

有孔 방파제의 波壓分布特性和 安定度 Pressure Distribution and Caisson Stability of Perforated Breakwaters

全仁植* · 朴佑善* · 李達秀*

In Sik Chun*, Woo Sun Park* and Dal Soo Lee*

要 旨 : 본 연구에서는 有孔케이슨과 無孔케이슨을 대비하여 케이슨에 작용하는 부재波壓 및 安定度 특성에 대한 水理模型 실험을 실시하였다. 부재파력은 前面壁 波력과 陽壓力 공히 有孔케이슨이 無孔케이슨보다 작게 나타나 유공케이슨이 波力の 分散面에서 效果的인을 立證하였다. 케이슨 安定度에 대해서는, 전 實驗波浪條件에 걸쳐 有孔케이슨의 活動限界重量이 無孔케이슨에 비해 작게 나타나 同一波浪條件에서 前者가 後者보다 所要重量面에서 유리함을 입증하였다. 有孔케이슨의 活動限界重量이 작게 나타난 主要原因은 水平全波力の 減少와 함께 수평 全波력과 鉛直上向 全波力の 位相差에 의한 것으로 나타났다.

Abstract □ Hydraulic experiments were performed in order to gain an insight into the quantitative differences between the perforated wall caisson and its solid wall counterpart in the local pressure distribution and caisson stability. The results showed that the wave forces acting on local walls were smaller in the perforated wall caisson than in the solid wall caisson. For the caisson stability, the critical weights of the perforated wall caisson also turned out to be smaller than those of the solid wall caisson. The phenomenon was attributed to the dual effects inherent to the perforated wall caisson, which are the decrease of total horizontal force and the phase difference between the total horizontal and vertical forces.

1. 緒 論

有孔式 防波堤는 Jarlan (1961)에 의해 概念的으로 導入된 이래, 新型 방파제 系列中에서 가장 일찌기 本格的으로 시공된 형태로서 接近 파랑을 일부 흡수할 수 있는 構造形式을 가지며 港內 靜穩度 및 방파제 주변의 航路 유지의 특성을 浮刻시킨 형태이다. 이 방파제 형태는 일본에서는 多數 시공되어 성공적으로 운영되고 있으나(日本 港灣技術研究所, 1986; 日本 五洋建設株式會社, 1983), 국내에서는 아직도 이렇다 할 施工實績이 없는 실정이다. 向後 국내 建設을 효과적으로 유도하기 위해서는 實 設計에 필요한 보다 具體的인 정보를 제공하여 줄 수 있는 國內의 獨自的인 연구가 요구되고 있다.

防波堤 케이슨에 작용하는 部材波壓에 대한 정보는 케이슨 各 部材의 構造設計를 위한 設計荷重을 결정 하는데 매우 중요하다. 특히, 有孔 케이슨의 경우 有孔壁은 遊水室 内外로 부터 波壓을 동시에 받기 때문에 독특한 剪斷力 및 모멘트의 특성을 가지며 模型實驗을 통하여 명확히 결정되어야 한다. 無孔 케이슨에 대해서도 前面壁 단면을 설계하기 위해서는 전면벽에 가해지는 局部波壓을 정확히 파악할 필요가 있다. 有孔 케이슨의 各 部材에 가해지는 파압분포의 양상은 無孔 케이슨에 비해 훨씬 복잡하며 遊水室 内外 파랑의 波高와 位相의 변화에 따라 달라진다. 따라서, 各 부재에 가해지는 波壓樣相을 정확히 파악하기 위해서는 遊水室 内外의 파랑변화와 部材波壓의 변화를 동시에 파악하여야 한다(Takahashi, 19

*韓國海洋研究所 海洋工學研究室 (Ocean Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea)

91).

防波堤 케이슨의 미끌림 및 顛倒에 대한 安定度 문제는 케이슨의 重量 및 幅을 결정하기 위하여 필수적으로 파악해야 하는 요소이다. 일반적으로 有孔式 케이슨은 反射率 측면에서 無孔 케이슨에 비해 상당히 우수한 성능을 가지고 있는 것으로 알려져 있으나, 케이슨 前面部の 遊水室로 인한 重量減少로 미끌림 및 顛倒에 취약하다는 단점이 國內 기술계에서 지적된 바 있다. 따라서, 遊水室 부피에 해당하는 重量만큼을 보상해 주기 위해 케이슨의 幅이 증가해야 하는 것으로 일반적으로 인식되고 있다. 그러나, 이와 같은 인식은 接近波浪의 에너지가 대부분 前面壁에서 반사되는 無孔 케이슨의 특성에 근거를 두고 있으며, 有孔 케이슨의 安定도가 遊水室 내외 파압분포의 독특한 특성에 의해서 크게 좌우될 수 있음을 포함하고 있지 않다. 波壓分布에 따라서는, 케이슨 幅의 증가가 불필요하거나 최소한 유수실 부피에 相應할 만큼은 필요치 않다고 類推할 수 있다. 有孔式 케이슨에 대한 多數의 연구 결과가 있었음에도 불구하고(Takahashi, 1991; Tanimoto, *et al.*, 1987), 無孔 케이슨에 대비한 유공케이슨의 미끌림 및 顛倒特性은 명확히 量的으로 규명된 바 없었다.

本 연구에서는 上記 有孔 케이슨 각 부재에 작용하는 波壓分布를 파악하고 有孔 케이슨의 미끌림 및 顛倒를 포함하는 安定度 특성을 규명하기 위한 水理模型實驗을 수행하였다. 또한, 有孔 케이슨과 無孔 케이슨을 對比하고 이들간의 특성차이를 導出하기 위하여, 無孔 케이슨에 대해서도 실험을 並行하였다.

2. 實驗環境의 設定

2.1 模型防波堤

길이 縮尺比 1/20의 水理模型實驗을 入射波高 $H_i = 10$ cm와 水深 $d = 50$ cm의 조건에서 실시하는 것을 전제로 하고, 無孔 케이슨 前面壁에 衝擊波壓을 피하기 위한 마운드 形狀을 고려하여 방파제 모형의 제원을 결정하였다. 마운드 높이와 케이슨 天端高를 각각 h 와 h_c 로 나타낼 때, Goda(1985)는 無孔 防波堤 前面에서의 衝擊波壓을 피하기 위하여 개략적으로 $h/d \leq 0.4$ 와 $h_c/H_i \leq 0.3$ 의 기준을 充足시킬 것을 권장한 바 있다. 그러나, 이 기준은 하나의 定性的인 지침이며 실제로 케이슨 天端高는 越波를 감안하여 $h_c/H_i \geq 0.6$ 의

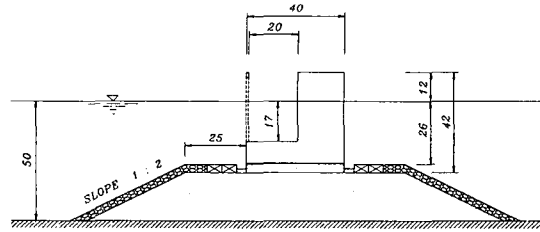


Fig. 1. Overall configuration of the model structure of perforated wall breakwater.

기준이 채택되고 있다(日本 港灣協會, 1989). 本 模型實驗에서는 이와 같은 기준을 대략적으로 만족시키는 범위내에서 실험 편의상 모형방파제의 마운드 높이와 케이슨 天端高를 각각 24 cm와 12 cm로 정하였다. Fig. 1은 本 模型實驗에서 채택한 방파제 모형을 보여준다.

케이슨 模型은 두께 1 cm의 투명한 아크릴판을 이용, 위에서 결정한 마운드 높이와 天端高를 고려하여 폭 40 cm, 높이 38 cm로 製作하였다. 케이슨 遊水室 幅은 20 cm로 고정하였고 無孔 防波堤 실험에 대비하여 前面壁을 無孔壁으로 代置할 수 있도록 하였다. 有孔壁은 일본에 현재 설치되어 있는 대표적인 有孔 防波堤를 참조하여 諸元을 결정하였다(Fig. 2 참조). 유공벽의 開口率은 $e = 0.33$ 이고 遊水室內의 水深은 17.0 cm이다.

防波堤의 Berm은 케이슨 前面에서의 局地 洗掘을 방지한다는 측면에서는 가급적이면 幅이 넓은 것이 좋으나 건설비와 衝擊波壓의 가능성 등을 고려하여 적정 幅을 선택하는 것이 바람직하다. 일반적으로 Berm 幅은 正常的인 파랑상태에서는 最少 5m, 큰 颱風波가 주로 到來하는 곳에서는 약 10m 정도로 채택되고 있다(Goda, 1985). 따라서, 本 실험에서는 1/20 실험축척을 감안하여 25 cm의 폭을 갖는 Berm을 케이슨 前後로 설치하였다. 마운드의 傾斜는 鉛直對 水平의 비가 1對 2가 되도록 하였다. 마운드의 被覆材料는 개별중량이 약 24.9 gr, 空隙率이 약 0.5인 자갈을 4 cm 두께로 설치하였으며, 마운드 내부 基礎石으로 개별중량이 약 0.6 gr, 空隙율이 약 0.37인 碎石으로 하였다.

2.2 實驗波浪 설정

설정된 水深條件과 방파제 모형에 대하여 越波가

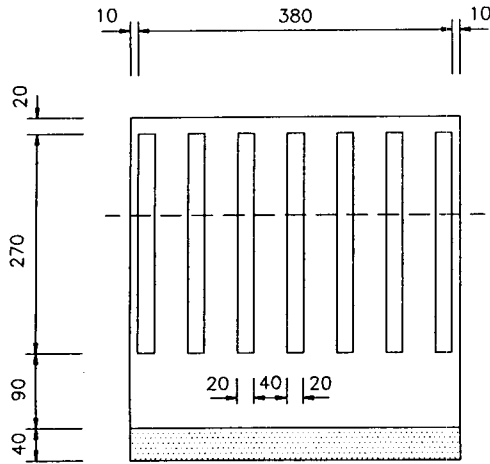


Fig. 2. Configuration of the perforated wall.

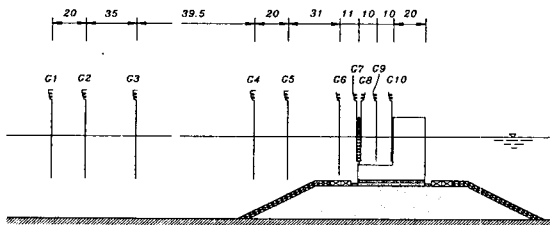


Fig. 3. Installation points of wave gauges for measuring spatial variation of wave.

발생하지 않고 또한 과도한 충격파압이 발생하지 않는
 規則波 파랑조건을 예비실험을 통하여 결정하였다.
 또한, 入射波浪과 反射波浪의 重疊에 의해서 발생하는
 정상파랑의 碎波現狀은 입사파 자체의 歪曲을 초래
 하며 현재로서는 定常波의 쇄파조건이 이론적으로
 명확치 않기 때문에, 역시 예비실험을 통하여 碎波를
 피하기 위한 入射波浪 조건을 설정하였다. 본 모형
 실험에서 설정한 入射波浪條件은 波高가 10 cm이고
 週期가 각각 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8초인 5가지이다.

2.3 케이스 및 計測센서의 설치

主 실험장치로서 2次元 波浪水槽(길이 53m, 높이
 1.25m, 폭 1.0m)를 이용하였다. 본 수조는 規則波 또는
 불규칙파를 발생시킬 수 있으며 1개의 컴퓨터로 油
 壓서보 시스템을 可動하여 피스톤식 조파판의 운동을
 精密制御할 수 있는 특성을 가지고 있다. 모형방파
 제는 케이스 전면이 造波板으로부터 35.15m 떨어진

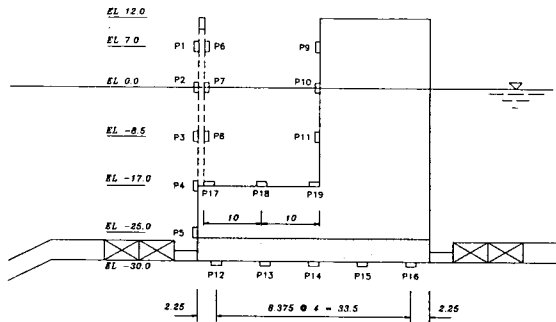


Fig. 4. Installation points of wave pressure sensors.

지점에 위치되도록 설치하였다(Fig. 3 참조).

실험계측은 10개의 波高計와 16개의 波壓計를 운
 영하여 수행하였다. 이들 계측 센서들은 中央制御室에
 위치한 增幅器에 연결되어 있으며 이들은 다시 多채널
 Analog-digital 變換器와 실험실 小型 컴퓨터에 연결
 되어 있다. 이 소형 컴퓨터는 大型 컴퓨터와 LAN을
 이루고 있으며, 기록된 실험데이터는 차후에 자체에서
 분석하거나 大型 컴퓨터에 送信하여 분석하였다.

사용된 파고계는 電氣 抵抗式으로서 Fig. 3에 보인
 바와 같이 總 10개를 설치하였다. 波高計 G1~G3는
 入·反射波를 분리하기 위한 것이며, 파고계 G4~G7
 은 케이스 前方에, 파고계 G8~G10은 遊水室內에
 설치되어 각 時點에서의 파랑의 공간적 변화를 계측
 하기 위한 것이다. 특히, 전면벽에 설치된 파고계 G7
 은 파압측정시 波壓과 동시에 계측함으로써 전면벽
 波型의 시간변화에 따른 파압변화양상을 도출하기
 위한 것이다.

波壓計測은 직경이 8-10 mm인 小型 Strain gauge
 식 파압계를 사용하였다. 센서보정은 靜水壓를 이용
 하여 실시하였으며, 각 센서의 제로점은 증폭기의
 自動補正 기능을 이용하여 매 실험직전에 조정하였다.
 波壓測定은 無孔 케이스와 有孔 케이스 각각에 대하여
 실시하였으며 조파기 가동 이후 120秒間 계측하였다.
 아울러, 測定波壓과 전면벽 부근에서의 波型의 시간적
 상관관계를 파악할 목적으로 전면벽 波高計 G7을
 동시에 운영하였다. Fig. 4는 波壓計 설치점을 보여준
 다. 측정 部材는 有孔 前面壁, 유공 背面壁, 유수실
 後面壁, 유수실 底面, 케이스 地面(케이스와 마운드의
 接觸面)등 5개로 구분하였다. Fig. 5는 각 部材에 작
 용되는 힘 또는 모멘트의 陽方向에 대한 정의를 나

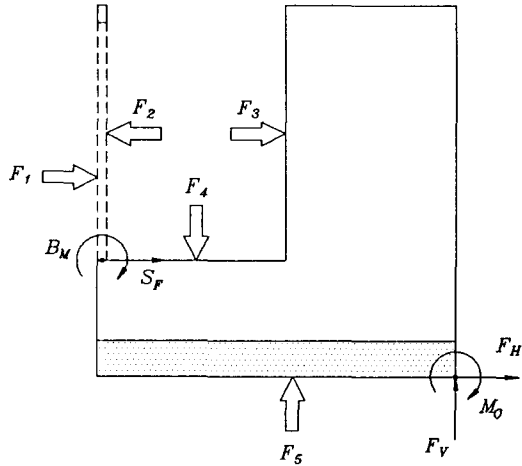


Fig. 5. Definition of forces and moments.

타내고 있다.

3. 실험結果 및 分析

3.1 波壓資料의 分析方法

파압자료의 분석은 계측된 각 波壓計의 파압기록과 전면벽 波高記錄이 비교적 안정되어 있는 區間을 선택하여 실시하였다. 5개의 入射波浪條件에 대한 部材 波力의 時系列은 상기 선택된 구간내에서 각 部材에 작용하는 시점별 파압분포를 面積積分하여 결정하였다.

전면벽, 背面壁, 후면벽 등 鉛直壁面에 대해서는 파랑에 의해 水面이 上下로 搖動하기 때문에 각 벽에 부착 설치된 波高計의 기록을 이용하여 수면변화를 계속적으로 추적한 다음 波壓計의 每 독취시간마다 水面下 최상단에 위치한 파압계를 검색하였다. 最上端 파압계가 결정되면 그 파압계 자료와 수면사이의 파압변화는 線形으로 가정하고 상기 面積積分에 포함시키는 식으로 하였다. 전면 유공벽에 작용하는 純粹 波力은 遊水室 내외로 부터 파압을 동시에 받기 때문에 이를 고려해야 한다. 따라서, 유공벽 전면에서의 總 部材波力과 背面에서의 부재파력의 時系列을 각기 결정한 다음, 이들의 차이를 구함으로써 순수하게 有孔壁에 작용하는 파력의 時系列을 결정하였다.

3.2 部材 波壓特性

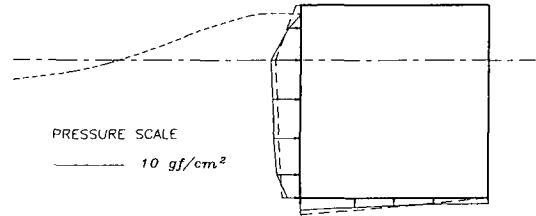


Fig. 6. Definition of measured pressure distribution with one predicted by Goda's formula in solid wall breakwater for $T=1.4$ sec (---: goda's formula, —: measurement).

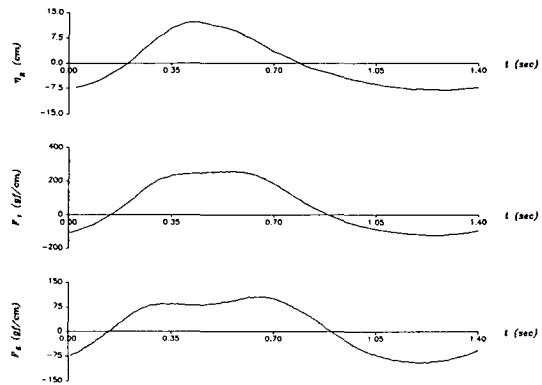


Fig. 7. Time series of local wave forces in solid wall breakwater ($T=1.4$ sec).

計測된 파압자료의 有效性의 확인과 有孔 케이스의 波壓과의 비교를 위하여 수행한 無孔 케이스에 대한 결과를 Goda 式에 의한 結果值(Goda, 1985)와 비교하였다. Goda식은 前面壁에 파압이 陽方向 최대로 작용하는 時點의 波壓을 나타내 준다. 따라서, 前面壁 파압계 기록을 면적적분하여 구한 전면벽 총파력의 時系列이 최대가 되는 時點에서의 파압분포를 결정하여 Goda의 계산치와 비교하였다. Fig. 6은 週期가 1.4초인 실험파랑에 대해서 이들 波壓分布의 비교를 보여주며 전반적으로 실험데이터가 Goda식과 잘 일치함을 알 수 있다.

無孔케이스 전면벽에 설치한 파고계의 계측시그널, 前面壁 파력(F_1)과 케이스 地面 波力(F_3)의 동시변화를 분석한 결과, 全 실험과 週期에 걸쳐 이들 시그널의 位相은 거의 동일한 것으로 나타났다. Fig. 7은 주기 1.4초에 대한 것이다.

有孔케이스에 대한 파랑시그널과 各 部材波力의

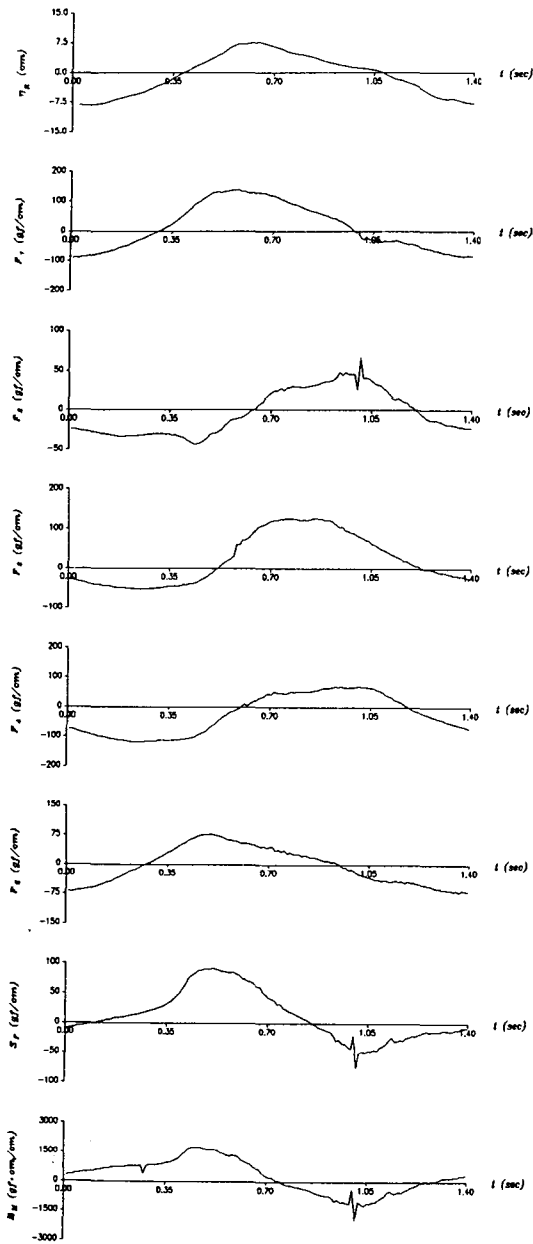


Fig. 8. Time series of local wave forces in perforated wall breakwater ($T=1.4$ sec).

동시변화를 분석한 결과, 파랑 시그널과 前面壁 波力 (F_1), 케이슨 地面 波力(F_5)은 입사파 주기에 관계없이 位相이 거의 같으며, 遊水室內의 파력들, 즉 유공벽 背面(F_2), 유수실 後面(F_3), 底面 波力(F_4)은 서로 비슷한 位相을 가지고 있음을 관찰하였다(Fig. 8 참조).

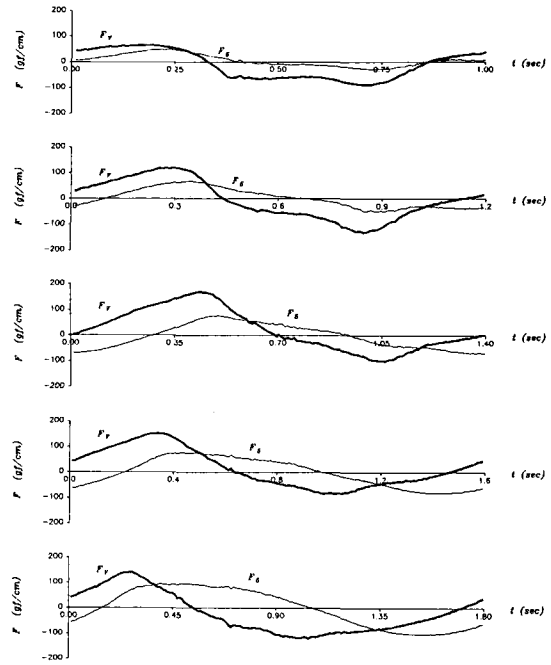


Fig. 9. Comparison of the time variations of vertical force at the caisson bottom and total vertical force.

케이슨 地面 波力과 유수실 底面 波力 사이에는 상당한 정도의 位相差가 존재하며, 특히 단주기 파랑에서 1/4 波長 이상의 位相差를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 이들 파력은 作用方向이 동일하게 되는 시간구간을 갖게 되며 特定 時間帶에서는 케이슨 地面 최대 파력보다도 큰 鉛直合成 파력을 케이슨에 작용될 수 있다. 이와 같은 현상은 실험과 주기에 대하여 케이슨 地面 波力과 전체 鉛直 波力을 동시에 나타낸 Fig. 9에서 確然히 구분할 수 있다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 有·無孔 케이슨의 전면벽 파력 F_1 과 케이슨 地面 波力 F_5 에 대하여 測定值의 陽方向 최대치와 Goda식에 근거한 계산치의 비교를 보여준다. 여기서, 橫軸은 실험파랑의 相對水深 d/gT^2 이며 縱軸은 $\rho g H d_c$ 으로 無次元化된 波力을 의미하며, d_c 는 케이슨의 吃水深이다. 그림에서 전반적으로 相對水深이 증가함에 따라 파력이 감소함을 알 수 있는데, 이는 Goda의 공식에서 相對水深이 증가함에 따라 波壓 결정 係數 α_1 과 α_3 가 감소하여 결과적으로 前面壁 波力(F_1) 및 케이슨 地面 波力(F_5)이 감소하는 현상과 일치한다. 앞에서 비교한 波壓分布와 같이

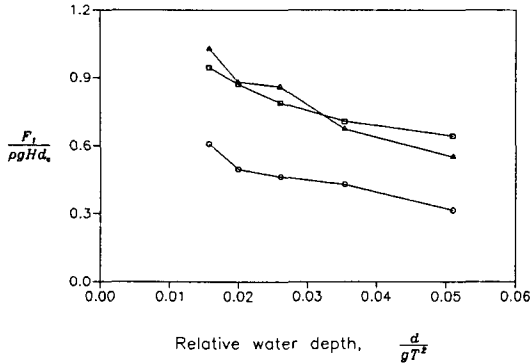


Fig. 10. Comparison of measured values and the values based on Goda's formula for the wave force acting on the front wall (□: Goda, △: solid wall, ○: perforated wall).

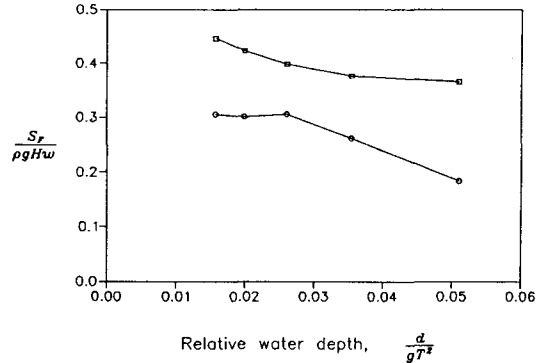


Fig. 12. Comparison of the shear force at the lower end of perforated wall between the measured values and the values based on Goda's formula (□: Goda, ○: perforated wall).

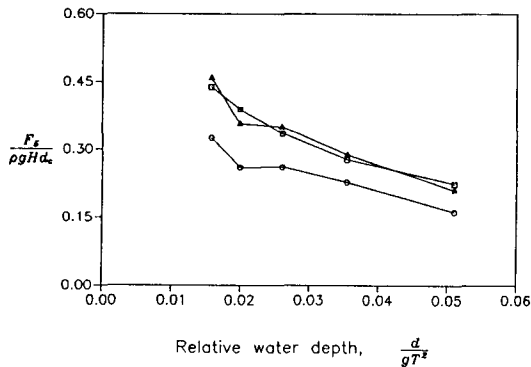


Fig. 11. Comparison of measured values and the values based on Goda's formula for the wave force acting on the caisson bottom wall (□: Goda, △: solid wall, ○: perforated wall).

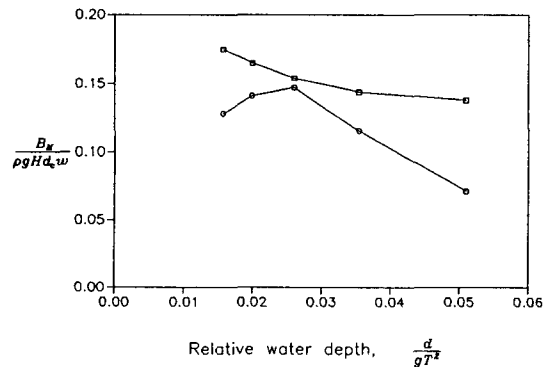


Fig. 13. Comparison of the bending moment at the lower end of perforated wall between the measured values and the values based on Goda's formula (□: Goda, ○: perforated wall).

無孔 케이슨의 결과는 Goda 식에 의한 결과와 상당히 잘 일치함을 볼 수 있다. 有孔 케이슨의 파력은 무공 케이슨의 약 50-70% 수준으로 無孔 케이슨에 비해 유공케이슨이 部材波力면에서 유리함을 알 수 있다.

位相差에 의한 波力變化는 유공벽 下端의 剪斷力 S_x 와 모멘트 B_M 에서도 발견할 수 있다. 유공 前面壁 파력과 背面壁 파력사이에 존재하는 위상차이는 유공벽에 순수하게 작용하는 剪斷力과 모멘트의 독특한 양상을 결정한다. Fig. 12와 Fig. 13은 측정된 剪斷力 및 모멘트와 Goda식에 의한 無孔 전면벽 파압분포로부터 계산된 값들과의 비교를 보여준다. Fig. 15의 縱軸에서 w 는 케이슨의 幅을 의미한다. 그림에서 전 단력과 모멘트 共히, 全 입사파 주기에 관계없이 前

者가 後者보다 작고, 이들의 차이는 대략적으로 주기가 짧아질 수록 증가하며 주기 1.0초의 경우에는 전자가 후자의 약 50%까지 떨어짐을 관찰할 수 있다. 따라서, 이 결과는 Goda식에 근거한 無孔 前面壁 파력에 의존하여 유공벽을 설계하는 것은 過大設計가 될 수 있음을 보여주고 있다.

주기 1.4초에 대하여 상기 有孔壁 하단 剪斷力이 최대가 되는 時點에서의 유공벽 前後 파랑변화와 各 부재파압분포를 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 전 단력이 陽方向 최대일 時, 유공벽 前面과 背面에 작용하는 파압이 방향이 같으며, 陰方向 최대일 시에는 이와는 반대의 경향을 보이고 有孔壁背面에 작용하는 파압이 전면벽보다 크게 작용됨을 알 수 있다. 아울러,

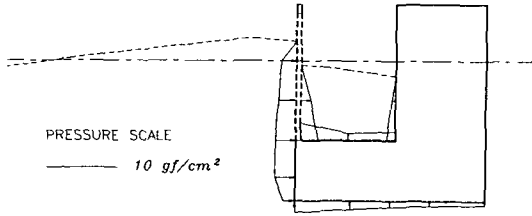


Fig. 14. Wave pressure distribution and wave profile when the maximal shear force occurs at the bottom of perforated wall ($T=1.4$ sec): (a) positive maximum; (b) negative maximum.

그림에서 전면벽 파압분포는 무공케이슨의 경우 靜水面에서 최대가 되는 반면(Fig. 6 참조), 유공케이슨의 경우는 유공벽 下端에서 큰 값을 갖고 靜水面쪽으로 減少傾向을 보인다. 이는 입사파랑의 有孔壁 통과로 인한 파압의 分散에 기인한 것으로 판단된다.

3.3 미끌림 및 顛倒特性

各 부재별 파력의 時系列을 이용하여 케이슨에 작용하는 水平全波力과 鉛直全波力の 時系列 및 케이슨의 後面 下端 마운드 접촉점을 回轉軸으로 한 顛倒모멘트의 時系列을 구하였다. 수평전파력은 有孔전면벽, 背面壁과 유수실 後面벽에 나타나는 파력의 總和이며, 연직전파력은 遊水室 底面과 케이슨 地面에서의 파력의 總和이다. 顛倒모멘트는 각 부재의 파압분포를 상기 회전축에 대한 모멘트를 구한 후 이들의 總和로서 결정하였다.

水平全波力, 鉛直全波力, 顛倒모멘트를 각각 F_H , F_V , M_o 라 할 때(Fig. 5 참조), 各 時點마다 미끌림과 顛倒에 안정하게 되는 케이슨의 最小 所要重量 W^s 와 W^o 는 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$W^s = \frac{F_H}{\mu} + F_V \quad (1)$$

$$W^o = \frac{M_o}{R_c} \quad M_o \geq 0 \quad (2a)$$

$$= \frac{M_o - F_V \cdot w}{w - R_c} \quad M_o < 0 \quad (2b)$$

여기서, μ 는 케이슨과 地面 사이의 摩擦係數로서 0.6을 사용하였다. R_c 는 모멘트의 팔길이, 즉, 회전점에서 케이슨의 有效 무게중심까지의 거리이며 케이슨이

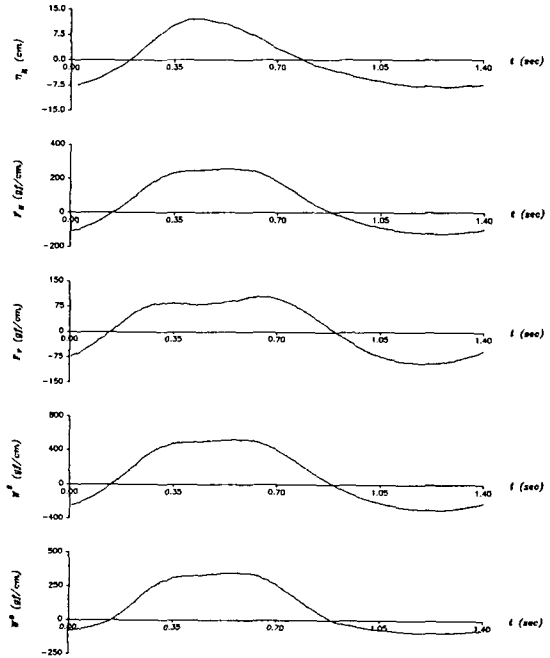


Fig. 15. Time series of total wave forces and required weights in solid wall breakwater ($T=1.4$ sec).

거치된 상태에서 케이슨의 水中 부분에 의한 浮력을 고려하여 결정하였다. 式 (2a)는 모멘트 M_o 가 陽인 경우이므로 케이슨이 港內로 전도되는 경우에 대한 것이며, 式(2b)는 케이슨이 港外로 전도되는 경우에 대한 式이다.

일반적으로 케이슨이 미끌림에 대해서 安定하면 顛倒에 대해서도 安定한 것으로 보고되고 있어 케이슨의 所要重量은 주로 式(1)에 의해서 결정됨을 추정할 수 있다. 케이슨의 미끌림 및 顛倒에 대한 限界重量 W_c^s 와 W_c^o 는 각각 W^s 와 W^o 의 최대값으로 정의할 수 있으며, 케이슨의 活動限界重量 W_c 는 W_c^s 와 W_c^o 중 큰 것으로 정의할 수 있다.

無孔케이슨과 有孔케이슨의 全波力, 케이슨 最小 所要重量의 時系列을 분석하였다. Fig. 15과 Fig. 16은 週期 1.4초에 대한 時系列이며 각각 무공케이슨과 유공케이슨에 해당한다. 무공케이슨의 경우, 全波力과 所要重量의 位相이 거의 동일함을 볼 수 있지만, 有孔케이슨의 경우는 위상이 서로 상당히 차이가 남을 볼 수 있다. 특히, Fig. 16에서 F_V 의 최대값은 F_H 의 최대값보다 早期에 나타나며 F_H 의 최대값의 作用時

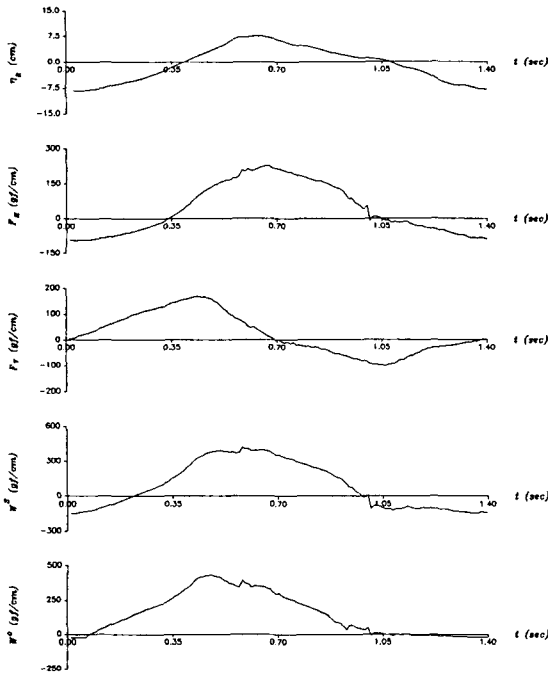


Fig. 16. Time series of total wave forces and required weights in perforated wall breakwater ($T=1.4$ sec).

點에서 F_v 의 값은 케이스 地面波力 F_5 보다 작음을 알 수 있다(Fig.9 참조). 이러한 현상은 앞서 언급한 대로 유수실 底面 파력과 케이스 地面波力間의 時系列상 位相差에 의한 것이다.

유공케이슨에서 鉛直全波力の 증가는 시계열상에서 부분적으로 케이스 소요중량의 증가를 초래하며 水平全波力の 감소에 의한 중량 감소효과를 다소 低減하는 역할을 한다. 그러나, 무공케이슨에 비해 유공케이슨의 所要重量的 최대치, 즉 活動限界重量的의 감소는 거의 수평전파력의 감소에 의한 것으로 연직전파력 자체 증가에 의한 영향은 매우 미미하다. 왜냐하면, Fig. 16이 보이는 것처럼 水平全波力이 연직전파력에 비해 상대적으로 우세하며 活動한계중량의 發生時點에서 時系列上的 鉛直全波力은 거의 零에 접근하기 때문이다. 다만, 유공케이슨에서 水平全波力과 미끌림 所要重量的의 시계열을 비교하여 보면, 全실험과 週期에 걸쳐 活動한계중량을 수평전파력의 최대치보다 早期에 발생케 하는 鉛直全波力의 효과를 감지할 수 있다. 이는 수평파력과 연직파력이 거의 동시에 작용하며 活動限界重量이 이들 파력의 최대치에서 결정되는 無孔케이슨과는 상당히 다른 樣相을

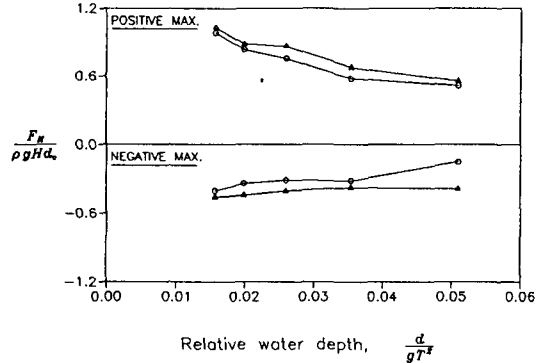


Fig. 17. Variation of maximal horizontal wave force with respect to relative water depth (Δ : solid wall, \circ : perforated wall).

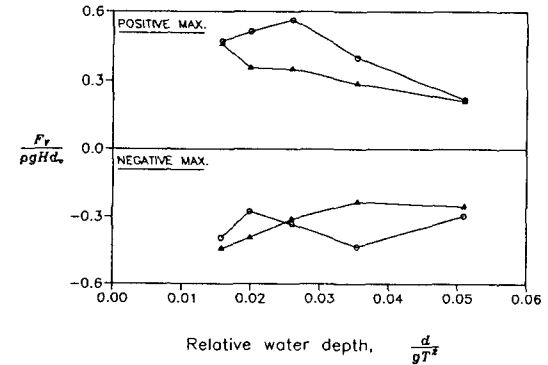


Fig. 18. Variation of maximal vertical wave force with respect to relative water depth (Δ : solid wall, \circ : perforated wall).

보인다. 본 실험결과에 의하면 有孔케이슨의 活動한계중량의 감소는 無孔케이슨에 비해 작은 수평전파력과 아울러 케이스 地面파력과 유수실 底面파력이 相殺되는 二重要因에 의해 초래된다. 따라서, 遊水室 부분 陽壓力을 배제하여 유공케이슨 安定도를 고려하는 日本 港灣協會(1989)의 방법은 본 실험결과에 비추어 볼 때, 타당하다고 판단된다.

無孔케이슨과 유공케이슨을 對比하여 상기 全波力과 케이스 活動限界重量的의 相對水深 d/gT^2 에 따른 변화양상을 분석하였다. Fig. 17-20은 이들 물리량의 陽方向 최대값과 陰方向 최대값의 변화를 보여준다. 그림에서 有·無孔 공히, 각 무차원 물리량은 모두 相對水深이 증가하면서 絶對值가 감소하며, F_H , F_v , W^a , W^b 의 양방향 최대값은 각각의 陰方向 최대값보

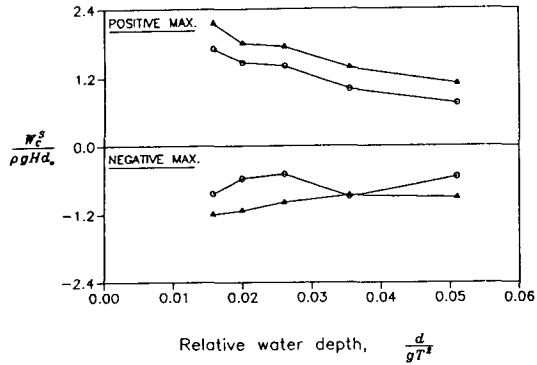


Fig. 19. Variation of critical weight against sliding with respect to relative water depth (Δ : solid wall, \circ : perforated wall).

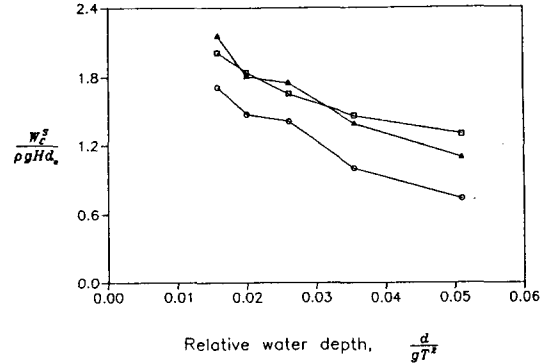


Fig. 21. Comparison of critical weight between the measured values and the values based on Goda's formula (\square : Goda, Δ : solid wall, \circ : perforated wall).

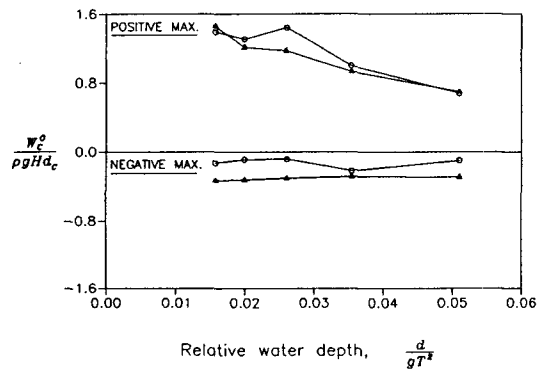


Fig. 20. Variation of critical weight against overturning with respect to relative water depth (Δ : solid wall, \circ : perforated wall).

다 절대치에서 크기를 보여주고 있다. 또한, F_H 의 陽方向 최대값은 無孔의 경우가 有孔보다 크며, F_V 의 최대값은 이와 반대임을 관찰할 수 있다. 무공케이슨에 비하여 유공케이슨의 F_V 의 최대값 증가는 앞절에서 언급한 것처럼 유수실 底面 파력과 케이슨 地面 파력이 동시에 鉛直 上方向으로 작용한데 기인한다. 또한, 有·無孔 공히 미끌림 한계중량 W_c^s 는 相對水深이 증가함에 따라 감소하며 顛倒 활동한계중량 W_c^o 보다 크기를 알 수 있다. 미끌림 한계중량 W_c^s 의 경우, 有孔이 무공보다 작으며, 그 반면 顛倒 活動한계중량 W_c^o 는 미미하나마 有孔이 無孔보다 크게 나타나 있다. 그러나, 상대적으로 큰 값을 갖는 미끌림 限界重量이 케이슨의 活動限界重量으로 채택이 되기 때문에 安定度 면에서 유공케이슨이 무공케이슨보다 유리하다

고 할 수 있다. 바꾸어 말하면, 同一한 파랑조건하에서 유공케이슨이 무공케이슨보다 輕量인 상태에서 같은 安定度를 유지할 수 있는 것이다. Fig. 21은 有·無孔 케이슨에 대한 미끌림 活動한계중량의 측정치와 Goda式에 의한 無孔케이슨 파압분포로부터 계산된 값들과의 비교를 보여주고 있다. 無孔의 경우는 Goda식에 의한 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 반면, 有孔의 경우는 비교한 全 조건에 대해서 무공에 비해 작음을 알 수 있다.

4. 結 論

越波 발생과 衝擊波壓이 발생하지 않는 파랑조건 하에서 水理模型實驗을 통하여 有孔케이슨과 無孔케이슨간의 部材波壓 특성, 케이슨의 安定度 특성을 비교하였다. 部材波壓은 무공케이슨의 경우 Goda식이 예측하는 분포와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 部材波壓 분포에서 각 부재에 작용하는 파력을 계산하여 이들 波力의 相對水深(d/gT^2)의 증가에 따른 변화를 분석한 결과, 이들 파력은 상대수심의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 유공케이슨의 경우, 遊水室 저면파력과 케이슨 地面 파력의 시간 변화양상을 검토한 결과, 이들 사이에는 다소의 位相 차이가 존재하며, 경우에 따라서는 서로 相殺되지 않고 鉛直 上方向으로 동시에 작용하는 上昇效果를 보일 수 있음을 관찰하였다. 有孔壁을 설계하기 위해서는 유공벽 下端에 작용하는 전단력 및 모멘트를 결정해야 한다.

측정결과를 Goda식에 근거한 無孔 전면벽 파압분포로부터 계산된 값과 비교하여 본 결과, 전단력은 Goda式에 根據한 계산치가 측정치의 약 1.5배 정도 큰 값을 주는 것으로 나타났다.

케이슨 安定度에 대해서는, 各 部材 波力으로부터 水平全波力과 鉛直全波力을 계산하고 이들로 부터 케이슨의 미끌림과 케이슨 Heel을 회전점으로 한 顛倒에 대한 케이슨 活動限界重量을 계산하였다. 有·無孔 공히 미끌림 활동한계중량이 전도보다 크게 나타났다으며 케이슨의 안정도에 대한 活動한계중량을 미끌림 한계중량으로 채택하는 통상의 방법이 본 실험에 사용된 파랑의 범위내에서 타당함을 입증하였다. 또한, 有孔케이슨의 경우가 無孔케이슨의 경우에 비해 活動한계중량이 적게 소요됨을 입증하였다. 水平全波力과 연직전파력을 별도로 고려할 때, 수평전파력은 유공케이슨이 무공보다 작으며, 鉛直全波力은 이와 반대 현상을 보였다. 그러나, 이들 全波力 時系列의 合成에 의한 케이슨 소요중량의 時系列을 고려할 때, 有孔케이슨의 경우 所要重量의 최대치, 즉 活動限界重量의 시점에서는 鉛直全波力이 거의 零에 근사하며 活動한계중량이 거의 수평전파력에 의하여 결정되는 것으로 나타났다. 결국, 무공케이슨에 비해 유공케이슨의 活動한계중량의 감소는 수평전파력의 감소와 鉛直 部材波力들간의 相殺效果 등 二重의 물리적 현상에 의하여 초래됨을 확인하였다.

실험결과를 토대로 하여 판단하여 볼 때, 有孔防波堤는 無孔防波堤에 비해 反射率과 케이슨 所要重量面에서 성능이 우수한 방파제형태로 판단된다. 특히, 安定度面에서 遊水室 부피만큼 중량이 감소되었기 때문에 유공케이슨의 安定度가 無孔케이슨에 비해 떨어진다는 기존의 평가는 다소 修正을 요한다고 볼 수 있다. 같은 安定度를 유지하기 위한 케이슨 幅의

증가는 일반적으로 생각할 수 있는 遊水室 부피에 相應하는 幅의 증가만큼은 필요치 않음을 입증하였다.

본 실험결과는 越波 및 衝擊波壓이 발생하지 않는 파랑조건에서 수행한 것이므로, 모든 연구내용이 越波가 발생하는 경우에는 그대로 적용하기는 어려우리라 사료된다. 따라서, 유공케이슨의 水理特性을 좀 더 명확히 파악하기 위해서는 越波條件을 포함하는 後續 실험적 연구가 요구된다.

謝 辭

本 研究는 韓國海洋研究所에서 수행한 1992년도 基本研究事業 結果의 일부를 拔萃하여 收錄한 것이며, 실험수행에 도움을 아끼지 않은 張世喆氏에게 謝意를 表합니다.

參考文獻

- 韓國海洋研究所, 1993, 混成防波堤의 케이슨에 作用하는 波壓分布 特性 (I), BSPE 00335-549-2.
- Goda, Y. 1985. Random seas and design of maritime structures, University of Tokyo Press.
- Jarlan, G.E. 1961. A perforated vertical wall breakwater. *The Dock and Harbor Authority*, 41(488), pp. 394-398.
- Takahashi, S., 1991, Design method of perforated wall caissons, Personal memo, Port and Harbor Research Institute.
- Tanimoto, K., Takahashi, S. and Kimura, K., 1987, Structures and hydraulic characteristics of breakwaters-The state of the art of breakwater design in Japan, Port and Harbor Research Institute, 26(5).
- 日本 五洋建設株式會社, 1983, 防波堤 護岸形式의 經濟性 安全性에 關する 調査, 日本 電力中央研究所 委託.
- 日本 港灣技術研究所, 1986, 港灣技術資料, 防波堤構造集覽, No. 556.
- 日本 港灣協會, 1989, 港灣의 施設의 技術上의 基準·同解説.