不規則波の入射に伴うケーソン防波堤連結目地内での流体共振特性

RESONANT FLUID MOTIONS IN JOINT GAP OF CAISSON-TYPE BREAKWATER UNDER RANDOM WAVE ATTACK

細沼宏之[1]・斎藤武久[2]・藤井　誠[3]・石田　啓[4]
Hiroyuki HOSONUMA, Takehisa SAITOH, Makoto FUJII and Hajime ISHIDA

[1]工修　石川県　土木部（〒920-8580 金沢市鞍月1-1）
[2]正会員　博(工)　金沢大学准教授　理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 金沢市角間町）
[3]修(工)　福井県　土木部（〒910-8580 福井市大手3-17-1）
[4]フェロー　工博　金沢大学教授　理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 金沢市角間町）

In this study, fluid motions in the joint gap of caisson-type breakwater are investigated experimentally. This study focuses on a random wave attack as incident wave and discusses: 1) whether fluid resonance occurs in the gap; 2) the conditions at which fluid resonance occurs; 3) the scale of wave heights in the gaps at the resonance.

In the experiments, fluid resonance occurred in the gap under random wave as fluid resonance happened under monochromatic waves. The appearance of fluid resonance under random waves depended on the resonant frequency at which fluid resonance occurred under monochromatic waves. Furthermore, the amplification of wave height in the gap was linearly proportional to the relative frequency spectrum at the resonant frequency.

Key Words : *Fluid resonance, joint gap, caisson-type breakwater, random wave attack*

1．緒　論

複数単位ケーソンの連結によって建設されるケーソン防波堤において，単位ケーソン間での連結目地の発生は不可避となる．ただし，その目地幅は極めて小さく，例えば単位ケーソンの代表長さの数パーセント程度である．このため，通常は目地の存在を考慮することなく，断面２次元的に外力の評価が行われ，これまで多くの知見が整理されている[1),2)]．

一方で，この連結目地部は，平面構造的に断面が不連続となり，外海および港内からの流体の浸入を許容する構造上の脆弱部の一つとも考えられる．この場合，波と構造物との相互干渉によって形成される流体場を正確に把握することが，構造物の機能・性能設計においては，基本的かつ本質的に必要不可欠と言える．

これに関連して，著者ら[3),4)]は，ケーソン防波堤連結目地内に規則波が入射する場合を対象に，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，以下の結果を得ている．まず，連結目地のような極めて微小な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る（1cm 程度の入射波高が目地内では８倍を超える波高へと増幅）ことなどである．この結果は，おだやかな常時波浪の入射の場合でも，ケーソン防波堤連結目地の幾何条件によっては，極端な波高の増幅が連結目地内で発生し，例えば目地内での局所的に大きな繰り返し荷重の発生や，連結目地端部における目地内外へ過度な水平方向流速の発生といった危険性を示唆するものと考えられる．

本研究では，ケーソン防波堤連結目地内での流体共振の発生回避，さらには，共振発生時の目地内での波高増幅特性の把握を目標とし，上述の規則波が入射した場合に得られている目地内での流体共振特性を基礎に研究を発展させる．具体的には，実際の海象条件に対応するため，入射条件として不規則波を採用し，これに伴う連結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 14m，幅 80cm，高さ 1m の２次元造波水槽を用いた．水槽中央部に，長さ L = 77cm，幅 38.5cm の２つのアクリル製ケーソンを，目地幅 $2a$ = 3cm として設置し，無限列配置となるケーソン防波堤へ不規則波が直角

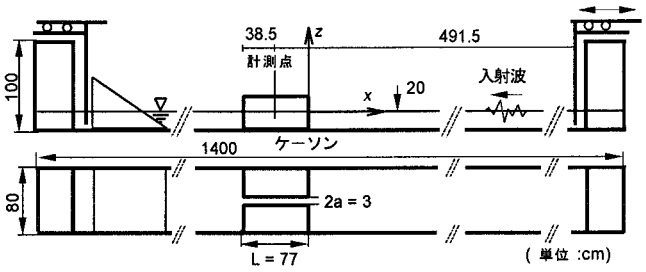


図-1 実験装置の概要

表-1 入射波条件

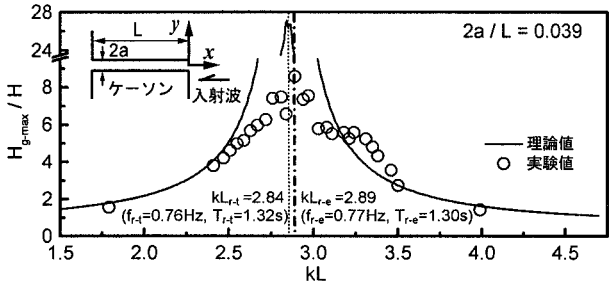
Case	1	2	3	4	5
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	2.3	2.4	2.3	2.3	1.8
有義周期 $T_{1/3}$ (s)	0.64	0.91	1.24	1.28	1.32

Case	6	7	8	9	10
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	2.8	3.2	2.3	2.4	2.7
有義周期 $T_{1/3}$ (s)	1.32	1.32	1.65	2.03	4.91

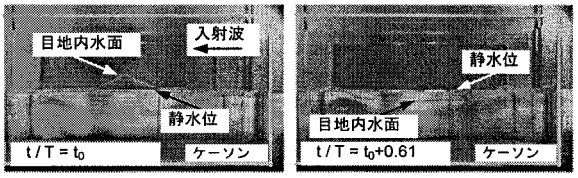
入射する場合を再現した．水槽の他端では吸収式造波機および消波モールを用いて透過波の消波を行っている．なお，実際のケーソン防波堤は，マウンドおよび消波ブロック等を伴うが，本研究では，目地内での流体共振の発生と入射波特性との関係に着目するため，他の影響を除いた最も単純な模型を用いた．水深は h = 20cm に固定し，入射波にブレッドシュナイダー・光易型周波数スペクトルを有する，有義波高 $H_{1/3}$ = 1.8～3.2cm，有義周期 $T_{1/3}$ = 0.64～4.91s の不規則波を採用し，**表-1** に示す 10 ケースについて，入射波および目地内水面変位の時間変化，さらに，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，規則波を入射させた既往の実験結果 [3),4)] で，実験条件によらず目地内波高が最大となった目地中央部の 1 箇所で計測を行った．入射波の計測は，ケーソン防波堤設置前に水槽中央部で行っている．水面変動記録および画像データともに，造波開始から約 60s 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 100Hz とした 100s 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 5Hz 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 次モードの流体共振周波数（以



(a) 目地内での波高増幅特性（$H_{g\text{-}max}$：各kL時の目地内での最大波高，H：入射波高，h = 20cm）



(b) 目地内の水面形状特性（H = 1.2cm，T = 1.22s，kL = 3.11，$2a/L$ = 0.039，h = 20cmの場合）

図-2 規則波が入射した場合の目地内での波高増幅特性と共振発生時の水面形状特性[3),4)]

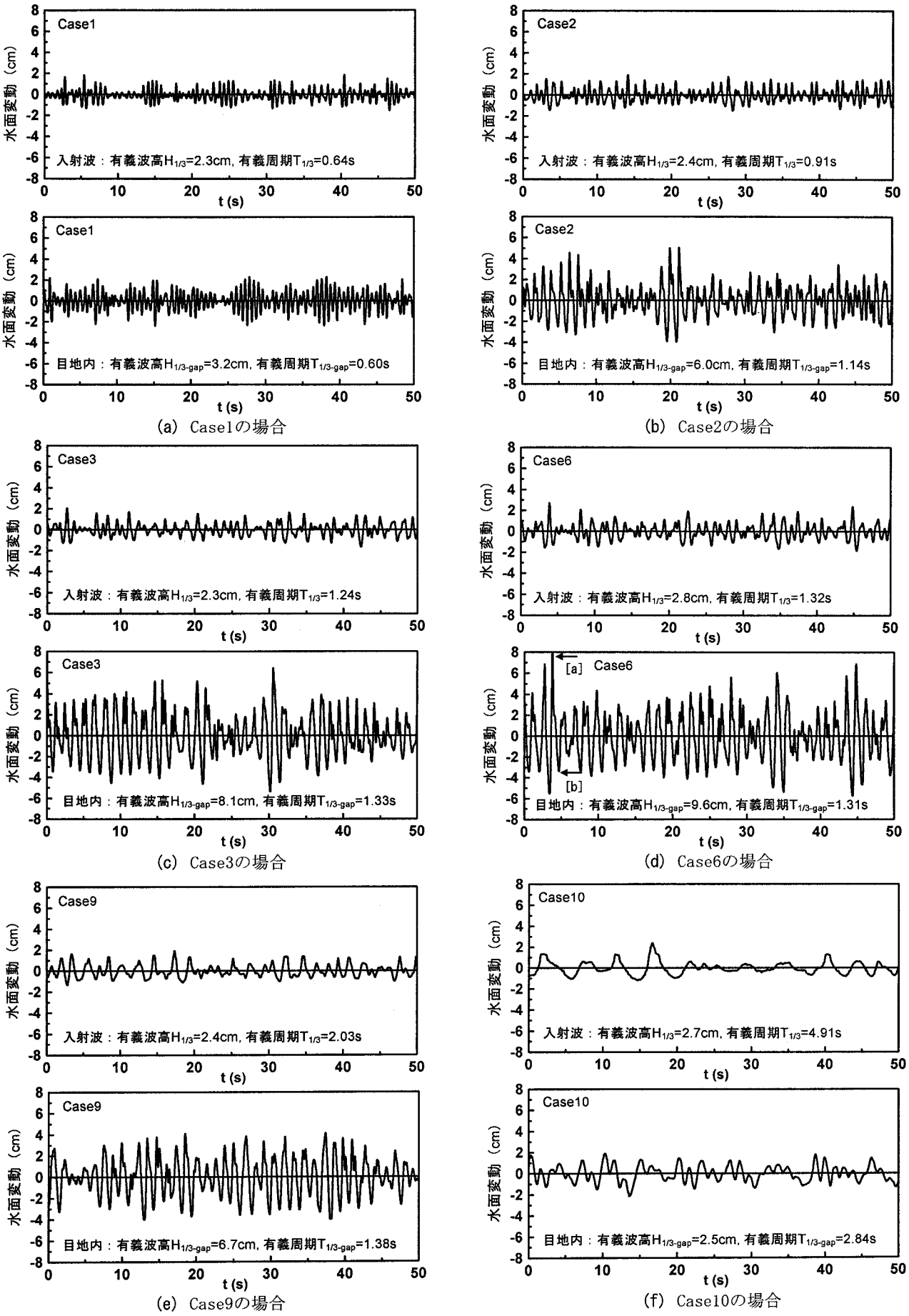
下，共振周波数と略記する）との関係から，流体共振の発生条件と発生規模を定量的に評価する．本研究で対象とする連結目地の形状比が $2a/L$ = 0.039 の場合，規則波入射時の連結目地内での 1 次モード（目地中央部で腹，目地沖側および岸側端部で節に近い水面形状の発生）の流体共振の発生は，**図-2**[3),4)]に示すように，実験結果から共振周波数 $f_{r\text{-}e}$ = 0.77Hz（共振周期 $T_{r\text{-}e}$ = 1.30s，$kL_{r\text{-}e}$ = 2.89；k は入射波の波数，以下に，f_r，T_r および kL_r と略記する）の場合である．なお，理論解析結果から得られた共振周波数は $f_{r\text{-}t}$ = 0.76Hz（$T_{r\text{-}t}$ = 1.32s，$kL_{r\text{-}t}$ = 2.84）であり，実験結果を非常によく再現している．

以上の規則波の場合における共振周波数（共振周期）の値を踏まえて，本研究で対象とする入射波条件は，上述の共振周期を含む範囲，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-3(a)に，入射波の有義波高$H_{1/3}$ = 2.3cm，有義周期$T_{1/3}$ = 0.64sの場合(Case1)に計測された，入射波および目地内中央部での水面変動記録を示す．図中，上段が入射波の水面変動記録を示し，下段が目地内での水面変動記録を表している．なお，横軸は，計測開始時をt = 0sとした時間軸を表しており，上段と下段の時間的な同期を示すものではない．図より，目地内では極端な波高の増幅は見られないことが分かる．同様な傾向が，Case10（**図-3(f)**，$H_{1/3}$ = 2.7cm，$T_{1/3}$ = 4.91s）の場合に見られる．次に，**図-3(b)**，(c)，(d)および(e)に，入射波の有義波高が

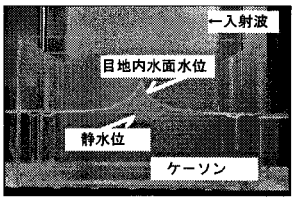


(a) Case1の場合　(b) Case2の場合

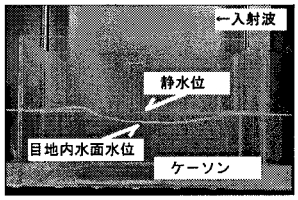
(c) Case3の場合　(d) Case6の場合

(e) Case9の場合　(f) Case10の場合

図-3 入射波（上段）および目地内水面変位（下段）の時間変化特性

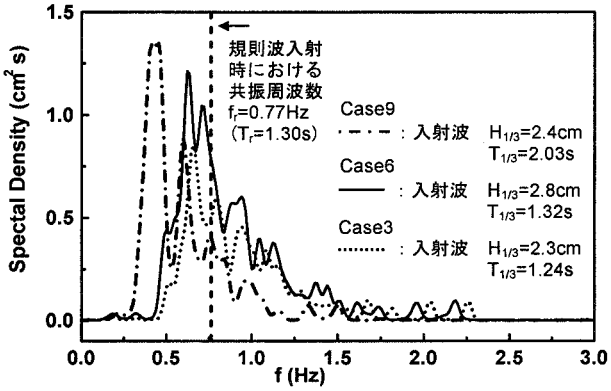


(a) 図-3(d)中[a]時点の目地内水面形状

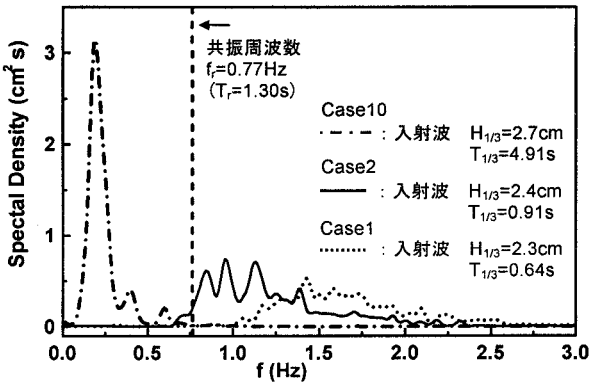


(b) 図-3(d)中[b]時点の目地内水面形状

図-4 目地内の水面形状特性



(a) Case9, Case6およびCase3の場合



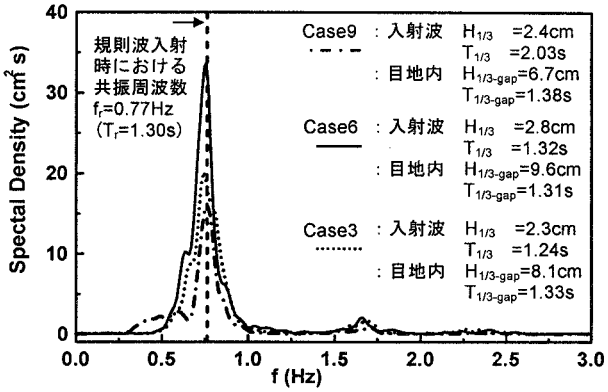
(b) Case10, Case2およびCase1の場合

図-5 入射波のスペクトル特性

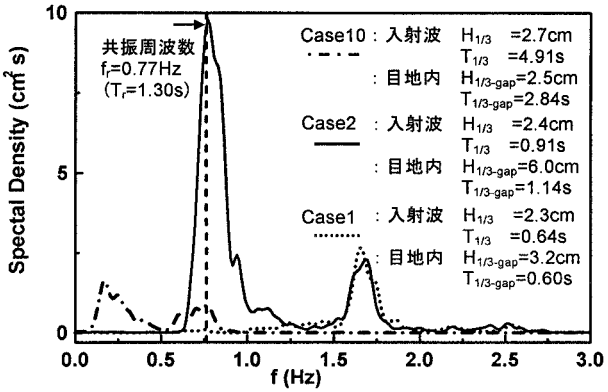
表-2 目地内の水面変動特性

Case	1	2	3	4	5
有義波高 $H_{1/3\text{-gap}}$ (cm)	3.2	6.0	8.1	8.0	6.7
有義周期 $T_{1/3\text{-gap}}$ (s)	0.60	1.14	1.33	1.32	1.32

Case	6	7	8	9	10
有義波高 $H_{1/3\text{-gap}}$ (cm)	9.6	10.7	7.0	6.7	2.5
有義周期 $T_{1/3\text{-gap}}$ (s)	1.31	1.34	1.36	1.38	2.84



(a) Case9, Case6およびCase3の場合

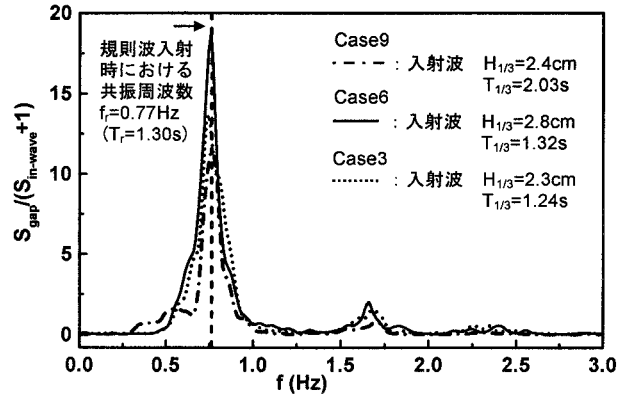


(b) Case10, Case2およびCase1の場合

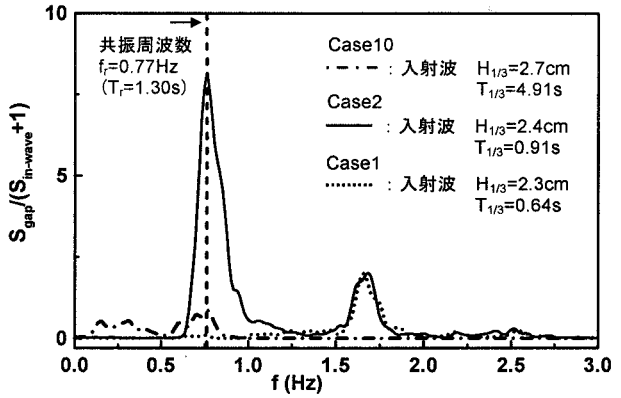
図-6 目地内水面変動のスペクトル特性

ほぼ等しく，有義周期が$T_{1/3}$ = 0.91s(Case2)，1.24s(Case3)，1.32s(Case6)および2.03 s (Case9)と異なる場合に計測された，入射波および目地内中央部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，特に，Case6の場合，目地内の有義波高$H_{1/3\text{-gap}}$が9.6cmに達していることが分かる．この時，入射波の有義周期$T_{1/3}$と目地内での有義周期$T_{1/3\text{-gap}}$の関係に着目すると，Case3とCase9の場合，$T_{1/3\text{-gap}}$は$T_{1/3}$から離れ共振周期T_r = 1.30sに近い値へシフトしていることが分かる．$T_{1/3}$が共振周期にほぼ等しいCase6の場合には，$T_{1/3\text{-gap}}$のシフトは見られない．さらに，図-3(d)に見られる極端な目地内波高増幅時の水面形状を図-4に例示するが，目地中央部を腹，目地両端部を節とする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．

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，Case5，Case6，およびCase7は，それぞれ，入射波の有義周期が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，Case1およびCase10を除いたケースの場合に，目地内の有義波高は大きく増幅され，さらに，目地内有義周期は，Case1，Case2，およびCase10を除く全てのケースで共振周期T_r = 1.30s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Case5，Case6，Case7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，目地内での砕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



(a) Case9，Case6およびCase3の場合



(b) Case10，Case2およびCase1の場合

図-7 目地内水面変動の応答スペクトル特性

び流体力特性の検討も含めて今後の課題とする．

以上のように，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，Case2およびCase10の場合，目地内の有義周期に，入射波の有義周期から共振周期T_r = 1.30s方向へのシフトが見られるものの，共振周期とは違った値となっていることに関しても，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-5(a)に，目地内の有義周期$T_{1/3\text{-}gap}$が共振周期T_rに近い値を示したCase3，Case6およびCase9の場合における入射波スペクトルの特性を示す．一方，**図-5(b)**に，目地内の有義周期$T_{1/3\text{-}gap}$には入射波の有義周期$T_{1/3}$からの極端なシフトが見られなかったCase1，さらに，$T_{1/3\text{-}gap}$に$T_{1/3}$からのシフトは見られるもの，共振周期T_rからは$T_{1/3\text{-}gap}$の値が大きく離れているCase2およびCase10の場合の入射波のスペクトル特性を示す．図中には，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，6つのケースのうちCase1を除く全ての場合が，入射波の周波数成分に共振周波数成分が含まれる場合に相当していることが分かる．一方，**図-6**に，目地内水面変動の

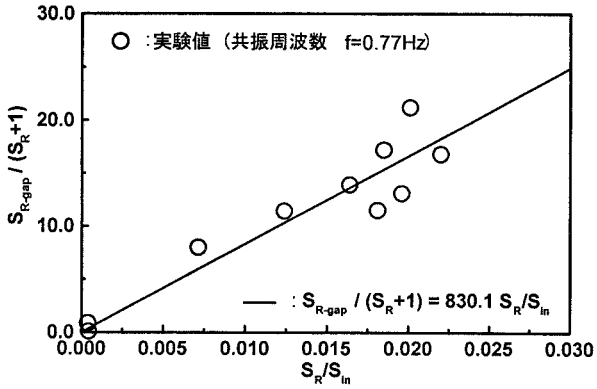


図-8 流体共振の発生規模

スペクトル特性を示すが，目地内では，Case2，Case3，Case6およびCase9の場合に，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．なお，入射波のピーク周波数に応じた周波数でもある程度のスペクトルの値は確認できるが，共振周波数での増幅に比べて小さな程度に留まっている．また，Case10の場合，**図-6(b)**中の縦軸のスケールが小さいことにもよるが，入射波のピーク周波数に加えて，共振周波数でも同等のスペクトルの増幅が確認できる．これは，入射波の周波数成分に僅かではあるが共振周波数成分が含まれているためである（**図-5(b)**）．以上に加えて，6つのケース全ての場合に，f = 1.7Hz付近で僅かながらスペクトルの増幅が確認できる．この周波数は，既往の規則波実験（入射波の周波数が0.5Hz～1.2Hzの範囲）では確認できていないが，理論解析結果からは目地内での発生が予想される2次モードの共振周波数に対応している．本研究で対象とした入射波条件の場合，全ての条件で入射波の周波数成分に，2次モードの共振周波数が含まれていたために，対応した周波数でスペクトルの増幅が発生したと考えられる．以上の結果は，流体共振の発生は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．

ところで，Case2およびCase10の場合に，目地内の有義周期が，入射波の有義周期および共振周期とも異なった値へシフトした理由の一つとして，波別解析で目地内の有義周期を計算する際，それぞれの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，増幅されたスペクトルの規模に依存し，目地内有義周期は入射波のピーク周波数あるいは共振周波数とも違った値として計算されたことが考えられる．

(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防波堤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$S_{in\text{-}wave}$が$S_{in\text{-}wave}<1$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$S_{in\text{-}wave}+1$との比，$S_{gap}/(S_{in\text{-}wave}+1)$を用いて応答スペクトルを評価した．上述したCase9，Case6およびCase3の場合の応答スペクトルを**図-7(a)**に示すが，1次および2次モードに対応する共振周波数に応じた目地内での波高増幅が，**図-6(a)**の場合と同様に表現されている．また，**図-7(b)**にCase10，Case2およびCase1の場合の応答スペクトルを示すが，**図-7(a)**の場合と同様に，**図-6(b)**に対応した変化特性が確認できる．

b) 目地内における流体共振の発生規模

図-7 に例示した応答スペクトルを全ての実験ケースで求め，1 次モードの共振周波数に対応した応答スペクトルの値，$S_{R\text{-}gap}/(S_R+1)$（$S_{R\text{-}gap}$：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-5** 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-8** に，目地内における流体共振の発生規模を $S_{R\text{-}gap}/(S_R+1)$および S_R/S_{in} で整理した結果を示す．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，$S_{R\text{-}gap}/(S_R+1)$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 $S_{R\text{-}in}/(S_R+1)=830.1\ S_R/S_{in}$ となった．

なお，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が，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防波堤連結目地内での流体共振特性を基礎に研究を発展させ，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．

ケーソン防波堤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流体共振の発生が実験的に確認された．

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．

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．

参考文献

1) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版，p. 333, 1991.
2) 土木学会海岸工学委員会：海岸施設設計便覧，土木学会，p. 582, 2000.
3) Saitoh, T., Miao, G.P. and Ishida, H. : Experimental study on resonant phenomena in a narrow open channel under waves, *Proc. of the 12th Int. Offshore and Polar Engineering Conf.*, pp.622-627, 2002.
4) 斎藤武久・國田　治・G.P.Miao・石田　啓：ケーソン防波堤岸連結目地内での流体共振スペクトル，海洋開発論文集，第 21 巻，pp. 587-592, 2005.