理論的に算定する手法を提案する。

互いに向かい合う 2 つの物体 (球) が衝突し、接触した瞬間に圧縮力が相互の物体に作用したとする。そのときの物体 m_1 、 m_2 の運動方程式は、それぞれ、

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -F, \quad m_2 \frac{dv_2}{dt} = F \quad (3.1)$$

となる。ただし、物体 m_1 が運動している方向を正とする。接

触点で生じた局部変形によって 2 球の重心が近づく距離を α とすると、

$$\ddot{\alpha} = -\frac{F}{m_1} - \frac{F}{m_2} = -\frac{1}{\tilde{m}} F \quad (3.2)$$

となる。ここで、 $\tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ とする。

静的に接触する 2 つの物体の圧力問題として解いた場合、 F と α の間には、

$$F = \chi \cdot \alpha^n \quad (3.3)$$

の関係が成立する。ここで、 n および χ は、衝突する接触面の形状によって異なり、

球と平面 $\chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \quad n = \frac{3}{2}$

円柱底面と平面 $\chi = \frac{2r}{\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \quad n = 1$

ここで $k_1 = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1}$ 、 $k_2 = \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}$ であり、 a は球の半径、 r は円柱の半径、 E_1, E_2 はそれぞれのヤング率、 ν_1, ν_2 はポアソン比である。

式(3.3)を式(3.2)に代入すると、

$$\ddot{\alpha} = -\frac{\chi}{\tilde{m}} \alpha^n \quad (3.4)$$

となる。式(3.4)の両辺に $\dot{\alpha}$ を乗じると、

$$\frac{d(\dot{\alpha})^2}{2} = -\frac{\chi}{\tilde{m}} \alpha^n d\alpha \quad (3.5)$$

さらに積分を続行すると、

$$\frac{\dot{\alpha}^2 - v_0^2}{2} = -\frac{1}{n+1} \frac{\chi}{\tilde{m}} \alpha^{n+1} \quad (3.6)$$

を得る。ここで、 v_0 は衝突前の 2 つの球の接近速度である。式で $\dot{\alpha} = 0$ とおけば、圧縮力が最大となる時の接近距離が得られる。すなわち、

$$\alpha_{\max} = \left(\frac{n+1}{2} \frac{\tilde{m}}{\chi} v_0^2 \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.7)$$

であり、式(3.3)に代入すると、

$$F_{\max} = \chi^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tilde{m}^{\frac{n}{n+1}} v_0^{\frac{2n}{n+1}} \quad (3.8)$$

となる。

本研究では、ブロックの脚と平板との衝突を、局所的に球と平面の衝突と考え、 $n=3/2$ とする。すると、式(3.8)より

$$F_{\max} = \chi^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5\tilde{m}}{4} \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{4}{5}} \quad (3.9)$$

となる。また、平板との衝突の場合、 v として、ブロックの衝突直前の速度を、 \tilde{m} として、ブロック質量を用いれば良いことになる。

b) 実験結果との比較検討

3.1節におけるつり下げ衝突力測定実験結果より、式(3.9)を検討する。ロードセルは消波ブロックに比べ十分に硬く ($E_2 \gg E_1$)、また壁面の質量は消波ブロックに比べ十分に重い ($m_2 \gg m_1$) とする。すると、式(3.9)の $\tilde{m} = m$ とし、 χ を

$$\chi = \frac{4}{3} \sqrt{a} \frac{E}{1-\nu^2} \quad (3.10)$$

とした。添え字のない量はブロックの諸量とする。

a を決めるには衝突面積を正確に計測する必要があるが、今回の実験では、衝突部位を正確に判別することができなかった。そこで、ここでは、ブロックの脚の半分の半径 R とし、 $a = R/2$ とした。

コンクリートのポアソン比を 0.2、ヤング率はその強度によっても違うが、平均 $2.5 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ とすると、係数は 4.3×10^5 となり、実験結果より 4 倍弱の大きさになることがわかる。これは、測定値のばらつきもあるが、消波ブロックの衝突部の欠け等の塑性効果にも起因すると考えられる。それらを純理論的に考察することは困難であるため、それらの効果を含めた係数 γ_p を用いて、最大衝突荷重の算定式は

$$F_{\max} = \gamma_p \chi^{\frac{2}{3}} \left(\frac{5\tilde{m}}{4} \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}} \quad (3.11)$$

とする。ここで、 γ_p は実験より 0.25 とする。

(2) 水中におけるつり下げ衝突速度の検討

a) 支配方程式

水中におけるブロックの衝突速度を求めるために、消波ブロックを球と見立てた場合における力の釣り合いに関する模式図を図-3.18 に示す。

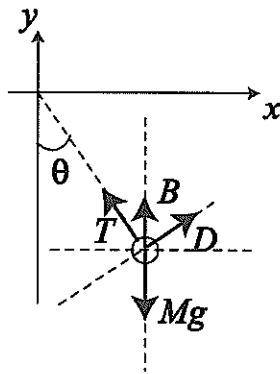


図-3.18 水中におけるブロックの力の釣り合い

そのときの球にかかる力の釣り合い式は、 x 方向および y 方向において、

$$M\ddot{\theta}R \sin \theta = T \cos \theta + B + D \sin \theta - Mg \quad (3.12)$$

$$M\ddot{\theta}R \cos \theta = -T \sin \theta + D \cos \theta$$

になる。ここで、 ρ は水の密度、 V は球の体積、 g は重力加速度、 R はつり下げている長さ、 θ は衝突壁となす角度、 T を張力、 B を浮力で $B = \rho g V$ とした。また、 D は流体の粘性による抗力であり、 A を投影面積、 C_D を抗力係数とすると、

$$D = C_D A \frac{\rho (\dot{\theta} R)^2}{2} \quad (3.13)$$

と表すものとする。そうすると、式(3.12)より、

$$T = \frac{1}{\cos \theta} \{ (\rho g V + D \sin \theta) + Mg + M\ddot{\theta}R \sin \theta \} \quad (3.14)$$

であるのでそれより、

$$\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \{ (\rho g V + D \sin \theta) + Mg + M\ddot{\theta}R \sin \theta \} + M\ddot{\theta}R \cos \theta = D \cos \theta \quad (3.15)$$

となり、これにより最終的に、

$$-\rho g V \sin \theta + Mg \sin \theta + M\ddot{\theta}R = D \quad (3.16)$$

を得る。

また、物体の質量として、物体が加速度運動をしているために物体周りの水を付随させて運動させることによる仮想質量 (付加質量) を加える必要がある。

従って水中における物体の質量 M は、付加質量係数を C_M 、元の質量を M' とし浮力を考慮すると、

$$M = C_M M' \quad (3.17)$$

となる。

b) 速度の計算

式(3.16)は非線形であるために、数値的に解くこととする。まず、 $\dot{\theta}$ を変数として、

$$\omega \equiv \dot{\theta} \quad (3.18)$$

と定義し、

$$-\rho g V \sin \theta + Mg \sin \theta + MR\dot{\omega} - C_D A \frac{\rho (\omega R)^2}{2} = 0 \quad (3.19)$$

$$\theta = \int \omega dt + \theta_0 \quad (3.20)$$

として解を求める。角度は反時計回りを正とし、 y 軸を 0 度とする。初期値は、

$$\theta = \theta_0, \quad \omega = 0$$

となる。

ここで消波ブロックを図-3.19のように、正三角錐と考え、図の正面方向から衝突したとする。正面から見たブロック高さ h_1 は、三角錐の辺の長さを $2a$ とすると、

$$h_i = \sqrt{4a^2 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 2a\right)^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 2a \quad (3.21)$$

となり、従って、投影面積 A は、

$$A = \frac{1}{2} \cdot 2ah_i = \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot 4a^2 \quad (3.22)$$

となる。また、正三角錐の体積 V は

$$V = \frac{1}{3} h_i \left(2a \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(2a \frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot 2a^3 \quad (3.23)$$

となる。

式(3.19)から

$$MR \dot{\omega} = -(M - \rho V)g \sin \theta + C_d A \frac{\rho(\omega R)^2}{2}$$

$$\dot{\omega} = -\frac{M - \rho V}{MR} g \sin \theta + C_d A \frac{\rho(\omega R)^2}{2MR}$$

であり、最終的に離散化すると

$$\frac{\omega^{n+1} - \omega^n}{\Delta t} = -\frac{M - \rho V}{MR} g \sin \theta^n + C_d A \frac{\rho(\omega^n R)^2}{2MR}$$

ω^{n+1}

$$= \omega^n + \Delta t \left\{ -\frac{M - \rho V}{MR} g \sin \theta^n + C_d A \frac{\rho(\omega^n R)^2}{2MR} \right\} \quad (3.24)$$

となる。ここで、上付きの n はタイムステップである。

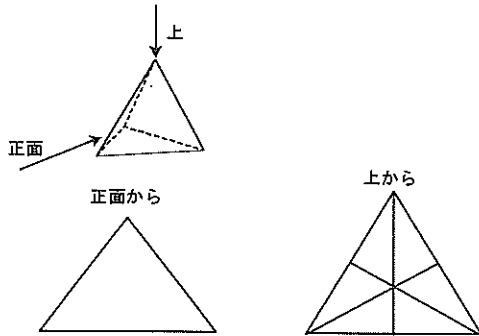


図-3.19 消波ブロックを正三角錐と見立てたときの衝突概念図

c) 計算結果の例

式(3.24)の計算結果例を示す。図-3.20 は空中において下り下げた場合の落下速度、加速度ならびに角度の時間変化を示している。ここで、初期角度は 25 度とし、 $R = 4.9 \text{ m}$ 、 $M' = 4.9 \text{ t}$ 、コンクリート密度 $\rho_c = 2.3 \text{ t/m}^3$ とする。そこから体積を求めて、正三角錐の長さ a を求めた。空中における落下であるので、角度が 0 になる時間つまり衝突する時間における速度は、 $\sqrt{2gH_i}$ で求められる。ここで、 H_i は初期の落下高さであり、 $H_i = R(1 - \cos \theta_0)$ であり、この場合 0.45m となり、衝突速度は 3.0m/s が得られる。図からも 3.0m/s と

読み取れることから、計算手法が妥当であることがわかる。

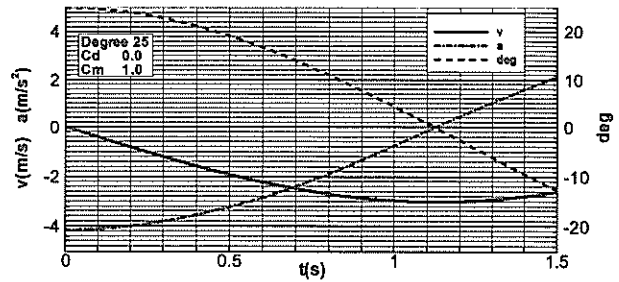


図-3.20 落下速度、加速度、角度の時系列変化(空中)

次に、水中において、初期角度 25 度、 $C_d = 0.8$ 、 $C_M = 1.6$ としたときの速度等の時系列変化を図-3.21 に示す。 C_d 値は粘性による効果をあらわすために、レイノルズ数により異なることが予想されるが、この程度の速度の差ではレイノルズ数もオーダーが異なるわけではないと考え、 C_d 値を一定とした。これによると衝突速度は、2.1m/s 程度であることがわかる。また、角度が 0 になるところで速度が最大となるわけではないこともわかる。本実験で用いた模型ブロックの C_d 、 C_M の値についての考察は、実験結果との比較から 4.2(3)で考察する。

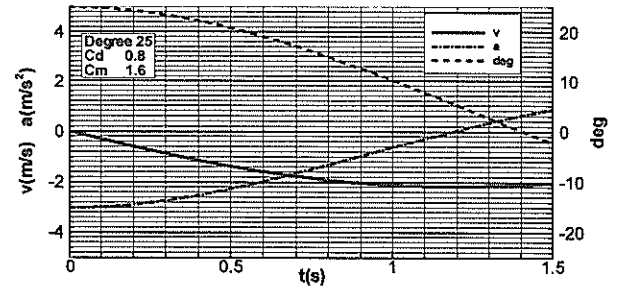


図-3.21 落下速度、加速度、角度の時系列変化(水中)度に距離の比を乗じたものになる。

(3) 重心位置の算定

本研究ではブロックの移動形態を 3 つ (水平移動衝突、ロッキング移動衝突、転落衝突) 実験した。それによると水平移動衝突においては、重心の移動と衝突点の移動速度は変化しないために、消波ブロックそのものは一つの質点とみなすことができるものの、ロッキング衝突、転落衝突においては、それぞれ支点を中心とした運動になるために、重心における速度と、衝突点における速度が異なることとなり、剛体運動として考えた場合、衝突点における速度を重心における速度に補正する必要がある。そこで、重心の位置をあらかじめ算定しておくこととする。

図-3.22 のように正三角錐としたときの重心を考えると

$$x_0 = \frac{\int_V x dV}{\int_V dV}$$

$$= \frac{\int_0^{\frac{2\sqrt{6}a}{3}} \int_{\frac{\sqrt{2}z}{4}}^{\frac{\sqrt{3}a - \frac{1}{\sqrt{3}}(\frac{\sqrt{2}z}{4})}{2}} \int_{-\frac{\sqrt{6}z}{4} + \frac{1}{\sqrt{3}}(\frac{\sqrt{2}z}{4})}^{\frac{\sqrt{6}z}{4}} x dx dy dz}{V} = 0 \quad (3.25)$$

$$y_0 = \frac{\int_V y dV}{\int_V dV} = \frac{\sqrt{3}}{3} a \quad (3.26)$$

$$z_0 = \frac{\int_V z dV}{\int_V dV} = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (3.27)$$

となる。

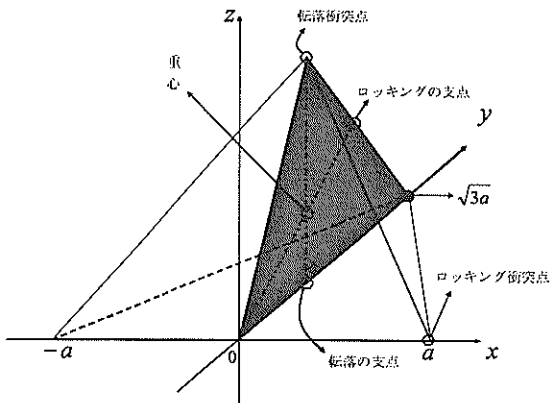


図-3.22 衝突パターンによる支点と衝突点の関係

次に図-3.22における斜線面部分を取り出したものが、図-3.23である。

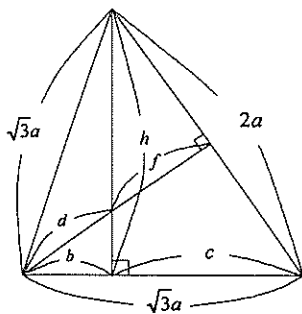


図-3.23 斜線部の切り出し

図より、距離 $b \sim h$ まで求めると、

$$b^2 + h^2 = (\sqrt{3}a)^2 \quad c^2 + h^2 = (2a)^2 \quad b + c = \sqrt{3}a \quad (3.28)$$

から、

$$\begin{aligned} \therefore b &= \frac{\sqrt{3}}{3} a, \quad c = \frac{2}{3} \sqrt{3} a, \quad d = \frac{a}{\sqrt{2}}, \\ e &= \frac{a}{\sqrt{6}}, \quad f = \frac{\sqrt{2}}{2} a, \quad h = 2\sqrt{\frac{2}{3}} a \end{aligned} \quad (3.29)$$

となる。よって、それぞれの衝突パターンによる距離の差は、表-3.2のようになる。

表-3.2 衝突点と重心までの距離の比

衝突パターン	(支点から衝突点までの距離) : (支点から重心までの距離)
水平	1:1
ロック	$\sqrt{3}a : \frac{a}{\sqrt{2}} = 1 : \frac{1}{\sqrt{6}}$
転落	$h : e = \sqrt{\frac{8}{3}} a : \frac{a}{\sqrt{6}} = 1 : \frac{1}{4}$

ロックおよび転落ともに支点に対して回転運動をしていると考えると、重心位置での速度は、衝突位置における速度に距離の比を乗じたものになる。

(4) 算定式まとめ

衝突力の算定として、式(3.11)を用いるのであるが、式中の質量ならびに、衝突速度について、それぞれの場合をここで検討した。

水中の場合は、浮力ならびに付加質量を考慮してブロック質量を考えることとする。式(3.11)を用いる場合、式中の質量として、

$$m = C_M (M' - \rho V) \quad (3.30)$$

と定義することとする。ここで、 M' は、元の質量である。また、ロック衝突や転落衝突などのときは、衝突速度を考えると、重心位置における速度を使用することになる。

第4章 コンクリート版破壊実験

コンクリート版の衝突破壊実験を第3章と同じ要領で行った。まず吊り下げ実験により衝突速度と破壊形態の検討を行い、次に、想定される衝突パターンによる破壊形態の確認を行った。そして、押し抜きせん断破壊の判定方法の提案を行うことを目的とした。

4.1 実験模型および測定項目

(1) 実験模型

現地の大きさを消波ブロック 50 t、ケーソン壁厚 40cm のものを再現することを試みた。水路幅に合わせるために、消波ブロックを重さ 5 t として(図-4.1)、その幾何学相似則を $\sqrt[3]{1/10} \cong 1/2.2$ とした。また設計圧縮強度 $f_c = 18 (N/mm^2)$ にて作製した。

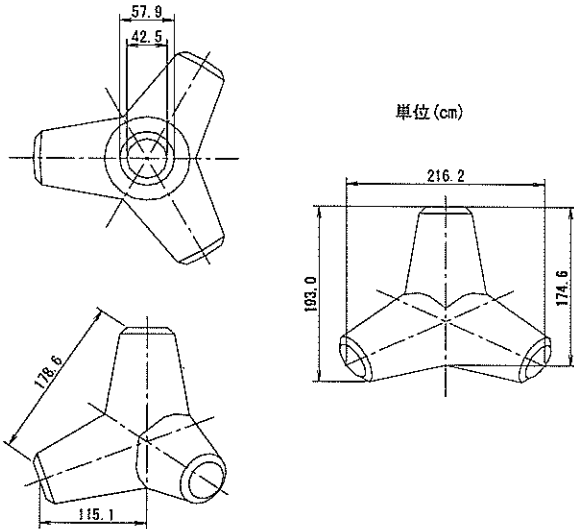


図-4.1 消波ブロックの形状図(5t型)

ケーソン模型は、2.1(2)項に示す穴あき被災が生じた現地断面図(図-2.3, 図-2.4)を模倣して作製した。表-4.1は現地断面におけるケーソンの諸量を示す。

表-4.1 現地ケーソンの諸元

ケーソン形状	B=16m, L=15m, H=14.5m
コンクリート設計圧縮強度	2.4 (N/mm ²)
鉄筋径	D19, D16, D13 (mm)
鉄筋比	0.0021
前面壁厚	0.4 m
有効高さ	0.34 m

これをもとに、ブロックの幾何学相似則とあわせ、壁厚 0.182m, 隔壁距離を 2.022m としたコンクリート版を製作した(図-4.2)。図-4.3 に配筋図およびひずみゲージ取り付け位置を示す。また、図-4.4, 図-4.5 にゲージ取り付け位置に対する拡大図を示す。配筋はモデルとした現地ケーソンと同様とし、その間隔ならびに鉄筋径は幾何学相似則を用いた。ただし、規格の都合から鉄筋径は、 $d=10$ (mm) および $d=6$ (mm) を用いた。

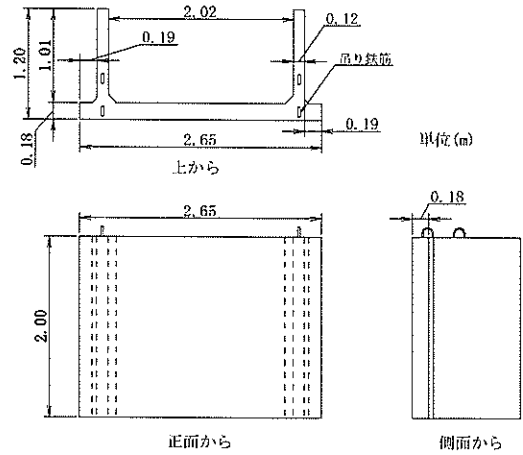


図-4.2 コンクリート版の模型形状図

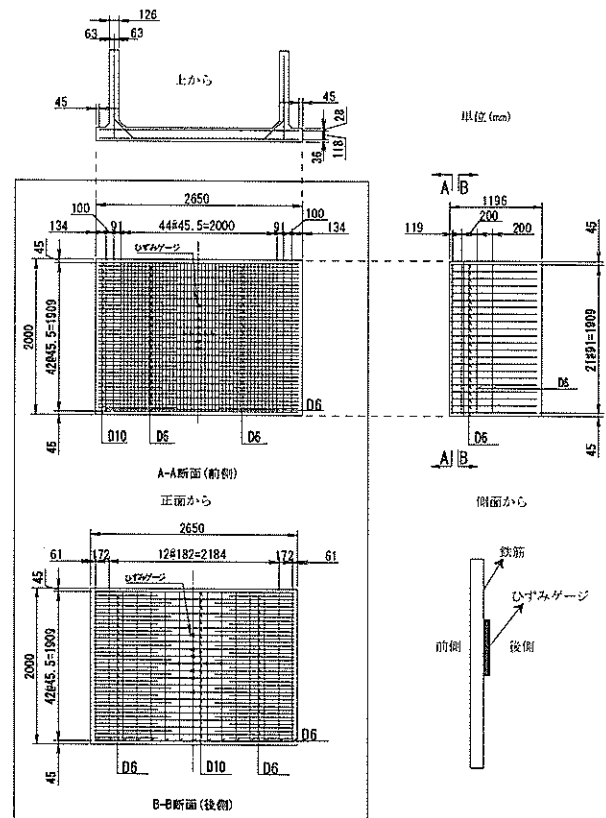


図-4.3 配筋図およびひずみゲージ取り付け位置

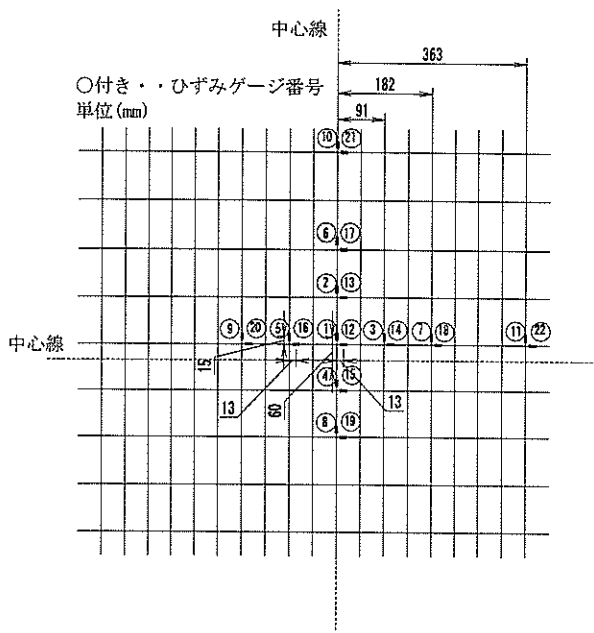


図-4.4 ひずみゲージ取り付け場所(A-A断面・前面)

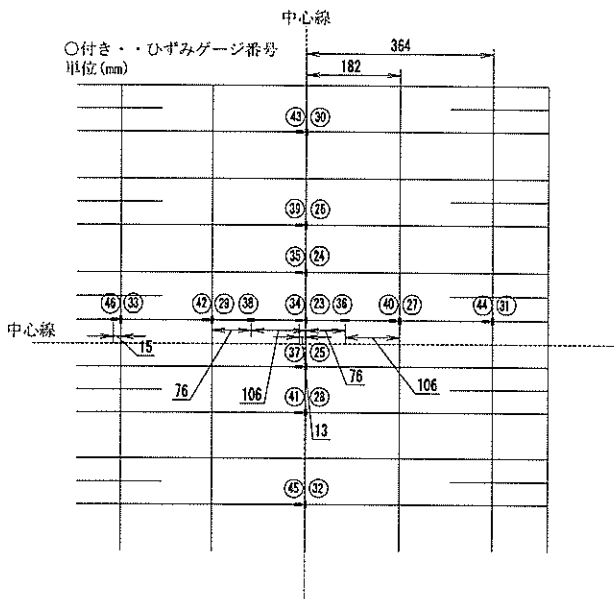


図-4.5 ひずみゲージ取り付け場所(B-B断面・背面)

押し抜きせん断破壊は、衝突面背面(図-4.3中、B-B断面)のほうが応力影響の広いことから、ひずみゲージは、背面のほうにより広い範囲に取り付け、前側(A-A断面)の鉄筋に22本、後側(B-B断面)の鉄筋に24本の合計46本とした。取り付け位置は模型中央の衝突位置を中心とし、縦・横鉄筋の裏側(図-4.4、図-4.5)に取り付けた。

(2) 測定項目

測定項目を表-4.2にまとめる。各計測器は2000Hzにてデータ測定し、実験の様子はデジタルビデオ(30fps)で録画した。衝突面積の測定に、圧力測定フィルムを用いた。これは、

発色剤の入ったマイクロカプセルを塗布したフィルムと顕色剤を塗布したフィルムから構成されており、消波ブロックが衝突した位置のみのカプセルが破れ発色するものである。

衝突後のひび割れ状況の確認は、吊り下げ衝突実験および転落衝突実験では毎回衝突後に行い、ロッキング衝突実験では衝突回数500回毎に行った。

表-4.2 測定機器等

測定機器等	数量	備考
ひずみゲージ	46本	埋め込み鉄筋に取付け
加速度計	4個	消波ブロック3個 模型裏面の岸冲方向1個
デジタルビデオ	4台	全体、上空、裏面、衝突箇所
波高計	5本	ロッキング・転落時使用
流速計	1本	X・Y軸
圧力測定フィルム	—	吊り下げ実験空中の各ケースの1回目のみ
ひび割れ図	—	スケッチと写真

(3) 衝突荷重ならびに衝突速度の算定

衝突速度は加速度 a より、次式を用いて

$$v = \int \frac{da}{dt} dt \quad (4.1)$$

算定した。

また、衝突荷重 F は

$$F = ma \quad (4.2)$$

より算出した。ここで、 m は衝突時質量とする。つまり水中であれば、浮力や慣性力の影響を受けた質量として考える。

4.2 吊り下げ衝突実験

(1) 実験方法

図-4.6に吊り下げ実験の断面図を示す。水路内に鋼製のフレームを設置し、模型を固定させ、衝突時に移動しないよう方塊にて十分な重量を持たせた。衝突体の消波ブロックはH型鋼よりワイヤーで吊し、後方のウインチにて引張り所定の振り角を与えた。天井クレーンにてシャックルのピンを抜くことで切り離し、初速度なしでコンクリート版の中央部に衝突させた。

表-4.3に実験ケースを示す。振り角25度においては

- ・ 中詰砂を用いた場合の衝突力、破壊状況を確認するために模型の隔壁に中詰砂を入れたケース
- ・ コンクリート強度の違いによる破壊状況の確認を行う

ために、 $f_c=36(N/mm^2)$ にて作成した模型でのケース
 ・ 縮尺効果を見るために、衝突体を5t型の消波ブロックから0.5t型の消波ブロックへ変えたケースをそれぞれ行った。中詰め砂のケース，コンクリート強度の違うケースについては，それぞれ5.2節にて結果を示す。

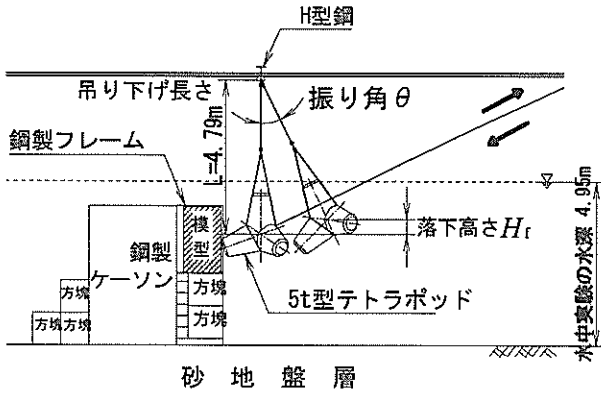


図-4.6 吊り下げ実験断面図

表-4.3 実験ケース

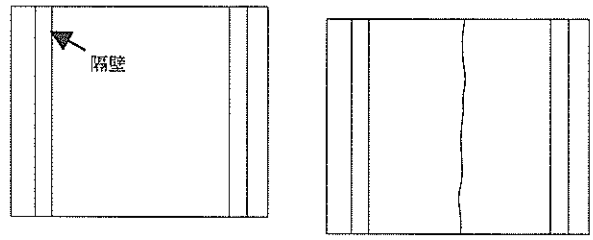
振り角 θ (度)	落下高さ $H(m)$	備考
5	0.018	空中
10	0.072	空中・水中
15	0.163	空中・水中
20	0.289	空中
25	0.449	空中・水中・中詰め砂有り・ $f_c=36N/mm^2 \cdot 0.5$ 型ブロック

(2) 空中実験結果

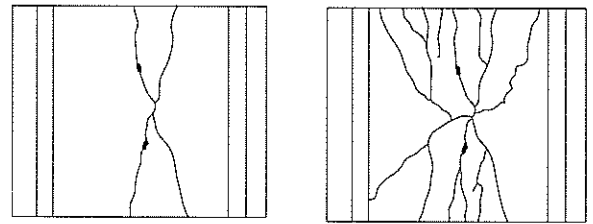
a) 破壊状況

破壊モードは，2.3 節に示す通り全体的な曲げ破壊と局所的な押し抜きせん断破壊になるものと考えられる。

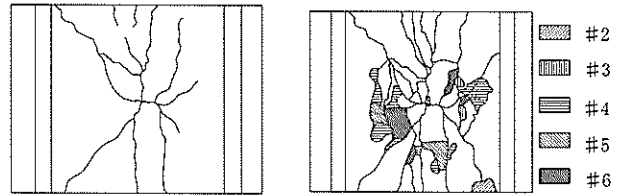
図-4.7 は各振り角の破壊状況のひび割れ図をまとめたものである。左側が衝突回数1回目の破壊状況であり，右側が最終回数の破壊状況図である。図中の#__は衝突回数を示す。観察は衝突面裏側から模型全体をスケッチしたもので，左右にある縦線が模型の隔壁を表している。メッシュ部はコンクリートの剥落箇所を表しており，右図の横に剥落が生じた回数を示した。また，破線にて埋め込み鉄筋の露出が生じた箇所を示した。



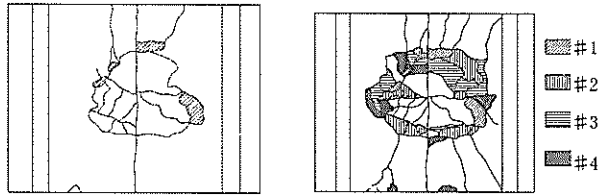
#1 #20
a) 振り角5度



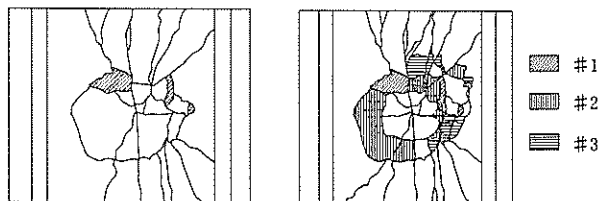
#1 #10
b) 振り角10度



#1 #6
c) 振り角15度



#1 #4
d) 振り角20度



#1 #3
e) 振り角25度

図-4.7 衝突背面のひび割れの様子 (空中衝突)

振り角5度および10度では，縦方向にひび割れが生じ，衝突回数を増しても斜め方向のひび割れが発生するのみで，押し抜きせん断破壊は生じなかった。この縦ひびは曲げによるひび割れであると考えられる。

振り角15度は，衝突回数1～3回目で曲げによるひび割れ

が生じ、衝突回数4回目にて押し抜きせん断破壊が生じた。せん断破壊した後は、衝撃により押し抜き円付近のコンクリートが剥落し、埋め込み鉄筋が露出した。

振り角20度および25度では、衝突回数1回目で押し抜きせん断破壊が生じ、ひび幅は大きなもので約1.5cm程度となった。写真-4.1は振り角25度の3回目の衝突させた後の背面の破壊の様子を示したものである。このように、衝突回数を増しても本実験程度の回数では、押し抜き円付近のコンクリートが剥落していくのみで貫通といった大きな破壊には至らなかった。

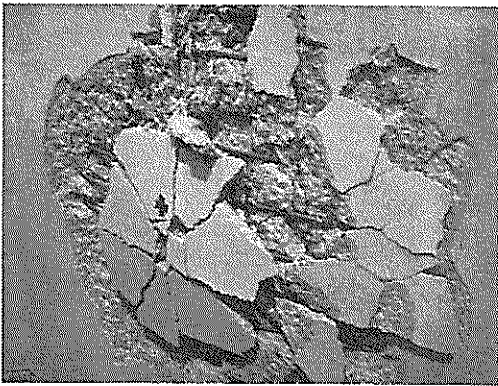
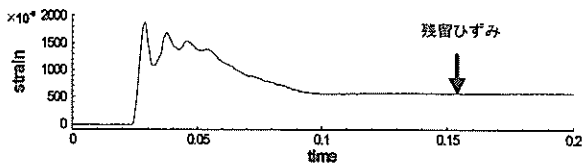


写真-4.1 背面破壊の様子 (空中25度, 3回目)

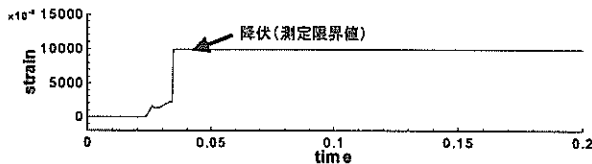
これは、1回目の衝突で模型が降伏したことで剛性が失われたことによるものと思われる。そのため、2回目以降の衝突は、版に力がうまく伝わらず、大きな破壊につながらなかったものと考えられる。

b) ひずみ量

衝突回数1回目における模型中心部の裏側縦鉄筋ひずみ(図-4.5中の25番)の時刻歴波形を図-4.8に示す。これを見ると、振り角15度では弾塑性変形しているのに対し、振り角20度では降伏限界を超え塑性変形をしている。



a) 振り角15度

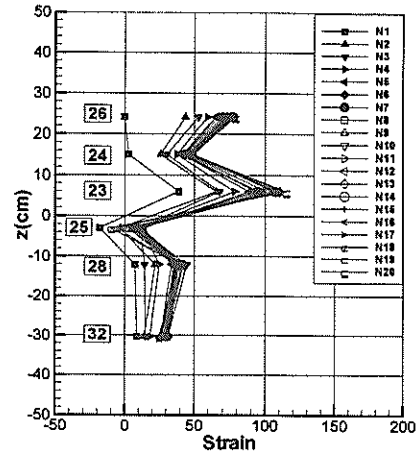


b) 振り角25度

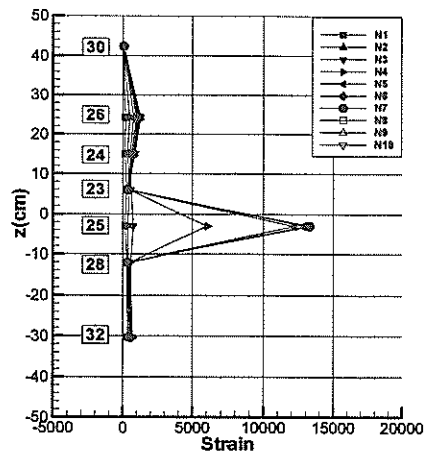
図-4.8 ひずみの時系列波形 (背面・25番)

また、図-4.9にそれぞれの角度の実験における背面縦鉄

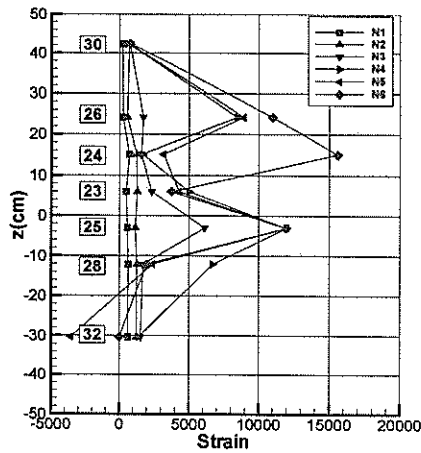
筋の残留ひずみ量を示した。まず、振り角5度では、5回目以降、残留ひずみ量が大きく変化しなくなっている。振り角10度、15度では、数回衝突した後、測定値が振り切れており、20度以降では、一度目から多くの場所で測定値が振り切れていることがわかる。よって、今回の実験では、1回の衝突で押し抜きせん断破壊に達する条件は、振り角15度から20度の間であることがわかる。



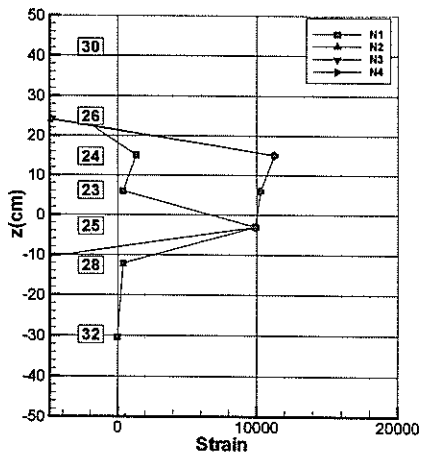
(a) 振り角 5度



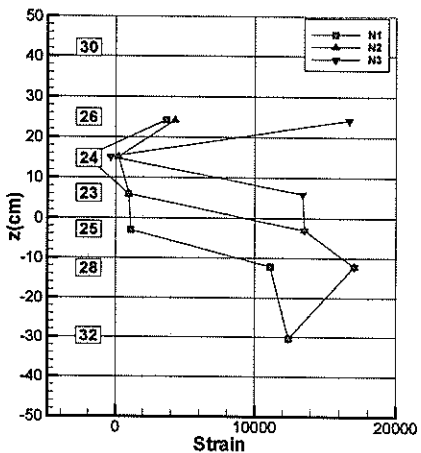
(b) 振り角 10度



(c) 振り角 15度



(d) 振り角 20度



(e) 振り角 25度

図-4.9 背面縦鉄筋の残留ひずみの変化

c) 衝突荷重

衝突荷重は、式(4.2)を用いて計算される。ここでまず、加速度の精度を確認するために、理論式との比較を行うこととした。本実験は初速度なしの自由落下にて衝突速度を与えており、力学的エネルギー保存から求められる衝突速度は、位置エネルギーの関係より $v = \sqrt{2gH}$ となる。これと、式(4.1)から算定される衝突速度との比較を行った。図-4.10は衝突速度と衝突荷重の関係である。これを見ると、加速度が正確に測定されていることがわかる。

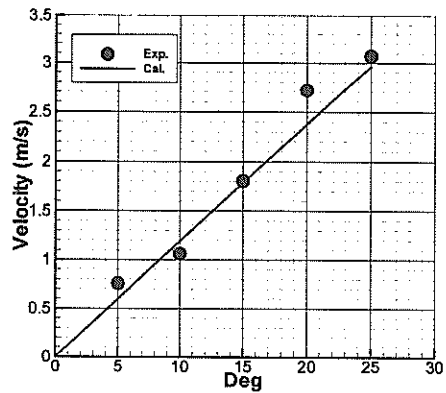


図-4.10 衝突速度の関係

次にその加速度を用いて式(4.2)を用いて衝突荷重を計算した。その結果を図-4.11に示す。ただし、振り角10度は加速度の測定ができなかったため、算定式(3.11)より衝突速度から算出した。

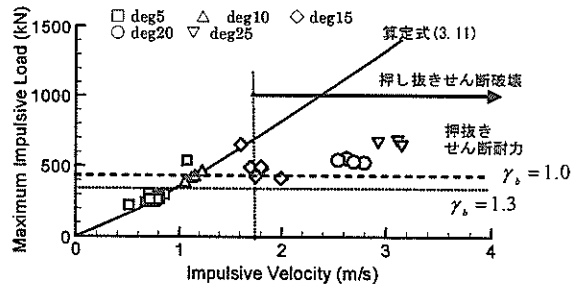


図-4.11 衝突荷重と衝突速度の関係

振り角5度ときには、算定式による計算とよくあっているものの、振り角15度付近で、ずれが生じており、算定式のほうが大きな値となっている。これは、算定式が弾性理論から導出されたものであるが、振り角が大きくなると破壊結果を見てもわかるように、弾塑性変形しているため、壁面の見かけ上の硬さが減少し、衝突力が小さくなると考えられる。しかし、破壊変形するまでは適用可能であることがわかる。

次に壁面の押し抜きせん断耐力との比較を行う。押し抜きせん断耐力は部材係数 γ_s を1.0とした値が約430kN、1.3と

すると約 330kN となり、それぞれ、図-4.11 に示した。

破壊の様子から振り角が 15 度から 20 度の間ぐらいで押し抜きせん断破壊していたと考えられる（衝突速度が 1.7m/s 付近）。その付近では衝突力が押し抜きせん断耐力を越える程度であることがわかる。

一方で、算定式(3.11)で比較した場合、衝突速度が 1.7m/s 付近では 700kN 程度となり、押し抜きせん断耐力を越えている。算定式において、押し抜きせん断耐力と同程度になるのは、衝突速度が 1.2m/s 付近である。

これらのことから、押し抜きせん断耐力により、破壊判定することが可能であること、また、算定式を用いると 60% 程度小さく判定してしまうことが明らかとなった。しかし、算定式を用いて判定をしても、安全側となるために、よって本算定式から得られる衝突力と押し抜きせん断耐力式から得られる耐力を比較することにより、ケーソン壁の穴あき被災を定量的に判定することが可能となった。

d) 衝突面積

図-4.12 は衝突荷重と衝突面積の関係である。衝突面積の測定は空中実験の各ケースの衝突回数 1 回目のみ行った。衝突荷重が増すと衝突体が模型に貫入するため、衝突面積が増加している。実験に使用した 5t 型消波ブロックの脚部端面は半径 0.212m で面積 0.035m² である。振り角 5 度では脚面の約 3% のみの衝突面積であったが、振り角 20 度では約 60% の衝突面積となった。算定式(3.11)で用いている長さ a は、脚の半径の半分であることから、衝突面積を脚の面積の 25% として計算していることとなるが、この図からほぼ平均をとっており妥当であることがわかる。仮に a を倍とした場合、算定される衝突力は、1.14 倍となる。

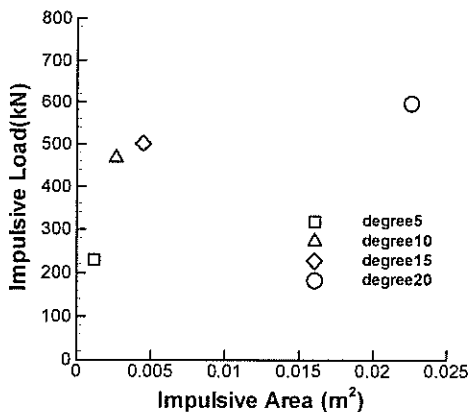


図-4.12 衝突面積と衝突荷重の関係

衝突面積と貫入深さの関係を示したものが図-4.13 である。貫入深さは、ブロックが衝突する際、コンクリート壁面に貫入するが、その深さのことを示す。図中の実線は松富

(1992)に基づく理論値である。松富は、円柱に対して検討したが、それを消波ブロックの形状に適用したものである。

これを見るとオーダー的には問題ないものの、理論と実験の傾きが多少違うものの、ほぼ、貫入深さとの関係を表すことができていると考えられる。ただし、図-4.12 より衝突速度が増しても衝突面積がほぼ変わらない傾向になることから、これ以上に衝突力が大きくなると適用範囲外になることが予想され、今後、この関係について検討する必要があると思われる。

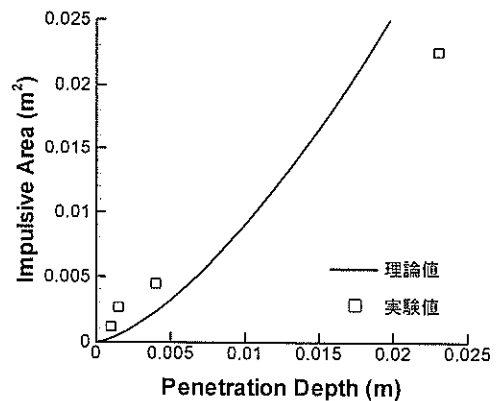


図-4.13 貫入深さと衝突面積の関係

(3) 水中実験結果

a) 破壊状況

水中実験によるひび割れ図を図-4.14 に示す。水中では衝突回数毎に観測ができなかったため、振り角 10 度および 15 度は実験後に模型を水路外に出して観測を行った。各ケースの衝突回数 1 回目のひび割れ図は、模型の背面より撮影した水中カメラの映像より作製した。水中カメラの解像度の影響により、全てのひび割れを観測することができず、映像から目視できるひび割れのみスケッチした。また、模型全体を水中カメラのフレーム内に入れることが不可能であったため、フレーム内のひび割れを図示した。降り角 25 度の衝突回数 1 回目および最終回数も同様に、水中カメラにてひび割れ図を作製した。ひび割れ図は空中実験と同様に左が衝突回数 1 回目、右側が最終回数の図であり、メッシュ部は剥落部である。

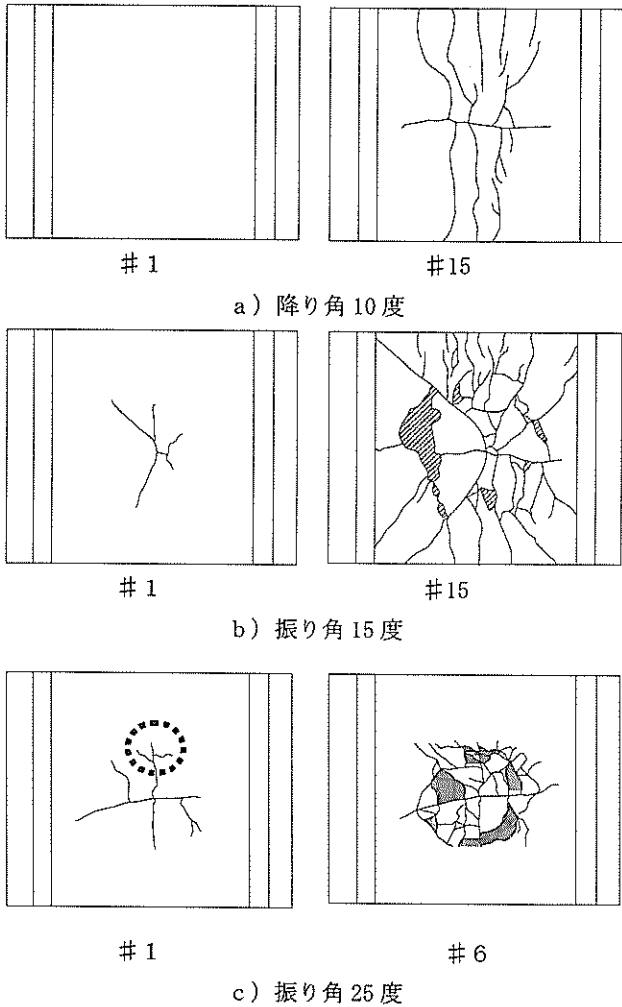


図-4.14 衝突背面のひび割れの様子 (水中衝突)

振り角 10 度の衝突回数 1 回目では映像よりひび割れが確認できず、5 回目で縦方向のひび割れが目視できた。15 回の衝突を行ってもせん断破壊は生じず、縦方向と斜め方向のひび割れのみとなった。

振り角 15 度では衝突回数 1 回目で縦方向のひび割れが生じ、その後の衝突を繰り返すことでひび割れが増加し、10 回目程度から押し抜きせん断破壊が生じた。せん断破壊が生じた後は衝突を繰り返しても大きな変化はなく、押し抜き円付近のコンクリートが剥落したことにより鉄筋が露出した。

振り角 25 度は、衝突回数 1 回目で映像よりはっきりと目視できなかつたが、うっすらと押し抜き円が見られ、図の破線部分より気泡が生じたことから押し抜きせん断破壊をしたと思われる。振り角 15 度と同様にせん断破壊後に衝突を繰り返しても、剥落のみ生じた。また、衝突回数 5 回目で鉄筋が露出した。

b) 衝突速度

水中実験では加速度を測定することができなかつたため、以下の手順にて衝突速度を算出した。

衝突部をほぼ真上からデジタルビデオにより撮影した映像を 1/30 秒に分割して解析を行った。このビデオ画像にはレンズの歪みなどの影響を含んでいるが、ここではその影響は大きくないと仮定して無視した。

まず、撮影した 1 ピクセルあたりの長さを知るために、図-4.15 のように衝突位置とほぼ同じ高さにスタッフを設置した。この画像よりスタッフの目盛り座標を読み取った結果、1pic あたり 7.69mm に相当することがわかった。

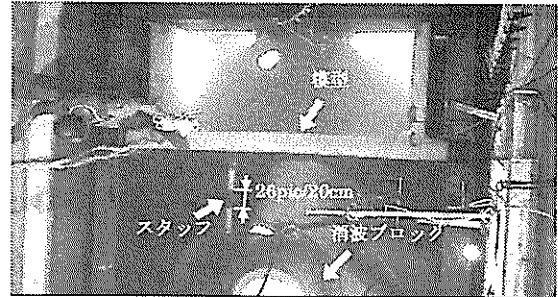


図-4.15 スタッフ設置の様子

次に実験映像を同様に分割し、消波ブロックの目印となる点を決めて 1 コマごとにその点の座標を読み、移動距離を測定した。1 コマごとの速度 v は、

$$v = \frac{d \cdot l}{t} \quad (4.3)$$

- d : 移動コマ数
- l : 1 pic 当たりの長さ (m)
- t : 1 コマあたりの時間 (= 1/30s)

より計算し、この作業を消波ブロックが模型に衝突するまで繰り返し行った。振り角 15、25 度では消波ブロックを所定の角度まで引くとビデオのフレーム内に収まらなくなるため、切り離し直後から速度測定をすることができず、振り角 15、25 度ではフレーム内に消波ブロックが現れてから速度を測り始めた。

図-4.16 に各コマの速度、測定開始から 5 コマずつ移動平均(破線)およびその近似曲線(実線)を示す。近似曲線から、消波ブロックが模型に衝突した時の速度は 10、15、25 度で、それぞれ 0.7、1.1、1.8m/s であることがわかる。

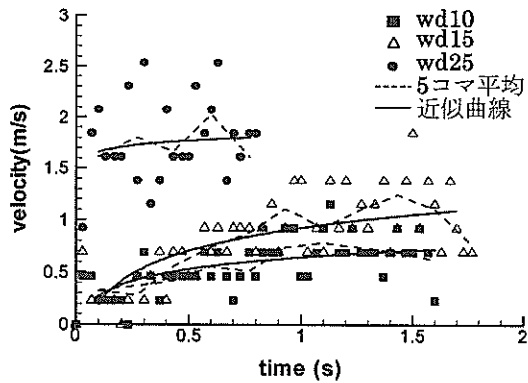


図-4.16 水中速度時系列

今回の実験ケースでは、代表速度 1~2m/s、落下高さ約 1m であったため、レイノルズ数は $10^5 \sim 6$ となる。榊山ら(1989)による消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果から、レイノルズ数が $10^5 \sim 6$ の時の付加質量係数 C_M は 1.6 程度であると推測される。

そこで抗力係数 C_D を変化させた時の理論値と実験値の関係を図-4.17 に示す。

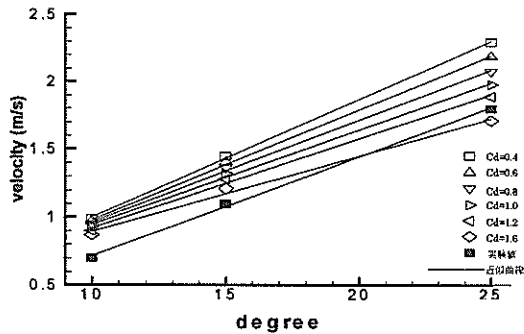


図-4.17 理論値と実験値の関係

抗力係数が大きくなると速度は小さくなり、徐々に実験値に近づいていく。しかし、図を見てもわかるように、いずれか一方の値に近づくといずれか一方は離れるということになる。そこで、速度の計測に誤差が含まれていることを考慮し、全体的な傾向を合わせることにした。図より実験値の傾きと等しくなる C_D は 0.8~1.0 間にあることが分かるため、0.01 刻みで検討した結果(表-4.4)、 $C_D = 0.88$ で傾きが実験値と合致した。そこで、抗力係数を 0.88 と定めることにした。

表-4.4 抗力係数による傾きの違い

ケース	傾き
$C_D = 0.4$	0.087

$C_D = 0.6$	0.081
$C_D = 0.8$	0.0749
$C_D = 1.0$	0.0694
$C_D = 1.2$	0.0653
$C_D = 1.6$	0.0551
実験値	0.0729

$C_D = 0.88$ として理論値を算出すると、消波ブロックが模型に衝突した時の速度は 10, 15, 25 度で 0.9, 1.3, 2.0m/s となった。

c) 衝突荷重

水中実験では加速度がえられなかったため、 $F = ma$ より衝突力を算出できない。そこで、デジタルビデオ映像の解析により求められる衝突速度を用いて、算定式から水中実験の衝突荷重を算出した。

消波ブロックは完全に水没させているので、浮力により消波ブロック質量は空中時の 45.1kN から 35.3kN となる。また、付加質量係数を 1.6 として衝突力を算出した。図-4.18 は水中実験におけるは衝突荷重と衝突速度の関係である。

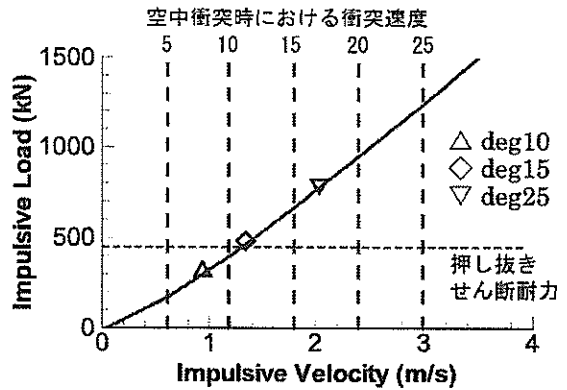


図-4.18 衝突速度と衝突荷重の関係 (水中)

振り角 10 度の衝突荷重は押し抜きせん断耐力の約 6~7 割程度であり、振り角 15 度は約 9 割程度となった。振り角 15 度はせん断耐力よりも若干低い衝突荷重であったため、せん断破壊に至るまでかなりの回数を要している。せん断耐力を越えている 25 度では衝突回数 1 回目で押し抜きせん断破壊が生じていると考えられる。ひび割れ図の結果からも、これらの衝突荷重は妥当であることがわかる。

このように、実現象の海水中においても衝突速度を適切に想定することができれば、算定式を用いて衝突荷重を算出することが可能である。

4.3 ロッキング衝突実験

(1) 実験方法

5t型消波ブロックを方塊の上に設置し、模型と反対側にも方塊を起き消波ブロックを支えることで、ロッキングが起りやすい状態にして実験を行った。水深は、ロッキングが生じやすいようにするため、衝突力測定実験と同様にブロックが半分程度水没するものとした(図-4.19)。

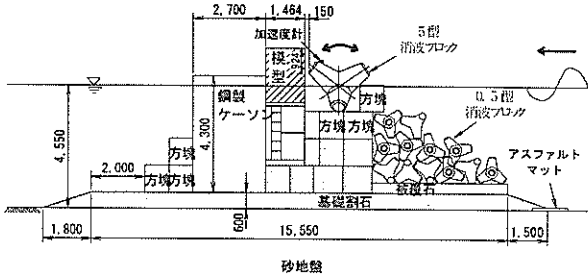


図-4.19 ロッキング実験断面図

実験の波浪条件は水深 $h=4.55\text{m}$ 、周期 $T=6.0\text{s}$ 、波高 $H=0.85\text{m}$ の規則波である。現地換算すると、 $h=10.0\text{m}$ 、 $T=8.9\text{s}$ 、 $H=1.87\text{m}$ となる。実験ケースは衝突回数が 1000 回、5000 回、10000 回、20000 回の 4 ケースで行った。波の作用や衝突力により消波ブロックや方塊がずれた時は、その都度設置し定位置に戻した。また、衝突回数 100 回ごとにひずみ量と加速度を計測し、衝突回数 500 回ごとに模型背面のひび割れ状況の観察を行った。

ロッキング衝突実験における見かけの重量は、水中であるため浮力を考慮すると、消波ブロックが約 1/2 ほど水中に浸かっているため、重量 45.1kN が 35.3kN となる。さらに、消波ブロックの先端に取り付けてある加速度を重心位置の加速度とするため、3.4 節で述べたように以下の補正を行う。

$$\frac{\text{支点から重心までの距離}}{\text{支点から衝突点までの距離}} = \frac{1}{\sqrt{6}}$$

よって加速度に $1/\sqrt{6}$ をかけたものを重心の加速度とした。

(2) 実験結果

a) 破壊状況

写真-4.2 は、衝突回数 20000 回後の衝突部の写真である。

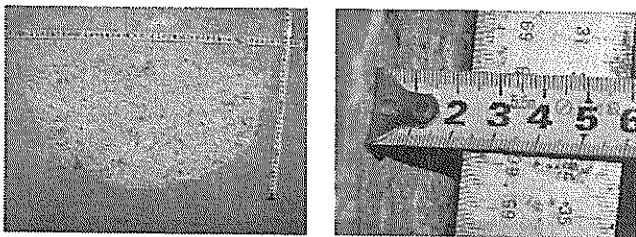


写真-4.2 20000 回後の衝突部

繰り返しの衝突により、模型表面のコンクリートが削られ、幅約 50cm、高さ約 25cm、深さ約 2cm の貫入となった。

貫入面積がここまで広がったのは、消波ブロックも衝突を繰り返すうちに衝突部が削られ、衝突面面積が徐々に拡大したこと、および消波ブロックが一定の位置に止まらず、衝突を繰り返すことで少しずつ移動したことのためである。この移動の際に消波ブロック脚部と方塊の摩擦により、両接点部で摩擦し、ロッキング運動が徐々に起きにくくなった。最終的には、波力を受けても、模型またはケーソン側にもたれたまま衝突を起こさなくなった。その度に、方塊の交換や接点部のずらしを行ったが、一度摩擦が生じると早い場合は数百回程度の衝突回数で静止した。これらは、現地の混成堤においても同じ現象が起きると考えられ、何十万、何百万回という繰り返し衝突を起こすことは困難であると考えられる。

図-4.20 は衝突回数 20000 回後のひび割れ図である。衝突回数 7500 回目から縦方向に長さ 68cm のひび割れが生じ、最終 20000 回ではひび割れが模型の両端部まで生じた。衝突回数 5000 回、10000 回の実験ケースにおいても同様のひび割れが生じた。今回の衝突回数では押し抜きせん断破壊には至らなかった。

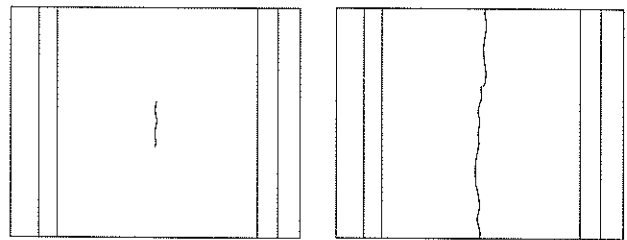


図-4.20 衝突回数 20000 回 ひび割れ図

b) 衝突荷重と衝突速度の関係

吊り下げ実験と同様に $F=ma$ より求めた衝突速度と衝突荷重の関係を図-4.21 に示す。押し抜きせん断耐力の 1~3 割程度の衝突力であったので、ひび割れ図でみたようにせん断破壊は生じず、曲げによる縦方向のみのひび割れとなった。また、重心における衝突速度は 0.1m/s 程度であった。

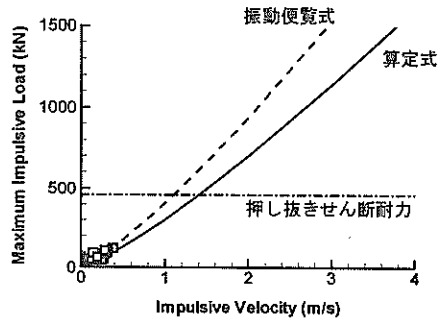
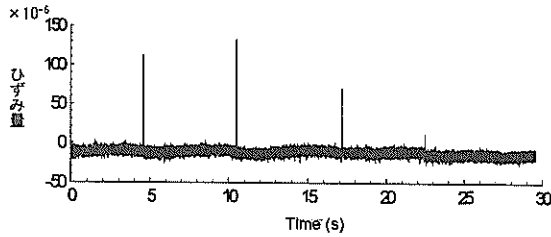


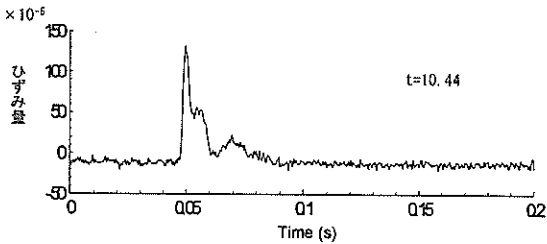
図-4.21 衝突力と衝突速度の関係

c) ひずみ量

図-4.22 にロッキング衝突実験におけるひずみ量測定結果を示す。上段が計測時間全体であり、下段が衝突した10秒付近の拡大図となっている。ゲージ位置は衝突位置にある後側縦方向鉄筋である。一度の衝突で生じるひずみ量は吊り下げ実験のそれと比較すると非常に少なく、顕著な残留ひずみも見られない。ロッキング衝突は衝突荷重が小さいため、弾性変形を繰り返していることがわかる。



a) 時系列全体図



a) 時系列拡大図

図-4.22 ひずみ量の測定結果一例

d) 疲労破壊とロッキングの持続性に対する検討
押し抜きせん断疲労耐力 V_{rpd} は次式より求められる。

$$V_{rpd} = V_{pcd} \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{pcd}} \right) \left(1 - \frac{\log N}{14} \right) \quad (4.4)$$

ここに、 V_{pcd} は式の押し抜きせん断耐力、 V_{pd} は永久荷重用時における設計せん断耐力であるが、 V_{pcd} に対して V_{pd} は極めて小さいため、本研究では考慮しない。また、消波ブロックの約半分が水中にあるので、浮力を考慮し重量を $3.6t$ とした。押し抜きせん断疲労耐力と比較すると図-4.23 となる。

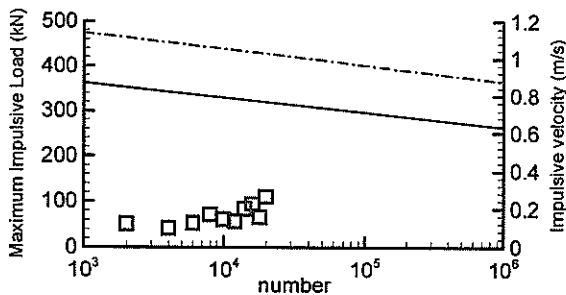


図-4.23 衝突力と押し抜きせん断疲労耐力の比較

結果より、本実験程度の衝突速度によるロッキング衝突で穴あき被災に至る可能性はかなり低いものと考えられる。本実験条件では 10^6 回程度の衝突を繰り返しても、押し抜きせん断破壊が生じる可能性は低いことがわかる。図中の破線はある繰り返し回数で疲労破壊に至るのに必要な衝突速度を示している。これより、重心位置に置いて 10^4 回では 1.05m/s 、 10^6 回では 0.87m/s の衝突速度が必要となる。ロッキング衝突の砕波時の仮想衝突速度は衝突位置において波速の 0.1 倍とし(有川ら, 2003), 10^4 回では波速が 25.7m/s 、 10^6 回では 21.3m/s の砕波が必要となり、水深 5m 程度の本実験では、その状況を作り出すことは困難であり、本実験ではロッキング衝突による押し抜きせん断破壊が生じないことを示唆している。

e) ロッキング衝突の持続性

衝突回数 20000 回における模型前面の衝突部は、幅約 50cm 、高さ約 25cm 、深さ約 2cm の貫入となり、摩耗の影響が大きいことを述べた。実験では、支点部においてはブロック脚部と台座の方塊との摩擦により摩耗し、早いものでは数百回でロッキング衝突が静止している。

本研究において、ロッキング衝突とはケーソンとブロックの $20\sim 30\text{cm}$ 程度の隙間に対して、支点を持って反復する衝突現象と定義しており、上述のことから何万回もの繰り返し衝突が現地で生じることは考えにくい。

また、支点を持つためには、ブロックに作用する波力はその摩擦力以下でなければならず、実験観察より非砕波の際にはブロックの高さの半分以下の波高となる必要があることがわかった。また、作用する波力は流速に比例していると思われることから、砕波時においても非砕波時の速度を上回ることはないと考えた。そこで、ブロック高さの半分の波高による速度をロッキング限界速度とする。

4.4 転落衝突実験

(1) 実験方法

転落衝突実験は、コンクリート壁が疲労した状態の場所に荷重が生じた場合の破壊状況を確認することも目的としているので、試験体はロッキング衝突で疲労したものと未使用の模型を用いた。図-4.24 は転落実験の実験断面図である。

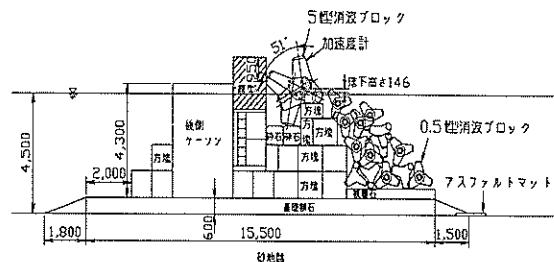


図-4.24 転落実験断面図

5t型消波ブロックを方塊の上に設置し、波力で容易に転落するように模型側に少し角度を持たせた。消波ブロックは、波の作用によって、その位置から約50度回転し、弧を描きながら転落してロッキング衝突位置とほぼ同じ位置に衝突するようにした。消波ブロックが転落した際の重心の落下高さは0.146mである。これは、消波ブロック高さの約1/10であり、吊り下げ実験の振り角に換算すると13度に相当する。波浪条件は、水深 $h=4.5\text{m}$ 、周期 $T=6.0\text{s}$ 、波高 $H=2.0\text{m}$ の規則波であり、現地換算では、 $h=9.9\text{m}$ 、 $T=8.90\text{s}$ 、 $H=4.4\text{m}$ となる。

実験はロッキング衝突実験を行っていないn0版、ロッキング衝突回数1000回のn1000版、同様にn5000版、n10000版、n20000版の5つのケースにて行った。

また、造波機によるノイズがひどかったため、15秒造波してから停止し、ひずみ量と加速度の計測を行った。また、各衝突回数で模型背面のひび割れ状況の観察を行った。

加速度計を衝突脚部の先端に取り付けてあるので、重心位置での加速度とするため補正として3.4節より、

$$\frac{\text{支点から重心までの距離}}{\text{支点から衝突点までの距離}} = \frac{1}{4}$$

となり、加速度に1/4をかけた値を重心の加速度とした。

(2) 実験結果

a) 破壊状況

図-4.25 はn0版とn20000版のひび割れ図である。

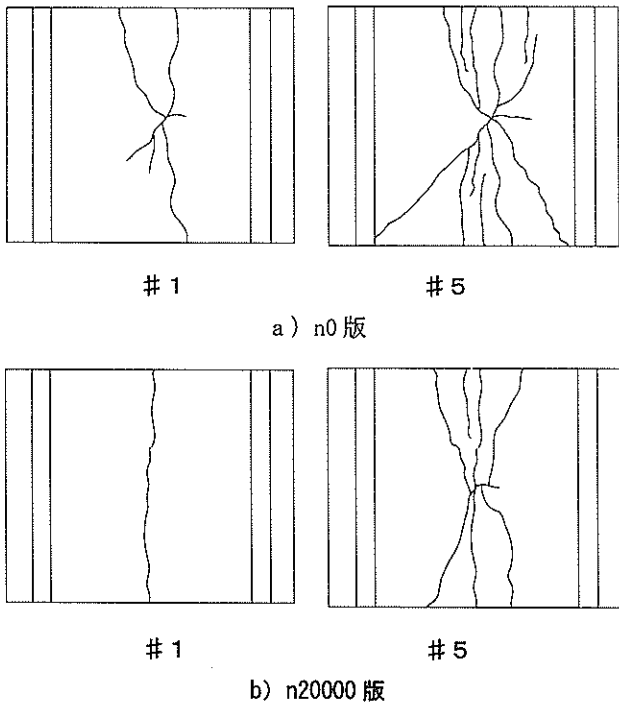


図-4.25 転落実験におけるひび割れ図

衝突回数1回目で吊り下げ実験と同様に曲げによる縦方向

のひび割れが生じた。振り角15度において押し抜きせん断破壊が生じた衝突回数4回を越えても押し抜きせん断破壊は起きなかった。ロッキング疲労させたn20000版においても押し抜きせん断破壊は生じず、破壊状況はn0版と比較して大きな差が確認できなかった。このことから、今回の衝突回数程度では模型の疲労に大きな影響を与えていないことがわかる。

b) 衝突荷重と衝突速度の関係

図-4.26 は衝突荷重と衝突速度の関係である。衝突荷重としては、平均296(kN)で押し抜きせん断耐力の6割程度となった。衝突荷重としては、振り角5~10度と同程度であり、ひび割れ図から見ても10度に類似している。

また、衝突速度の求め方であるが、実験の観測から波による初速を考慮する必要があると考え、波速 $\times 0.1 +$ 自由落下速度とした。さらに、重心位置の衝突速度とするため、衝突位置と重心位置の比である r を1/4とした。本実験の波速は $v = \sqrt{g(h+H)}$ より7.98m/s、落下高さ0.146mの自由落下速度は1.69m/sであり、仮想衝突速度は0.722 m/sとなる。図より仮想衝突速度と実験結果が整合しており、仮想衝突速度から衝突速度を算定できることがわかる。

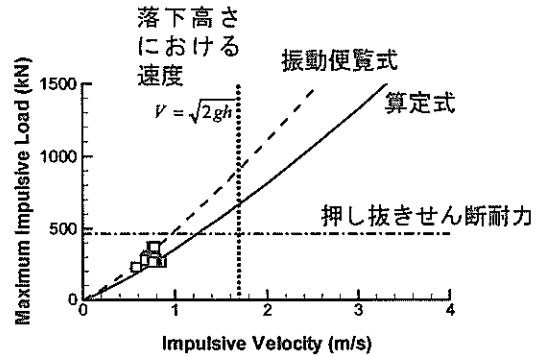


図-4.26 衝突速度と荷重の関係

c) ひずみ量

図-4.27 は転落実験におけるひずみ量の測定結果である。衝突時間は約0.01~0.02秒程度である

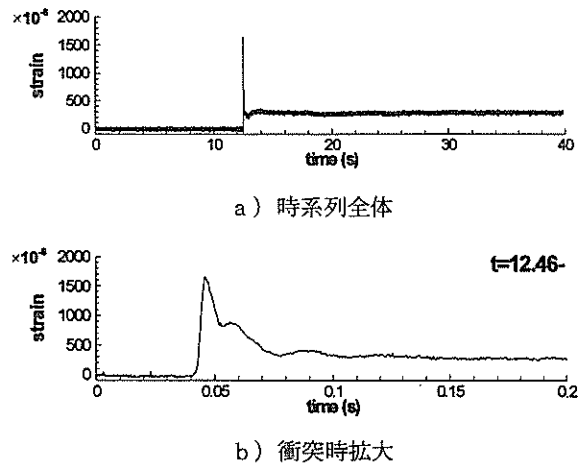


図-4.27 ひずみ量の測定結果一例

4.5 破壊判定の現地適用

(1) 衝突力算定手法のまとめ

吊り下げ実験の結果より、押し抜きせん断破壊を起こすまでを弾性域と仮定すると、弾性変形を仮定した式である算定式(3.11)を用いて、衝突体の質量および速度から衝突荷重を算定することが可能となった。また、衝突力測定実験結果およびRC製模型破壊実験結果より、各衝突パターンにおける重心の衝突速度の想定を行うことができ、実際の衝突パターンにおいても衝突荷重を算定することができた。実験結果より得られた衝突パターンと仮想重心衝突速度および質量の関係を表-4.5にまとめる。

表-4.5 各衝突パターンの衝突速度と質量の関係

衝突パターン	重心位置の仮想衝突速度	浮力の考慮	C_u
ロッキング衝突	砕波時 波速 $\times 0.04$	全体	1.6
	非砕波時 $4H / \sqrt{6T}$	半分	1.0
転落衝突	(波速 $\times 0.1 +$ 自由落下速度)/4	全体	1.6
水平移動衝突	波速 $\times 0.15$	全体	1.6

(2) 現地適用

実際に穴あき被災の生じたH港(図-2.3)にて適用を行った。前面壁の押し抜きせん断耐力は式(2.6)より、約1350kNとなった。一方、被災が生じたと思われる時期に有義波高3.5m、最高波高8m程度の波が来襲していた。ケーソン前面の水深がH.W.L時で15.9mであるから砕波していたと思われる。各衝突パターンでの想定される衝突速度と衝突荷重を、表-4.6に示す。

表-4.6 各衝突パターンでの衝突速度と衝突荷重

衝突パターン	浮力の考慮	C_M	v m/s	F kN
ロッキング	全体	1.6	0.339	428
	半分	1.0	0.339	393
転落	全体	1.6	0.883	1350
水平移動	全体	1.6	2.30	4250

ただし、ロッキングに関しては4.3の考察から $H \leq H_{bl}/2$ のときの速度を限界速度とした。消波ブロックの質量は浮力と C_M を考慮し、式(3.30)を用いて質量 m を求め、衝突速度 v は

重心位置に換算し、衝突荷重 F は式(3.11)を用いて算出した。また、転落衝突の落下高さは0.637mとした。

結果として、水平移動衝突、もしくは重心位置の落下高さが約0.637m以上となる転落衝突により押し抜きせん断破壊が生じる可能性があることがわかる。

(3) 大水深域防波堤におけるロッキング衝突による穴あき被災の可能性

また、ロッキング衝突による破壊の可能性であるが、水深の深い場所では非砕波の波高は大きくなるが、実験よりロッキングが安定して生じる波高は、ブロック高さ H_{bl} の半分程度あることを考えると、50t型消波ブロックでは2m程度と推察される。波高2mの場合、表より0.3~0.4m/s程度の衝突速度となることから40cmの壁厚では破壊に至らないと考えられる。よって、転落や水平移動衝突によりせん断破壊に至っている可能性の方が高いと推察される。しかし、波力を受けたブロックの挙動の詳細を明らかにすることは今後の課題である。

第5章 局所破壊に対する設計へのアプローチ

5.1 ブロック衝突力と壁厚の関係

消波ブロックの衝突による壁面破壊を防ぐためには、さまざまな対策が考えられるが、まず、本実験で得られた結果をもとにして、消波ブロックの衝突力と押し抜きせん断耐力からケーソン壁厚を求める方法を示す。

(1) 計算の流れ

実際の消波ブロック被覆堤においては、まず、設計波高に対して安定であるような消波ブロックの必要重量を求める。そこで、必要なブロックの大きさから、そのときの最大衝突力を求め、その衝突力よりも耐力が大きくなるような壁厚を求めることとする。

(2) 消波ブロックの所要質量

次式で表されるハドソン式を用いて、ブロックの所要質量を計算する。

$$M = \frac{\rho_r H_{1/3}^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (5.1)$$

$$N_s = C_H [a(N_0 / N^{0.5})^{0.2} + b] \quad (5.2)$$

M : コンクリートブロックの所要質量 (t)

ρ_r : コンクリートブロックの密度 (2.3t/m³)

$H_{1/3}$: 有義波高 (m)

S_r : コンクリートブロックの水に対する比重 (2.3)

N_s : ブロックの安定数

N_0 : ブロックの被災数

N : 作用波数

C_H : 砕波の程度を表す係数

a, b : ブロックの形状や斜面勾配などによる係数

を用いて計算を行う。ここでは具体例として、非砕波領域 ($C_H=1.0$), $N=1000$, $N_0=0.3$, $a=2.32$, $b=1.33$ としたときの、必要ブロック質量を図-5.1に示す。

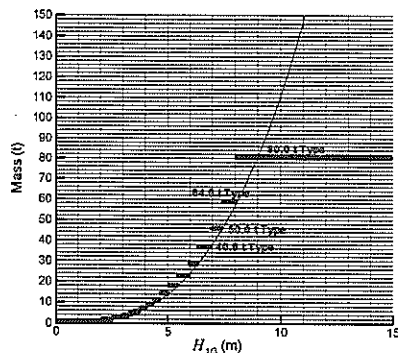


図-5.1 ブロック質量と波高の関係 (ハドソン式)

(3) ブロック衝突力の算定

ブロック衝突力の提案式を再掲すると、

$$F_{max} = 0.25 \left(\frac{2E\sqrt{a_s}}{3(1-\nu^2)} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{5m}{4} \right)^{\frac{1}{3}} \nu^{\frac{2}{3}} \quad (5.3)$$

ここで、

a_s : 消波ブロック脚部先端の半径/2 (m)

E : コンクリートのヤング率 (kN/m²)

ν : ポアソン比

m : 衝突体の質量 (t)

ν : 衝突体の重心位置における衝突速度 (m/s)

となる。設計に用いる場合は、最大の衝突力を想定しておく必要があるために、ブロックが水平衝突したというように考え、その際の衝突力とコンクリートの押し抜きせん断耐力とを比較する。

衝突速度は、水平衝突の場合、

$$\nu = \gamma_i \sqrt{g(h+H)} \quad (5.4)$$

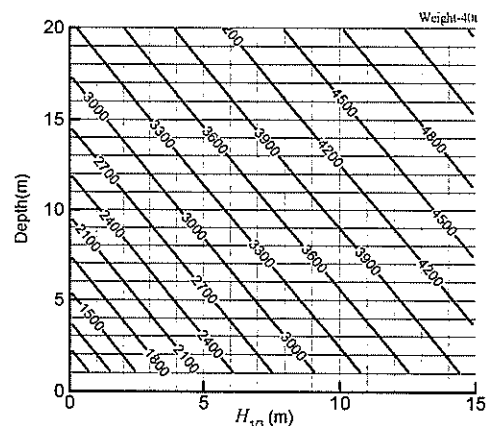
で求められる。ここで、 γ_i は実験より 0.15 である。波高に関しては、設計では有義波高を用いるが、ブロック衝突力を求める際には、壁面破壊が 1 回でもあれば防波堤として機能しないと考えて、最高波高を用い、

$$H = H_{max} = 1.8H_1, \quad (5.5)$$

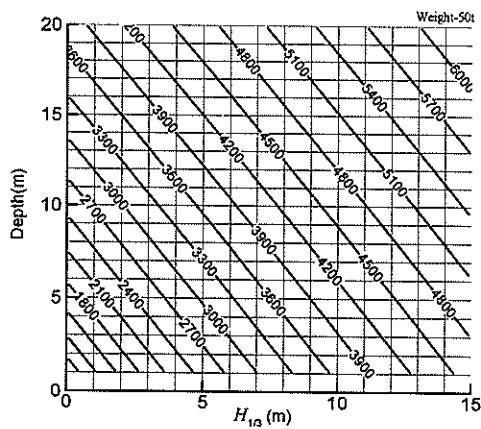
とした。

図-5.2 は、 $E=2.5 \times 10^7$ (kN/m²), $\nu=0.2$ としたときの波高と水深による、各消波ブロック衝突力の等値線を示したものである。

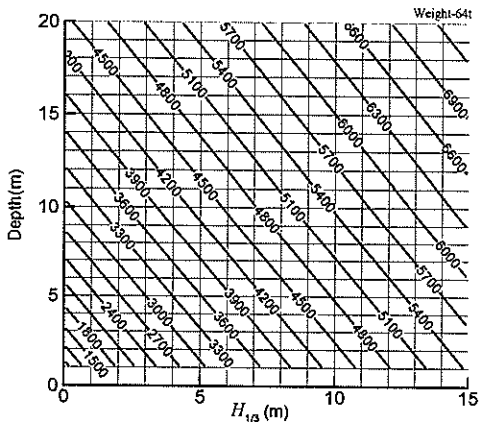
衝突力の計算に際しては、上述のように最高波高を用いており、図中、横軸は有義波高で示しているが、衝突力を計算する際には、その 1.8 倍したものをを用いている。すなわち砕波による波高の減少は考慮せず、最大の衝突速度を (5.4) で計算を行うこととした。



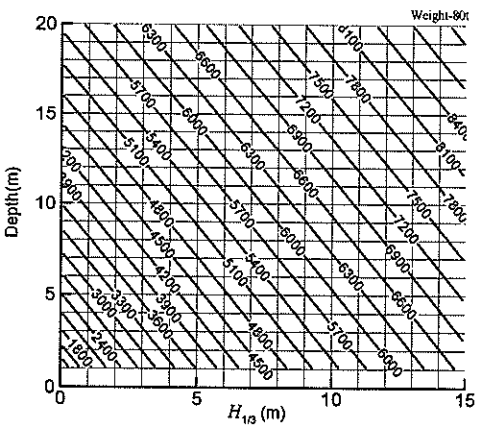
(a) 40 t



(b) 50 t



(c) 64 t



(d) 80 t

図-5.2 波高と水深と衝突力の関係(単位: kN)

(4) 壁厚と押し抜きせん断耐力との関係

押し抜きせん断耐力は,

$$V_{pcd} = \beta_d \beta_p \beta_r f_{pc} u_p d / \gamma_b$$

(5.6)

ここで,

公称せん断強度: $f_{pc} = 0.2\sqrt{f_c}$ (N/mm²)

d についての寸法効果: $\beta_d = \sqrt[3]{1000/d}$ (d : mm)

ただし, $\beta_d > 1.5$ のとき $\beta_d = 1.5$

鉄筋比 p についての影響係数: $\beta_p = \sqrt[3]{100p}$

ただし, $\beta_p > 1.5$ のとき $\beta_p = 1.5$

u_0/d についての影響係数:

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u_0/d)$$

仮想面の周長: $u_p = u_0 + 2\pi \cdot d/2$ (mm)

載荷周長: $u_0 = 2\pi a_b$ (mm)

部材係数: $\gamma_b = 1.3$

である。また, a_b はブロックの脚の半径である。つまり, 押し抜きせん断耐力は, 消波ブロックの大きさによって異なることとなる。

ここで, $p=0.0033$, $f_c=24$ (N/mm²) としたときの壁厚と押し抜きせん断耐力との関係を図-5.3 に示す。

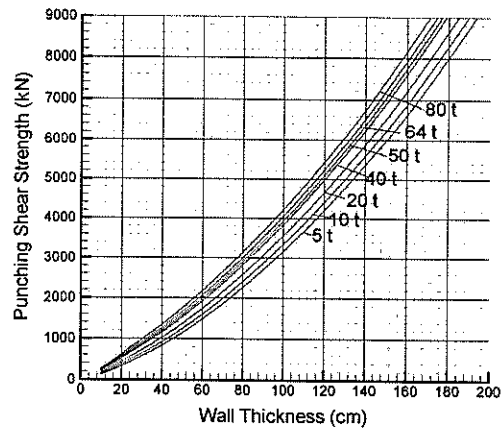


図-5.3 壁圧と押し抜きせん断耐力の関係

(5) 具体例による計算

たとえば, 水深 7m, 設計波高が 3m であった場合, 5t タイプとなるので, 式(5.3)より 535kN 程度となるために, 押し抜きせん断耐力の観点からは, 壁厚 40cm で十分ということになるが, 一方で, 水深 16m, 設計波高 7m であった場合, 消波ブロック 50t タイプとなるので, 図-5.2 (b) より 4650kN 程度の衝突力が生じる可能性があることがわかる。そうすると, 図-5.3 より, 約 115cm の壁圧が必要であることがわかる。

この場合, 完全に押し抜きせん断破壊を防ぐためには, 現状の壁圧の倍程度が必要となる。

5.2 穴あき被災の軽減に対する一考察

消波ブロックによる穴あき被災を軽減させるための対策に対する一考察を行う。

(1) 軽減のための対策の概要

消波ブロックによる穴あき被災の要因は、消波ブロックの衝突によるものである。よって、穴あき被災を軽減させる方法として、消波ブロック側の対策と、ケーソン側の対策とに整理しておく必要がある。

[消波ブロック側の対策]

- ・ 消波ブロックが動かないようにする
- ・ 消波ブロックの衝突力を軽減する

[ケーソン側の対策]

- ・ ケーソンの工夫により衝突力を軽減する
- ・ ケーソン壁面の押し抜きせん断耐力を強化する

ということが考えられる。

消波ブロック側の問題に対しては、本実験から示唆することはできないが、予測できる範囲で考察を行う。

次に、消波ブロックの運動の抑制という点から、移動を生じさせやすい状況を未然に防ぐということが考えられる。移動を生じさせやすい状況には、施工途中・全体的なブロックの沈下等があげられる。よって、そのような状況を防ぐ対策が必要となる。

最後に、消波ブロックの衝突力自体を軽減することが対策としてあげられる。消波ブロックの材質を変える、消波ブロックの脚先にゴムなどの緩衝材を取り付ける等が考えられる。

いずれの対策においても、実験による検証が必要であり、今後の課題となる。

一方で、ケーソン側の問題に対しては、実験結果を交えて次項以降に示すこととする。全体としてまとめると、表-5.1 のようになる。

表-5.1 消波ブロックによる穴あき被災対策の外観

消波ブロック側	使用の制限	—— 全体設計の問題
	運動の抑制	—— 運動を生じさせやすい状況 (施工途中・ブロックの沈下等)
	衝突力の軽減	—— ブロックの材質 (ゴム・脚を折れやすくする等)
ケーソン側	衝突力の軽減	—— 緩衝材 (中詰め砂・ゴム等)
	押し抜きせん断耐力の強化	—— ケーソン構造の変更 (壁厚・せん断補強筋等)

(2) ケーソンの工夫による衝撃力の軽減

a) 中詰め砂の影響

隔壁の中詰め砂による影響を確認するため実験を行った。中詰め砂には中央粒径0.2mmのフラタリーサンド使用し、図-4.2の模型を用い、図-4.6のように置いたときに、コンクリート版模型と背後のケーソンの間に砂を詰めた。そ

の密度は測定の結果1.48t/m³であった。消波ブロックの5t型を25度の角度をつけて衝突させ、中詰め砂がない場合と比較を行った。

図-5.4に残留ひずみの結果を示す。四角で囲まれている番号は、図-4.5に示したひずみゲージの番号を示す。また、丸がついている番号は、実際に衝突した中心付近を表す。これを見ると、1回目は、ほとんど残留量がなく、弾性変形に近いことがわかる。つまり、1回目の衝突では押し抜きせん断破壊に至っていないと考えられる。2回目においては、ほぼすべてのところでせん断破壊に至っている。空中の吊り下げ実験における残留ひずみ量の結果(図-4.9)と比較すると、振り角が15度から20度の間くらいと考えられる。破壊回数から考えると、今回のケースでは、砂を入れていないときの約75%程度の衝突力になっていると予想される。しかし、これは、締め具合などによっても変わるはずであり、定量的に評価するためには、さらなるケースの実験を行う必要がある。

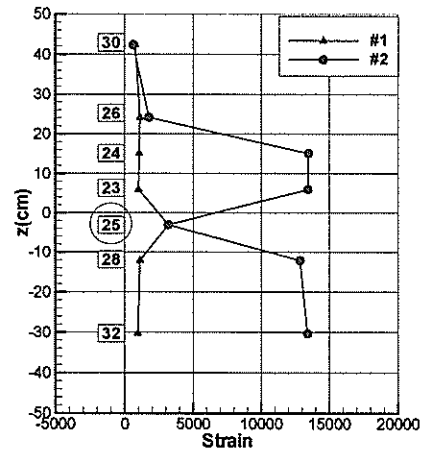


図-5.4 背面縦鉄筋の残留ひずみの変化(砂・25度)
b) ゴムの緩衝効果

ケーソン壁面にゴムを取り付け、衝突荷重を緩和させる方法も一つの対策として考えられ、その緩衝効果を確認するために、衝突力測定実験を行った。

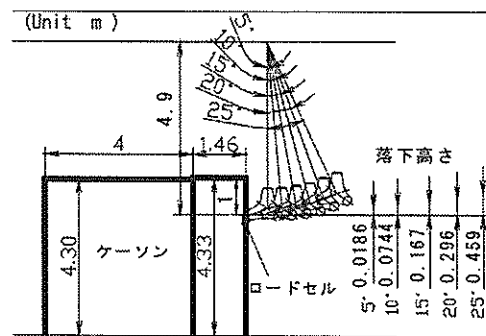


図-5.5 ゴム緩衝効果の確認実験

実験方法は3章の測定実験と同様とし、図-5.5に示すとおり、吊り下げた0.5t型消波ブロックの振り角を変えて壁面に衝突させ、衝突面に取り付けられたロードセルで衝突荷重を測定した。

ゴムは、写真-5.1にみられるようにロードセル前面にボルトで固定し取り付けられた。実験に使用したゴムは硬度64の天然系で、形状は、ゴム一枚が縦15cm×横15cm×厚さ1.2cmであるが、ロードセルへの取り付けのため約0.3cm厚の鉄板も取り付けられており、全部で厚さは1.5cmとなる。1枚および3枚（ゴム厚3.6cm）積層した場合の2ケース行い、衝突荷重を比較した。

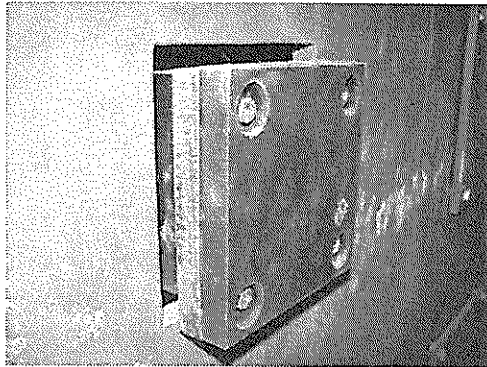


写真-5.1 ロードセルの前に取り付けられたゴム緩衝材

結果を図-5.6に示す。ゴム緩衝材を1枚用いたケースでは、7~8割程度の緩衝効果が、また3枚のケースでは6~7割程度の緩衝効果がえられることがわかる。また、園田ら(2002)は、硬度の違いによる衝撃荷重の影響はほとんどないとしており、緩衝効果は寸法の違いによるもののみと考えてよい。しかし、実験で用いた厚さ3.6cmのゴムを単純に幾何学倍すると、現地では12~13cm相当のゴム厚が必要となり、経済性の検討が必要である。また、直線での衝突力との関係を示したものの、衝突速度が増すにつれて、1枚、3枚ともに、その緩衝効果が小さくなっているようであり、ゴムを取り付ける場合は、その点についても検討する必要がある。

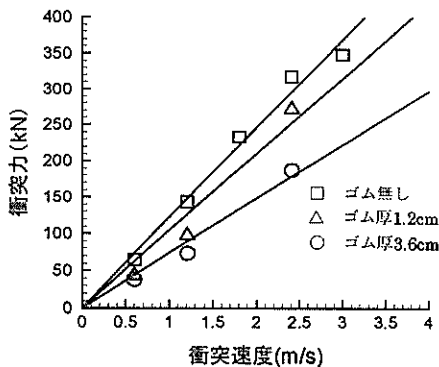


図-5.6 ギュムを取り付けたときの衝突力

(3) 押し抜きせん断耐力の強化

a) 各パラメタの影響

押し抜きせん断耐力は、式(5.6)に示すとおり、複数のパラメタから計算される。そこで、各パラメタを変化させた場合における押し抜きせん断耐力の比較を行った(表-5.2)。

初期値は倍率×1.0に示す値で、各パラメタを1.5倍、2倍に変化させたときの押し抜きせん断耐力を算定した。このとき他のパラメタについては初期値とした。また、コンクリート強度について、36N/mm²を越えると強度が増加してもせん断強度は増加しない場合があるため(土木学会, 1996)、1.5倍のみ検討とした。

表-5.2 各パラメタにおける押し抜きせん断耐力

対策項目	値		押し抜きせん断耐力(kN)	
	初期値	倍率	初期値	倍率
コンクリート設計圧縮強度 N/mm ²	24	×1.0	1330	×1.00
	36	×1.5	1628	×1.22
有効高 m	0.33	×1.0	1330	×1.00
	0.475	×1.5	2185	×1.64
	0.66	×2.0	3182	×2.39
鉄筋比 %	0.26	×1.0	1330	×1.00
	0.39	×1.5	1522	×1.14
	0.52	×2.0	1675	×1.26

せん断耐力は、有効高の変化に対してもっとも反応よく、初期値の1.5倍で強度は1.64倍となる。それに対して、鉄筋比はもっとも効率悪く1.5倍しても1.14倍としかならない。圧縮強度についても、1.2倍程度にしかならないことがわかる。穴があくような状態では、せん断耐力の2倍以上の衝突力が作用していると考えられるため、多少の圧縮強度の増強では、被災の多くはなくなるということがわかる。

b) コンクリート圧縮強度の影響に対する確認実験

そこで、圧縮強度のせん断耐力についての確認を行うため、破壊実験を行った。コンクリート強度は基準の24N/mm²から36N/mm²に強化した。振角25度で消波ブロック5t型を衝突させた。

押し抜きせん断耐力は表-5.2から、1.2倍程度になると考えられる。

図-5.7は、ひずみの変化であるが、圧縮強度が24kNの空中の25度の結果と大きくは変化していない。

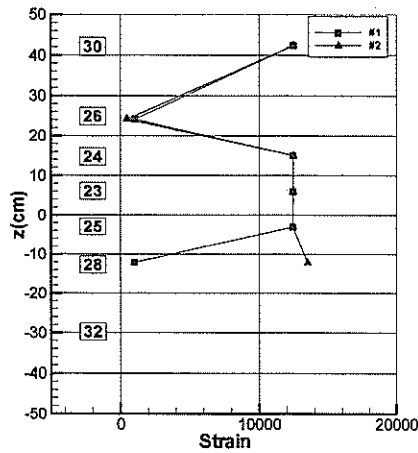


図-5.7 背面縦鉄筋の残留ひずみ (圧縮強度 36N/mm²)

図-5.8 は、衝突背面のひび割れの様子を示している。これより圧縮強度が 24N/mm² のときと比較して、破壊の状態は多少軽減されているものの、破壊そのものは防ぐことができていないことがわかる。

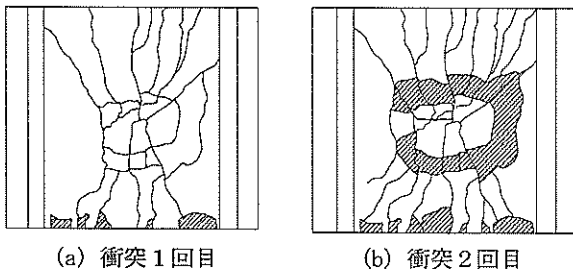


図-5.8 衝突背面ひび割れ図 (圧縮強度 36N/mm²)

そのようなことから考えて、押しぬきせん断耐力を衝突力が大きく上回るような衝突力が作用した場合、多少耐力をあげるだけでは大きな効果が望めないことがわかる。

5.3 設計手法に対するアプローチ

(1) 穴あきメカニズムに対する考察

第4章での破壊実験においては、現地被災で見られるような穴あきには至らず、衝突背面が剥離する程度でとどまった。また、2.3(3)で示されている貫通が生じる程度の衝

突速度を出すためには、相当大きな波高が起きる必要がある。また、中詰め砂があれば、なおさら、一度で貫通という現象は生じにくいと考えられる。

よって、消波ブロックによる穴あきのメカニズムは、まず、一旦背面が剥離する程度の押し抜きせん断破壊が生じ、その弱くなった部分に、波浪による力、内部と外部との圧力差による力、内部・外部からの浸透水による力、新たなブロックがさらに衝突することによる力等が加わり、徐々に大きな穴に進行していくと考えられる。

つまり、押し抜きせん断破壊がなされるような状況になると、穴が一度であくような大きな破壊力はなくとも、ケーソン壁に穴があいてしまうわけである。

そのため、設計としては、押し抜きせん断破壊されないようにするという考えなければならない。

(2) 設計手法に対するアプローチ

2.1(3)でも述べているように、現時点ではケーソンの壁厚の決定に、ブロック重量が関係しているわけではない。今後、5.2節で検討したような対策などをする必要があるのかどうかということに対しては、議論の余地が残されている。

まず、対策方法について、5.2節で検討した対策は、数ある対策の一部であり、そこについてさらに詰めていく必要がある。

次に、コスト面の検討をしなければならない。建設コストの最適化が求められるようになり、穴があく確率と、その事前対応をどこまでするのかというコストパフォーマンスの検討を行う必要がある。

しかし、一方で穴があいて、万が一にも壊れるような防波堤では、いざというときに、その後背領域の安全性の確保がなされないために、そもそも、穴があくような状況を作るのは不適切である。

そうすると、ケーソン壁の対策だけではなく、消波ブロックが動かないような設計・施工手法を含めた、包括的な設計手法の提案を行う必要がある。そのためには、ブロックの波による挙動、砂との相互作用等を明確にし、より定量的な議論ができるようにしていくことが今後の課題となる。

第6章 まとめ

本研究におけるまとめを行う。

- ・ 消波ブロックによるケーソン壁面に対する衝突力について測定を行い、弾性理論を用いて算定式を提案した。
- ・ 想定される代表的な衝突パターンについて、それぞれの衝突力を測定し、算定方法の妥当性について検討した。
- ・ ケーソン壁模型を作製し、それに消波ブロックを衝突させ、その破壊の様子を検討した。また、それにより、静的な押し抜きせん断耐力を用いて、押し抜きせん断破壊の判定ができることを確認した。
- ・ ロッキング衝突のような繰り返し衝突について検討したところ、本研究で定義されるようなロッキング衝突では、穴のあく可能性がないことが確認された。
- ・ 実験を通して得られた知見から、消波ブロックの衝突力と壁厚の関係を計算し、設計へのアプローチのための検討を行った。
- ・ 穴あき被災軽減に対する対策について、一部実験を交えて検討を行った。

最後に、本研究の実施にあたり、早稲田大学の清宮教授、防衛大の大野教授、山口様、近畿地方整備局中道様、港湾空港技術研究所の高橋調整官、元海洋・水工部佐藤部長、地盤・構造部の横田室長、岩波主任研究官に貴重なご助言をいただいている。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 有川太郎, 織田朋也, 黒田豊和, 下迫健一郎 (2003): 消波工によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, vol. 50, pp. 716-720.
- 伊藤千浩, 大沼博志, 白井孝治 (1991): 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, 電力中央研究所・総合報告, 135p.

- 運輸省港湾局 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), 日本港湾協会
- 角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫 (1974): 鉄筋コンクリートスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集, vol. 229, pp. 105-115.
- 川瀬良司, 池田憲二, 今野久志, 岸徳光 (2002): 落石防護揚壁の耐衝撃向上工法に関する実験的研究, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp. 251-254.
- 園田佳巨, 西本安志, 彦坂熙 (2003): ゴム製緩衝材の衝撃緩衝効果に関する解析的考察, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp. 169-174.
- 下迫健一郎, 高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, vol. 37, No. 3, 30p.
- 下迫健一郎, 多田清富 (2003): 混成堤の性能照査型設計法における滑動量の許容値設定に関する検討, vol. 50, pp. 766-770.
- 高橋重雄, 谷本勝利, 下迫健一郎, 細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸工学論文集, vol. 39, pp. 676-680.
- 高橋重雄, 津田宗男, 下迫健一郎, 横田弘, 清宮理 (1998): 防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃砕波力について, 海岸工学論文集, vol. 45, pp. 751-755.
- 高橋重雄 (2003): 海域施設の性能設計の考え方とその設計適用, 2003年度(第39回)水工学に関する夏期研修会講義集Bコース, B-1.
- 土木学会 (1996): コンクリート標準示方書, 設計編, pp. 65-104.
- 日本道路協会 (2000): 落石対策便覧, pp. 268-273.
- 松尾修, 堤達也, 近藤浩市 (1995): 落石衝突に関する重錘落下実験報告書, 第3340号, 98p.
- 松富英夫 (1995): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 111-127