

不規則波の入射に伴うケーソン護岸連結目地内での流体共振特性

斎藤武久¹・藤井 誠²・G.P. Miao³・石田 啓⁴

本研究では、ケーソン護岸連結目地内へ不規則波が入射する場合を対象として、目地内での流体運動特性、特に、流体共振現象の発生の有無、発生条件および発生規模を実験的に考究する。実験結果より、不規則波が入射した場合においても、規則波入射の際に確認されている場合と同様な流体共振現象が目地内で発生することを確認した。また、流体共振の発生は、入射波の周波数帯域に含まれる共振周波数（規則波の場合の流体共振発生周波数）の有無から特定できることが明らかになった。さらに、目地内波高の増幅率を入射波に含まれる共振周波数成分比で整理した場合、流体共振の発生規模は、共振周波数成分比の増加にほぼ線形的に比例することが分かった。

1. 緒 論

ケーソン護岸背後域における陥没の発生を回避することは、護岸自身の安定性を保持することに留まらず、隣接する施設の安全性を確保するうえで極めて重要な課題である。これに関連して、ケーソン護岸背後砂の吸出し発生メカニズムなどに関して、これまで多くの議論（例えば、高橋ら、1995；重村ら、2002）が行われ、陥没の発生に関する多くの知見が得られている。しかしながら、現象は、波と構造物、さらに砂地盤といった多くの要因が複雑に関連しているため、発生した陥没の原因を特定するには困難な事が多く、現実問題として試行錯誤的な対策により被災軽減を行っているのが現状と言える。

一方で、ケーソン護岸連結目地の防砂板の破損に伴う背後砂の流れ出しが主な事故原因と報告された大蔵海岸陥没事故（土木学会海岸工学委員会、2002）を教訓に、連結目地に関連した多くの検討事項が挙げられている。中でも、防砂板に対して主要な外力となる目地内の波力を評価することは重要な事項であり、再発防止に向けて、連結目地内の流体運動を正確に把握することが必要不可欠と考えられる。

この連結目地内での流体運動に関して、著者ら（斎藤ら、2004、2005）は、規則波の入射に伴う目地内での流体運動特性を、理論解析および実験により検討し、目地のような微小間隙内でも流体共振現象が発生すること、さらに、流体共振発生時の目地内波高は極端に増幅され、静穏時の入射波高の 10 倍を超えるなど、目地内の流体運動に伴う多くの危険性を明らかにしてきた。

本研究では、規則波入射の場合に得られた目地内での流体共振特性を基礎に研究を進展させ、実際の海象条件下における目地内での流体共振特性の解明を目的とし、

不規則波の入射に伴う目地内での流体共振の発生の有無および発生条件とその規模を実験的に考究する。

2. 実験装置および実験方法

図-1 に実験装置の概要を示す。実験には、一端に吸収式不規則造波機が装備された長さ 14 m、幅 80 cm、高さ 1 m の 2 次元造波水槽を用いた。水槽中央部に、長さ $L=77$ cm、幅 38.5 cm の 2 つのアクリル製ケーソンを、目地幅 $2a=3$ cm として設置し、岸側端部を遮水ブロックで遮水して、ケーソン護岸へ不規則波が直角入射する場合を再現した。なお、実際のケーソン護岸は、マウンドおよび消波ブロック等を伴うが、本研究では、最も基礎となる目地内での流体共振の発生と入射波特性との関係に着目するため、他の影響を除いた最も単純な模型を用いた。水深は $h=20$ cm に固定し、入射波にブレットシュナイダー・光易型周波数スペクトルを有する、有義波高

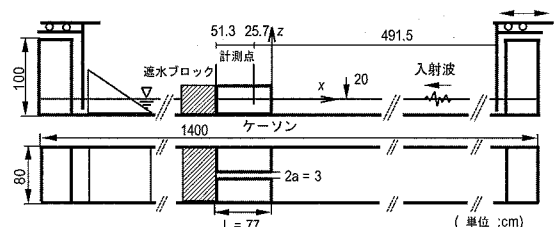


図-1 実験装置

表-1 入射波条件

Case	1	2	3	4	5
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	2.2	2.3	1.8	2.3	2.7
有義周期 $T_{1/3}$ (s)	0.62	0.91	0.96	0.94	0.94
Case	6	7	8	9	10
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	3.1	2.3	2.4	2.3	1.8
有義周期 $T_{1/3}$ (s)	0.94	1.57	2.03	2.27	2.23
Case	11	12	13	14	15
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	2.3	2.9	3.3	2.9	2.7
有義周期 $T_{1/3}$ (s)	2.31	2.27	2.20	3.08	4.92

1 正 会 員 博(工) 金沢大学大学院助教授 自然科学研究科
2 修(工) 福井県 土木部
3 Ph.D Prof. of Shanghai Jiao Tong University
4 フェロー 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科

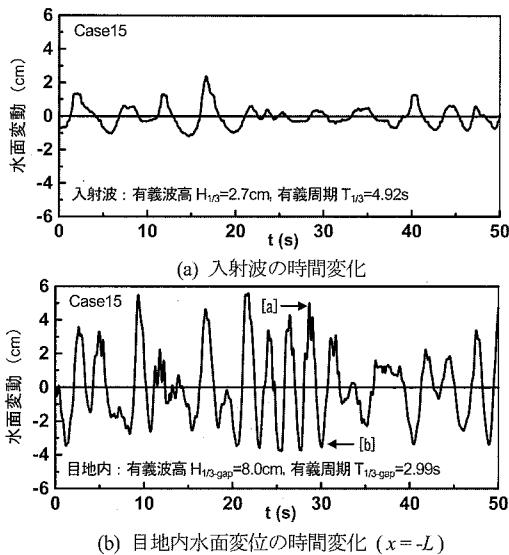


図-2 入射波および目地内水面変位の時間変化特性

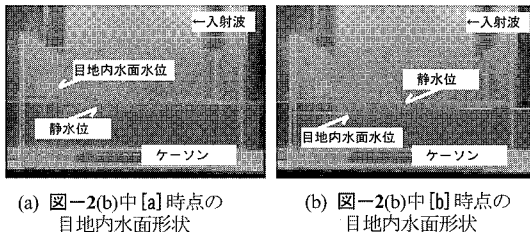


図-3 目地内の水面形状特性

$H_{1/3}=1.8\sim 3.3$ cm, 有義周期 $T_{1/3}=0.62\sim 4.92$ s の不規則波を採用し、表-1 に示す 15 ケースについて、入射波および目地内水面変位の時間変化、さらに、目地内の水面形状の画像データを取得した。水位の計測は、入射波および目地内水位ともに容量式波高計を用いて行い、水面形状の画像データは水槽側面に設置したデジタルビデオカメラを用いて行った。なお、目地内水面変位は、目地岸側端部を含む 2 箇所計測を行い、入射波の計測は、ケーソン護岸設置前に水槽中央部で行った。水面変動記録および画像データともに、造波開始から 60 s 経過後に計測を開始し、水位計測では、サンプリング間隔を 100 Hz とした 100 s 間のデータを取得している。ところで、有義波高および有義周期の実験値を算定する場合、データに含まれる電気ノイズなどに起因した高周波成分の除去が必要となる。これらの除去方法に関して多くの議論があるが、本研究では、取得された実験データに 5 Hz のローパスフィルターを施すことによりノイズカットを行った。

取得された実験データに関して、本研究では、まず、目地内水面変動の波別解析および画像データの水面形状特性から、目地内での流体共振の発生の有無を確認する。次に、スペクトル解析に基づく入射波と目地内水面変動

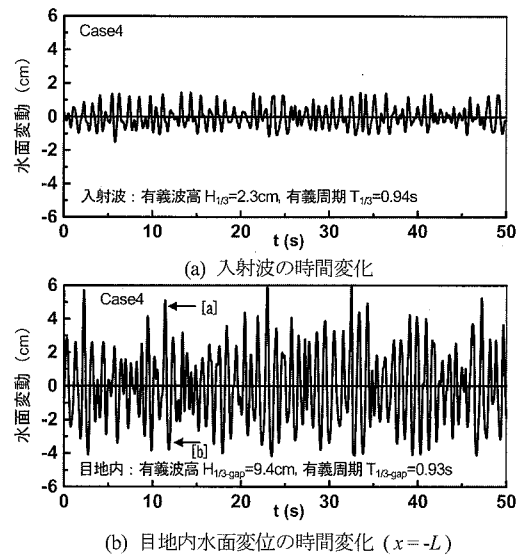


図-4 入射波および目地内水面変位の時間変化特性

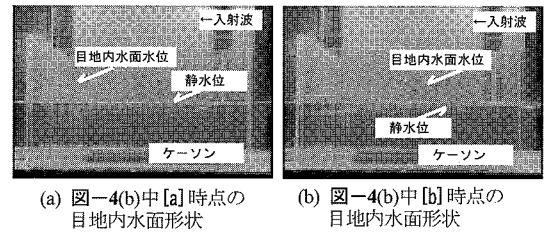


図-5 目地内の水面形状特性

の周波数分析を行い、規則波入射時に目地内での流体共振の発生が理論的・実験的に確認されている 1 次と 2 次の流体共振発生周波数（以下、共振周波数と略記する）との関係から、流体共振の発生条件と発生規模を定量的に評価する。なお、本研究で対象とする連結目地の形状比 $2a/L=0.039$ の場合、規則波入射時の目地内での流体共振の発生は、1 次モード（目地岸側端部で腹、目地沖側端部で節に近い水面形状の発生）が共振周波数 $f_1=0.42$ Hz ($T_1=2.38$ s) の場合、2 次モード（目地岸側端部および目地沖側端部から目地内へ $L/3$ の位置で腹に近い水面形状の発生）が共振周波数 $f_2=1.09$ Hz ($T_2=0.92$ s) の場合である（斎藤ら, 2004）。以上を踏まえて、本研究で対象とする入射波条件は、上述の 1 次および 2 次の共振周波数を含む範囲、さらに、流体共振発生時に目地内での波高増幅を際立たせるため、有義波高が比較的小さな範囲を採用している。

3. 実験結果および考察

(1) 目地内における水面変位の時間変化特性および水面形状特性

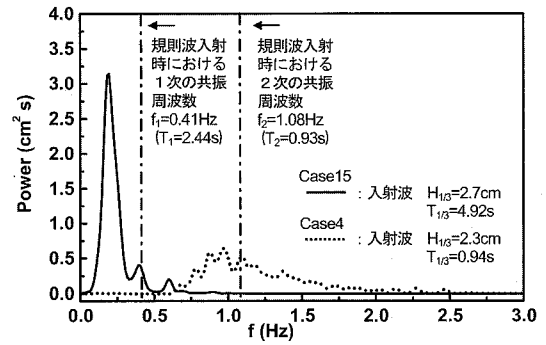
図-2 に、入射波の有義波高 $H_{1/3}=2.7$ cm, 有義周期

表-2 目地内の水面変動特性

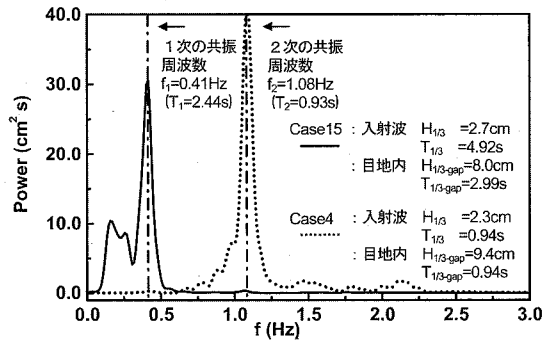
Case	1	2	3	4	5
有義波高 $H_{1/3-gap}$ (cm)	7.9	8.6	7.7	9.4	11.9
有義周期 $T_{1/3-gap}$ (s)	0.72	0.90	0.91	0.93	0.92
Case	6	7	8	9	10
有義波高 $H_{1/3-gap}$ (cm)	13.6	10.6	13.2	14.4	14.2
有義周期 $T_{1/3-gap}$ (s)	0.94	1.48	2.20	2.42	2.44
Case	11	12	13	14	15
有義波高 $H_{1/3-gap}$ (cm)	12.0	14.9	17.4	11.4	8.0
有義周期 $T_{1/3-gap}$ (s)	2.39	2.51	2.53	2.43	2.99

$T_{1/3}=4.92$ s の場合 (Case15) に計測された、入射波および目地岸側端部 $x=-L$ での水面変動記録を示す。目地内では、入射波が極端に増幅されて目地内の有義波高 $H_{1/3-gap}$ が 8.0 cm に達し、その有義周期 $T_{1/3-gap}$ は入射波の有義周期 4.92 s から大きく離れ、1 次の共振周波数 $f_1=0.41$ Hz ($T_1=2.44$ s) に近い 2.99 s となった。さらに、図-2(b)に見られる極端な目地内波高増幅時の水面形状を図-3 に例示するが、目地岸側端部を腹とする 1 次モードに近い流体共振の発生が確認できる。以上の結果は、目地内において、入射波の周期特性とは異なった周期特性による特異な水面変動が発生していることを表し、規則波入射時に類似した流体共振の発生を示すものである。なお、 $T_{1/3}=4.92$ s を目標に造波を行う場合、ケーソン護岸と造波板との距離的な制約から、周波数スペクトルを目標値と厳密に一致させるには困難が予想される。そのため、このようなケースでは、ケーソン前面での安定した造波に加えて、目地外で同時に計測された波高データのピーク周波数が入射波の有義周期から極端に乖離していないことを確認している。一方、入射波の有義周期が、2 次の共振周波数 $f_2=1.09$ Hz ($T_2=0.92$ s) に近い $T_{1/3}=0.94$ s、 $H_{1/3}=2.3$ cm の場合 (Case4) の入射波および目地岸側端部での水面変動記録を図-4 に示す。この場合、目地内の有義周期 $T_{1/3-gap}$ は入射波の有義周期とほぼ一致し、目地内有義波高 $H_{1/3-gap}$ が 9.4 cm に増幅された。このときの目地内水面形状を図-5 に例示するが、2 次モードに近い流体共振の発生が確認できる。

ここで、表-2 に、本研究で対象とした全ての実験ケースについて、波別解析により整理した目地内の水面変動特性を示す。なお、表-1 より、Case3, 4, 5 および 6 と Case10, 11, 12 および 13 は、それぞれ、入射波の有義周期が 2 次と 1 次の共振周波数に近い場合で、かつ有義波高を順に大きくした場合に対応している。表より、全てのケースにおいて、目地内の有義波高は大きく増幅され、さらに、Case1 および Case7 の場合を除いて、目地内有義周期は、1 次の共振周波数 $f_1=0.41$ Hz



(a) 入射波のスペクトル特性



(b) 目地内水面変動のスペクトル特性

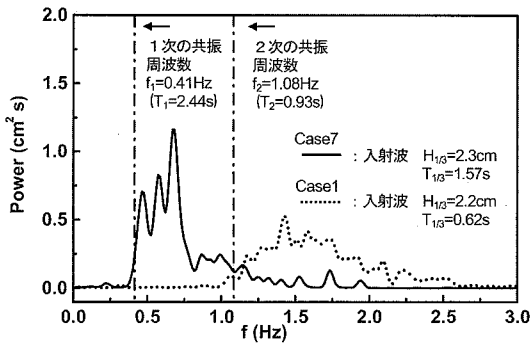
図-6 入射波と目地内水面変動のスペクトル特性 Case15 ($H_{1/3}=2.7$ cm, $T_{1/3}=4.99$ s) および Case4 ($H_{1/3}=2.3$ cm, $T_{1/3}=0.94$ s) の場合

($T_1=2.44$ s) もしくは、2 次の共振周波数 $f_2=1.09$ Hz ($T_2=0.92$ s) に近い値となっていることが分かる。また、入射波の有義周期がほぼ等しく、有義波高を大きくした Case3, 4, 5 および 6 と Case10, 11, 12 および 13 の場合、目地内での有義波高は、入射波高の増加とともに増加する傾向が確認できる。なお、予備実験により、目地内で流体共振が発生する場合、入射波の有義波高の増加に伴って、目地岸側端部での水塊の跳ね上がりや、目地内での碎波が確認されている。このようなケースに関しては、内部の流速および流体力特性の検討も含めて今後の課題とする。

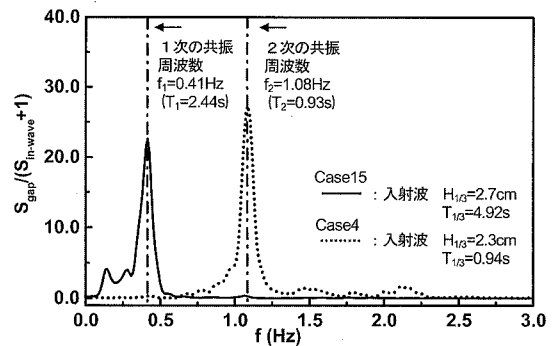
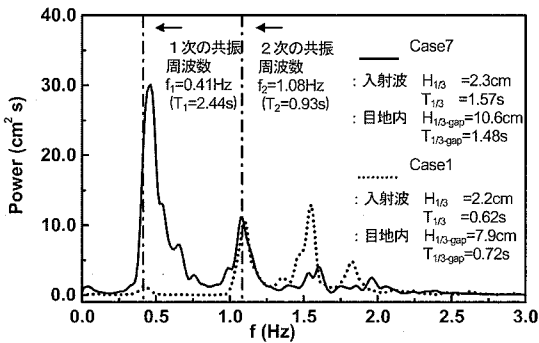
以上により、不規則波が入射した場合においても、規則波の場合と同様な流体共振の発生が目地内で確認された。さらに詳しく入射波の特性と目地内での流体共振の発生との関係を調べるため、以下では、スペクトル解析による周波数分析を行う。なお、Case1 および Case7 の場合に、目地内の有義周期が、他のケースとは異なり、共振周波数 $f_1=0.41$ Hz ($T_1=2.44$ s) および $f_2=1.09$ Hz ($T_2=0.92$ s) と違った値となったことに関しても、以下のスペクトル解析の結果を用いて考察する。

(2) 目地内水面変動のスペクトル特性

図-2 および図-4 に示した Case15 (入射波の有義波高



(a) 入射波のスペクトル特性

(a) Case15 ($H_{1/3}=2.7\text{cm}$, $T_{1/3}=4.99\text{s}$) および Case4 ($H_{1/3}=2.3\text{cm}$, $T_{1/3}=0.94\text{s}$) の場合

(b) 目地内水面変動のスペクトル特性

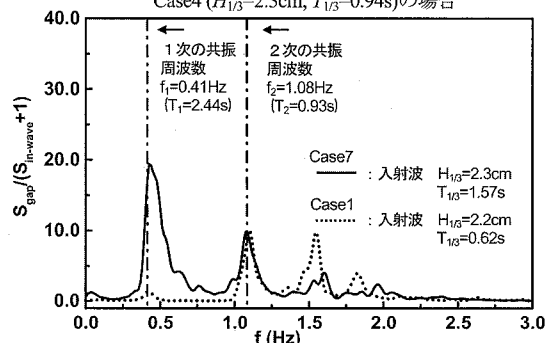
(b) Case7 ($H_{1/3}=2.3\text{cm}$, $T_{1/3}=1.57\text{s}$) および Case1 ($H_{1/3}=2.2\text{cm}$, $T_{1/3}=0.62\text{s}$) の場合

図-7 入射波と目地内水面変動のスペクトル特性 Case7 ($H_{1/3}=2.3\text{cm}$, $T_{1/3}=1.57\text{s}$) および Case1 ($H_{1/3}=2.2\text{cm}$, $T_{1/3}=0.62\text{s}$) の場合

図-8 目地内水面変動の応答スペクトル特性

$H_{1/3}=2.7\text{cm}$, 有義周期 $T_{1/3}=4.92\text{s}$ の場合) および Case4 (入射波の有義波高 $H_{1/3}=2.3\text{cm}$, 有義周期 $T_{1/3}=0.94\text{s}$) の場合の入射波と目地内水面変動のスペクトル特性を図-6に示す。図中には、1次および2次の共振周波数を同時に図示しているが、入射波の特徴として、Case15 の場合が、入射波の周波数成分に1次の共振周波数成分が含まれる場合であり、Case4 の場合が、2次の共振周波数成分が入射波の周波数成分に含まれる場合に相当する。図より、目地内では、Case15 の場合、1次の共振周波数のみでスペクトルが極端に増幅され、さらに、Case4 の場合、2次の共振周波数のみでスペクトルが増幅されている。これは、入射波の周波数帯域に含まれる共振周波数と同様な周波数に応じた流体共振の発生を示すものであり、同様な傾向が全実験ケースで確認された。以上の結果は、流体共振の発生が、入射波の周波数帯域への共振周波数の有無から特定できることを示すものである。

次に、目地内の水面変動特性に関する波別解析で、目地内の有義周期が、1次および2次の共振周波数とは違った値となった Case1 (入射波の有義波高 $H_{1/3}=2.2\text{cm}$, 有義周期 $T_{1/3}=0.62\text{s}$ の場合) および Case7 (入射波の有義波高 $H_{1/3}=2.3\text{cm}$, 有義周期 $T_{1/3}=1.57\text{s}$) の場合の入射

波と目地内水面変動のスペクトル特性を図-7に示す。図より、入射波の特徴として、Case7 の場合、入射波の周波数成分に1次および2次の共振周波数成分が含まれている。さらに、Case1 の場合は、2次の共振周波数成分に加えて、より高周波となる3次および4次の共振周波数成分 ($f_3=1.53\text{Hz}$ ($T_3=0.65\text{s}$), $f_4=1.84\text{Hz}$ ($T_3=0.54\text{s}$)) が入射波の周波数成分に含まれる場合 (斎藤ら, 2005) に相当している。なお、以上の特徴は、入射波にブレッグ・シュナイダー・光型周波数スペクトルを有す不規則波を採用しているため、有義周期が小さい程、入射波に含まれる周波数帯域が高周波の広い範囲となることにも対応している。このときの目地内の水面変動スペクトルは、Case7 の場合、1次および2次の共振周波数でスペクトルが極端に増幅され、さらに、Case1 の場合、2次および3次の共振周波数でスペクトルが極端に増幅されていることが分かる。以上のように、Case1 および Case7 の場合、入射波の周波数帯域に複数の共振周波数成分が含まれているため、それぞれの共振周波数に応じて目地内水面変動が増幅されることになる。結果として、波別解析により目地内の有義周期を計算した場合、それぞれの共振周波数で増幅された目地内波高に基づいて有義値が算定されるため、単一の共振周波数とは違った値として有義周期が計算されたものと考えられる。

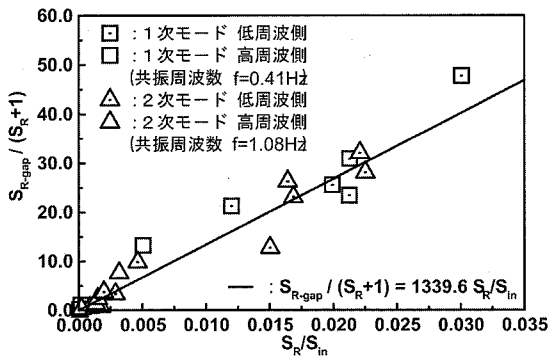


図-9 共振周波数と入射波のスペクトルピーク周波数との大小比較を含めた流体共振の発生規模

(3) 目地内水面変動の応答スペクトル特性および流体共振の発生規模

a) 目地内水面変動の応答スペクトル特性

不規則波がケーソン護岸連結目地内に入射した場合、目地内では共振周波数に対応した周波数で流体共振が発生することを確認した。続いて、流体共振の発生規模に関して検討を加えるため、まず、入射波のスペクトル特性に対する目地内の応答スペクトルを求める。この際、入射波のスペクトル値 $S_{in-wave}$ が $S_{in-wave} < 1$ となる場合、目地内での波高増幅率として応答スペクトルを正しく評価できないため、目地内でのスペクトル値 S_{gap} と $S_{in-wave} + 1$ との比、 $S_{gap} / (S_{in-wave} + 1)$ を用いて応答スペクトルを評価した。上述した Case15, 4 および Case7, 1 の場合の応答スペクトルを図-8 に例示するが、それぞれの共振周波数に応じた目地内での波高増幅が、図-6 (b) および図-7 (b) の場合と同様に表現されている。

b) 目地内における流体共振の発生規模

図-8 に例示した応答スペクトルを全ての実験ケースで求め、共振周波数に対応した応答スペクトルの値、 $S_{R-gap} / (S_R + 1)$ (S_{R-gap} : 共振周波数に対応した目地内水面変動のスペクトル値、 S_R : 共振周波数に対応した入射波のスペクトル値) と、入射波特性との関係から流体共振の発生規模を整理する。この際、入射波特性としては、図-6 (a) および図-7 (a) に例示した入射波のスペクトル分布が囲む面積 S_{in} に含まれる共振周波数成分 S_R の比 S_R / S_{in} を用いて評価した。図-9 に、目地内における流体共振の発生規模を $S_{R-gap} / (S_R + 1)$ および S_R / S_{in} で整理した結果を示す。ところで、入射波のスペクトル分布特性と関連して、流体共振の発生規模は、入射波のスペクトルピーク周波数が共振周波数よりも低周波側あるいは高周波側となる場合で、それぞれ異なる傾向により整理できる可能性がある。そこで、図中では、共振周波数に対する入射波のピーク周波数の大小関係を用いた分類も行っている。図より、流体共振の発生規模は、入射

波に含まれる共振周波数成分比の増加にほぼ線形的に比例することが分かる。さらに、 $S_{R-gap} / (S_R + 1)$ および S_R / S_{in} の関係を回帰直線により定量的に評価した場合、評価式は $S_{R-gap} / (S_R + 1) = 1339.6 S_R / S_{in}$ となった。なお、本研究で対象とした入射波条件の範囲では、入射波のピーク周波数が共振周波数に対して高周波側となるケースが少なく、流体共振の発生規模に関して、特徴的な傾向を見出すには至っていない。これに関しては、今後、さらに広範囲の入射波条件で実験を行い、実験結果に基づいて検討を加える。

4. 結 論

本研究では、規則波入射の場合に得られたケーソン護岸連結目地内での流体共振特性を基礎に研究を進展させ、実際の海象条件下における目地内での流体共振特性の解明を目的とし、不規則波の入射に伴う目地内での流体共振の発生の有無および発生条件とその規模を実験的に考究した。その主要な結論は以下のようにまとめられる。

- 1) ケーソン護岸連結目地に不規則波が入射した場合、規則波入射の際に確認されている場合と同様な 1 次および 2 次の流体共振の発生が実験的に確認された。さらに、入射波に含まれる周波数成分に応じて、より高次の流体共振現象の発生が確認できた。
- 2) 目地内での流体共振の発生は、入射波の周波数帯域に含まれる共振周波数の有無から特定できることが明らかになった。
- 3) 流体共振の発生規模に関して、目地内波高の増幅率を入射波に含まれる共振周波数成分比で整理した場合、両者にはほぼ線形的な比例関係があることが分かった。最後に、不規則波実験の実施およびデータ解析に関して、京都大学防災研究所の間瀬肇助教授より貴重な助言をいただいた。ここに記して厚く謝意を表す。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究 (B)、課題番号 16760405、代表者 斎藤武久)による研究助成によるものであることを記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 斎藤武久・稲田春野・G.P.Miao・石田 啓(2004): ケーソン護岸連結目地内での流体共振特性とその発生条件, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 716-720.
- 斎藤武久・國田 治・G.P.Miao・石田 啓(2005): ケーソン護岸連結目地内での流体共振スペクトルおよび共振発生条件, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 796-800.
- 重村利幸・滝口和男・多田 毅・林建二郎・藤間功司(2002): 防波護岸背後からの土砂吸出しに関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 871-875.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之(1995): 護岸の吸出しに関する水理実験, 港研報告, 35 巻, 2 号, pp. 3-63.
- 土木学会海岸工学委員会(2002): 大蔵海岸陥没事故調査報告書, 土木学会海岸工学委員会, p. 125.