

# 국외 호안 블록의 수리특성 시험방법



**이 두 한** |  
한국건설기술연구원 하천해안항만연구실  
수석연구원  
dhlee@kict.re.kr



**태 동 현** |  
한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구원  
supertae@kict.re.kr

## 1. 머리말

호안 블록은 제방의 제외 비탈면의 침식 방지를 목적으로 설치되는 구조물로 일반적으로 과대한 유속과 소류력의 발생이 예상되는 구간에 설치된다. 국내에서는 2000년대 이전에는 단순한 형태의 돌기형 콘크리트 블록이 주로 사용되었고, 2000년대 이후에는 하천환경을 고려하여 식생의 생장이 가능한 다양한 형태의 친환경 호안 블록이 개발되어 적용되고 있다. 최근 국내에서는 일본 국토개발연구센터(1999, 2000)의 하천설계기법 및 호안 설계 기법을 소개하고 이를 기초로 국내 설계 기법 제시를 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(윤광석 등, 2006, 류권규 등, 2010).

제방 호안의 설계를 위해서는 블록의 수리 특성,

즉, 조도계수, 한계 소류력, 항력계수 및 양력계수 등이 필요한데, 이와 같은 수리특성은 특정 호안 블록의 형상 및 시공 방법 등의 영향을 받으며, 실험에 의해 결정되어야 한다. 그러나 국내의 호안 블록은 치수적·생태적 중요성에도 불구하고 대부분의 블록이 이론이나 기초적인 실험에 의해 개발된 것이 아니고 경험 및 모방에 의해 개발되었고 수리 실험에 의해 특성이 제시된 경우가 없다. 즉, 현재 실제 하천에 적용된 대부분의 호안 블록에 대한 수리특성이 불명확한 상태로 수리안정성에 대해서 충분히 검증되었다고 보기 어려운 상태이다.

미국 및 일본의 경우에는 호안 블록의 수리특성 시험방법을 표준화하여 정확한 실험을 통해서 호안 블록 제품들의 수리특성을 제시하고 있으며 이를 이용하여 호안 설계를 수행하고 있다. 기사에서는 일본 및 미국의 호안 블록 수리특성 시험방법을 소개하고자 한다.

## 2. 미국의 호안 블록 수리특성 시험방법

미국의 경우에는 연결형 콘크리트 블록(ACB, Articulating Concrete Block) 및 침식방지물(RECP, Rolled Erosion Control Product)의 시험방법에 대해서는 미국 재료시험학회(ASTM, American Society for Testing Materials) 기준

이 제시되어 있다. 여기서 연결형 콘크리트 블록은 개별 블록들이 기하학적 형상, 케이블, 로프 등에 의해 서로 결합되어 있는 블록을 말하지만 연결형이 아닌 경우에 본 기준들을 적용하여 시험이 가능하다. ASTM D 7277-08은 연결형 콘크리트 블록에 대한 시험 방법을 제시하고 있으며, ASTM D 7276-08은 연결형 콘크리트 블록의 시험 데이터의 분석방법에 대해서 제시하고 있다. 본 기사에서는 ASTM D 7277-08 및 ASTM D 7276-09를 소개하고자 한다.

### 2.1 블록 시험체의 시공방법

블록 실험수로는 그림 1과 같은 형태를 가지는데 블록이 설치 구간 하부에는 토층으로 기반층을 구성한다. 기반층의 두께는 최소 300mm이며 100 ~ 150mm 정도를 덧붙여서 다져야 한다. 수로는 직사각형 단면으로 구성하는데 수로의 최소 폭은 1.2m이다. 실제 폭은 실험 수로에 블록을 시공할 때 현장의 표준 시공 방식을 반영할 수 있어야 하며 실규모 블록 개체 및 블록 열을 설치할 수 있어야 한다. 수로 경사면의 높이는 수평방향으로 1.8m 길이가 설치되고 그 하류에 2:1 경사의 경사면이 설치될 수 있도록 구성되어야 한다.(그림 1 참조) 실험 수로의 수평면 및 경사면에 블록을 설치할 때에는

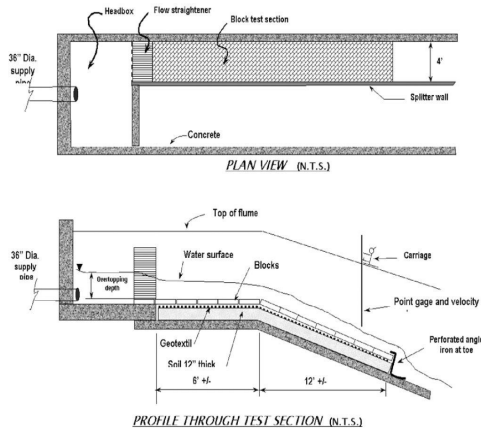


그림 1. 블록 실험수로 개념도

제조사가 제시하는 시공방법에 따라 적절한 필터(토목섬유, 자갈층 등)와 토층을 함께 시공한다.

### 2.2 시험 절차

블록의 수리특성은 일정한 유량을 4시간 동안 방류하여 시험한다. 4시간 방류 후에 변형, 토양 손실, 필터층 등의 손상이 없을 경우에 유량을 증가시켜 시험을 수행한다. 목표 유량은 단계별로 어떤 유량값을 설정하여도 되지만 보통은 사면부 정상부의 수심에 해당하는 유량을 설정한다. 방류 중에 블록 전체의 대규모 손상이 아닌 소규모 손상이 발생한 경우에는 4시간 방류를 지속한다. 수위는 매 시간 경사면의 중앙을 따라 0.6m 간격을 측정한다. 하상고는 블록의 최상부를 기준으로 측정하는데 방류 시작전과 종료 후의 동일한 수위 측정지점에서 측정한다. 측정 시의 측정 한계는 3mm 이내로 한다. 유속의 경우도 매 시간 측정하며 측정 간격은 1.2m 간격으로 두며 위치는 수위 측정 위치와 동일하게 설정한다.

### 2.3 시험 결과

공급수조나 관로에서 측정된 유량( $Q_t$ )이 시험 수로에서 측정된 유량( $Q_p$ )과 차이가 날 수 있다. 이를 고려하여 시험결과 분석을 위한 대표유량( $Q_r$ )을 결정하여 한다. 시험수로의 각 측정지점에서의 측정 유량  $Q_{p,n}$ 는 다음과 같은 연속방정식에서 계산한다.

$$Q_{p,n} = AV_{p,n} \tag{1}$$

여기서,  $V_{p,n}$ 은 3점법의 경우  $(V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8})/3$ 으로 계산하며, 일점법의 경우  $V_{0.6}$ 을 사용한다. 이상의 계산 결과를 분석하여 가장 신뢰성이 높은 대표 유량  $Q_r$ 을 결정하고 이후 계산에서는 이 값을 유량값으로 이용한다. 단면 평균 유속  $V_{ave}$ 도 대표 유

량  $Q_i$ 을 단면적으로 나누어 계산한다. 수심  $y_0$ 는 측정된 수위에서 측정된 하상고를 제하고 경사면의 각도로 보정하여 제시한다.

블록 안정성의 한계지점에서의 수리조건은 호안 블록 성능을 나타내는 수리한계조건을 결정한다. 일반적으로 안정성 한계조건에서의 전단력과 유속은 특정 호안 블록의 설계기준으로 사용된다. 호안 시험 기준은 이와 같은 수리동력학적 작용력에 대한 호안 블록의 저항력을 측정하는 것이다. 호안 블록의 안정성 한계조건은 사석, 개비온 또는 유사 이동 이론과 유사한 시초 운동(incipient motion) 기준에 바탕을 두고 있다. 블록의 초기 거동을 관측하기가 쉽지 않으므로 안정성 한계 조건을 개별 호안 블록의 움직임을 근거로 하기는 쉽지 않다. 따라서 한계 조건은 블록과 하부의 토층 사이의 상호작용에 근거하여 결정되어야 한다. 실험자는 블록이 하부 토층에 대해서 움직이는지를 주의 깊게 체크하여야 한다.

실험자가 안정성 한계 조건을 결정하는 것은 다소 주관적인 면이 있는데, 한계 조건은 블록과 하부의 토층 사이에서 토층의 손상이 발생하는 것을 어떻게 해석하느냐에 달려있다. 다음과 같은 상황이 발생할 경우에는 한계 조건에 도달하였고 할 수 있다.

- ① 블록이 연직 방향으로 이동하였거나 블록 자체가 움직인 경우
- ② 토목 섬유 아래의 토층이 유실되어 공극이 발생한 경우
- ③ 하부 토층이 크게 유실된 경우

## 2.4 시험 결과 분석

미국의 시험기준은 고유속에 수심이 얇은 사류 상태에서 시험이 수행된다. 사류 상태에서는 수심 측정 시의 작은 오차에 의해 에너지 및 전단력 계산에서 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 결과 분석에 주의가 필요하다. 안정성 한계 조건을 결정하는 기

본적인 수리량은 유량  $Q_i$ , 평균유속  $V_i$ , 수심  $Y_i$ , 마찰경사  $S_{fi}$ , 조도계수  $n$ , 경계 전단력  $\tau$  등이다.

수심은 앞에서도 언급한 것과 같이 수위와 호안 블록 표면고의 차이를 수로 사면 경사  $\theta$ 로 보정하는데 계산식은 다음과 같다.

$$y_i = (h_i - z_i) \cos \theta \quad (2)$$

각 측정에서의 마찰경사  $S_{fi}$ 는 다음 식으로 계산한다.

$$S_{fi} = (n V_i)^2 \frac{1}{y_i^{4/3}} \quad (3)$$

마찰경사 계산식은 측벽이 블록 표면에 비하여 조도가 무시할 수 있을 정도로 낮으므로 총 저항력은 하상 조도가 지배적이라는 가정에서 도출된 식이며 조도계수  $n$ 은 아직 미정이다. 유량, 수로 폭, 하상고 및 수위를 알고 있기 때문에 조도계수  $n$ 의 결정이 가능하다. 시험 조건의 흐름상태가 사류이므로 표준 측차법(standard step method)에 의한 운동량 방정식을 하류 방향으로 계산하여야 하며 식은 다음과 같다.

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{2q}(v_1 + v_2)(v_1 - v_2) - \frac{L}{2}(S_{f1} + S_{f2}) \quad (4)$$

여기서, 각 변수는 다음과 같다.

$h_1, h_2$  : 각각 상류 및 하류 지점에서의 수위

$v_1, v_2$  : 각각 상류 및 하류 지점에서의 유속

$L$  : 1번 측정 및 2번 측정 사이의 경사면 거리

$S_{f1}, S_{f2}$  : 각각 상류 및 하류 지점에서의 마찰경

사로 앞의 마찰경사 식으로 계산

조도계수는 식(3) 및 식(4)의 반복계산으로 결정되는데 다음과 같이 목적함수를 설정하여 목적함수가 최소가 되는 값으로 조도계수를 설정한다.

$$\xi = \sum_{i=t_1}^{t_n} |h_{pred} - h_{obs}| \quad (5)$$

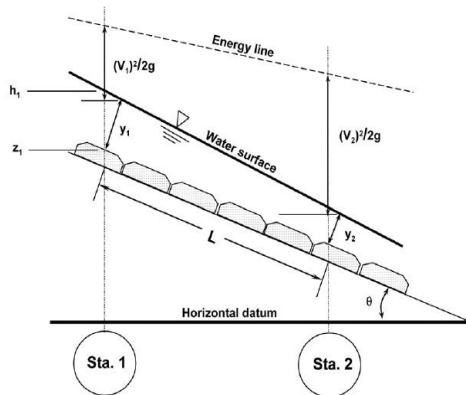


그림 2. 시험결과 분석을 위한 변수의 정의

여기서, 각 변수는 다음과 같다.

- $i_1$  : 첫 번째 측정점
- $i_n$  : 마지막 측정점
- $h_{pred}$  : 예측 수위(계산 수위)
- $h_{obs}$  : 측정 수위

여기에서 뉴턴-랩슨 방법을 적용하게 되는데 뉴턴-랩슨 방법은 다음과 같다.

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \left( \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} \right) \quad (6)$$

식 (4)의 함수  $f(x)$ 는 운동량 방정식을 재정리하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f(x) = f(h_2) = 2g(h_2 - h_1) + g \Delta x (S_{f2} + S_{f1}) + (v_2 + v_1)(v_2 - v_1) \quad (7)$$

함수  $f(x)$ 의  $x (= h_2)$ 에 대한 도함수는 다음과 같다.

$$f'(x) = f'(h_2) = 2g - \frac{3.33g \Delta x S_{f2}}{y_2} - \frac{2v_2^2}{y_2} \quad (8)$$

여기서,  $h_2, S_2, y_2, v_2$  등은 각 반복계산에서 재계산되며  $S_2, y_2, v_2$  등은 기지의 단위 유량  $q$ 에 대한  $h_2$ 의 함수이다. 계산은 상류 측정점에서 측정된 상류 수위에서부터 하류방향으로 진행되는데 계산 진

행 절차는 그림 3을 참고할 수 있다.

단면 평균 유속  $V_{ave}$ 는 앞에서 결정된 유량을 단면적  $A$ 로 나눈 값인데 여기서 단면적은 각 측정점에서 경사면에 연직인 면적이다. 총수두 (EGL, energy grade line elevation)는 각 측정점에서 다음 식으로 계산한다.

$$EGL_i = z_i + y_i \cos \theta + \frac{V_i^2}{2g} \quad (9)$$

에너지 경사 계산에서는 시험 구간의 경사를 대표하는 자료에 대해서 분석하여야 하며 수평면에서 경사면으로 변하는 지점은 제외하여야 한다. 바닥면의 소류력은 다음과 같이 계산한다.

$$\tau_0 = \gamma y S_f \quad (10)$$

여기서  $\gamma$ 는 물의 단위 중량으로  $9,810 \text{ N/m}^3$ 이며, 수심  $y$ 는 하상에서 연직 방향의 수심이다. 식 (10)에서 마찰경사  $S_f$ 를 계산하기 위해서는 2개 이상 측정점에서의 자료와 대표 수심이 필요한데 마찰경사  $S_f$ 는 일반적으로 측정 자료의 선형회귀분석을 통해서 결정되며, 대표 수심은 측정 수심을 평균하여 사용한다. 또 다른 방법으로는 운동량 방정식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_0 = \frac{\gamma}{2} (y_1 + y_2) \sin \theta + \frac{1}{L} \left[ \frac{\gamma}{2} (y_1^2 - y_2^2) \cos \theta - \rho q^2 \left( \frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \right] \quad (11)$$

결정된 최적 조도계수를 이용하여 유속 및 소류력을 그림 4와 같이 계산할 수 있다.

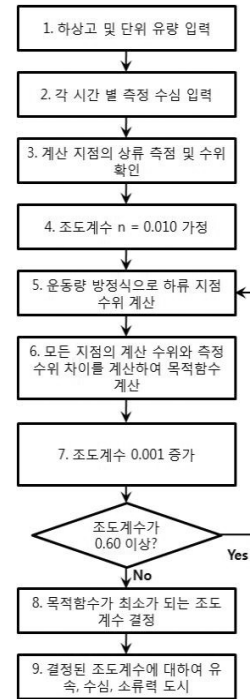


그림 3. 시험결과와 계산 절차

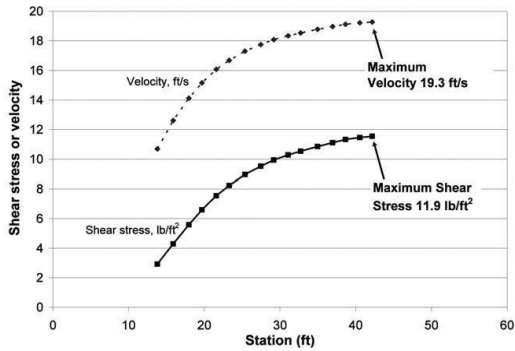


그림 4. 유속 및 소류력 계산 예

### 3. 일본의 호안 블록 수리특성 시험방법

일본에서 호안 블록은 1910년에 홋카이도(北海道) 유바리카와(夕張川) 해안의 하안침식 대책공법으로서 아카자키(岡崎)식 단상 블록이 이용된 것을 시작으로, 양력 저감이나 토사유출 방지를 목적으로 개발된 철형(凸型)블록이나 L형 블록 등이 이용되어 왔다. 그 후, 1990년의 '다자연형 강만들기 추진에 대해'라는 전국 통지, 1997년의 하천법 개정에 의해 블록에도 역학적 안정성과 함께 환경성능이나 경관성 등 부가적인 기능이 요구되어 왔다.

호안 블록의 고유 수리특성은 '호안 블록의 수리 성능 시험법 매뉴얼(1999)'에 따라 재단법인 토목 연구센터가 실시하고 있는 수리특성 시험에 의해 평가하고, '호안의 역학 설계법(1999)'에 따라 외력 및 내력을 고려하여 안정성 검토를 수행한다. 그러나, 호안 블록의 유수에 대한 안정성의 대조조사에는 호안 블록의 수리 특성을 나타내는 항력계수, 양력계수 및 상당조도(相当粗度) 등이 필요한데, 기존의 다양한 형상 블록에 대해 수리특성치가 계통적으로 조사되었던 적이 없었기 때문에 「호안의 역학 설계법」에 따른 설계가 곤란하였다. 이에 따라 재단법인 토목연구센터에 대학·건설성의 관계자를 위원으로 '호안 블록 시험법검토위원회'를 설치해, 실제로 수리실험을 실시하여 시험법을 책정하고, 1999년 7월에 '호안 블록의 수리특성치 시험법

매뉴얼'을 제시하였다.

호안 블록의 수리특성치 실험에서는 '호안의 역학 설계법'에 이용되는 이하의 4가지 항목에 대해 계측을 실시하고 있다.

- ① 단체(單體) 설치시의 항력계수·양력계수
- ② 군체(群體) 설치시의 항력계수·양력계수
- ③ 군체 상류단의 블록에 작용하는 항력·양력에 의한 회전 반경
- ④ 상당조도

실험에서는 축소된 계측용 블록을 단체, 군체의 중앙, 군체 상류단에 설치하고, 각 상태에서 블록에 작용하는 항력·양력·회전 모멘트에 대해 분력계를 이용해 계측한다. 블록의 축척은 대략 1/10 정도로 하고 있다. 수로는 정밀한 실험이 가능한 실험수로에서 수행되며 흐름의 안정을 위하여 수로의 중



그림 5. 단일 블록 시험



그림 6. 군체 블록 시험

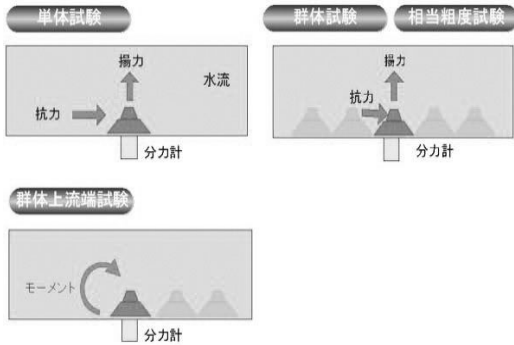


그림 7. 호안 시험의 종류

양부분에 계측용 블록을 설치하여 계측을 수행한다.

레이놀즈수의 변화에 따라 항력 및 양력에 미치는 영향 등을 파악하기 위해 수위를 일정(30cm 정도)하게 유지한 상태로 유량을 변화시켜 실험을 수행한다. 유량은 최대 400 l/s 정도로 하고, 5단계로 유량을 변화시켜 레이놀즈수에 의해 항력계수 및 양력계수가 변화하지 않음을 확인할 필요가 있다.

수심(H)은 측벽의 영향을 고려해 수로폭(B)에 대해 B/H > 3이상이 되도록 설정하는 것이 좋으며 일부 돌기높이가 높은 블록에 대해 B/H > 3 이상을 만족할 수 없는 경우에는, 측벽에 의한 영향이 수로 중앙부에는 미치지 않는다는 사실을 유속분포 계측으로 검토할 필요가 있다.

블록에 작용하는 항력 및 양력은 일반적으로 분력계를 이용해 계측하는데 계측정밀도와 계측한계를 고려하여 적절하게 선정하여야 한다. 1분계에서 6분력까지 측정 가능하므로 계측 용도를 고려하여 결정하여야 한다. 호안 블록 수리 특성 시험을 위해서는 3분력 이상의 계측이 필요하며 분력계의 한계 측정 분력이 낮을수록 정밀도는 높으나 블록 모형 자체의 무게 및 작용 분력을 고려하여 한계치를 설정하여야 한다. 일반적인 실내 수로에서는 최소 20N 이상의 적용을 고려한다.

계측용 블록 상류에는 경계층의 발달을 고려해 단체시험에서는 입경(粒徑) 2mm 정도의 모래를 부설한 구간을 시험 수심의 30배 정도 설치하고, 경

계층이 충분히 발달한 구간길이를 설정할 필요가 있다. 군체시험에서는 수심의 15배 구간에 시험체와 같은 형상의 블록을 설치하고, 시험체에서의 경계층, 유속변동이 블록의 특성을 반영될 수 있도록 설정할 필요가 있다. 또한 군체시험에서 블록은 가로 방향의 균등성을 유지하기 위해서 가로 방향으로 최저 5개를 설치한다. 측정결과에 따른 항력 계수 및 양력 계수는 다음 식에서 계산한다.

$$D = 0.5pC_D A_d V_d^2 \tag{12}$$

$$L = 0.5pC_L A_b V_d^2 \tag{13}$$

여기서  $D$  및  $L$  은 각각 계측된 항력 및 양력이며,  $A_d$ 는 항력작용 면적으로 흐름에 대한 수평 방향의 전체 투영면적이며,  $A_b$ 는 양력 작용 면적으로 설치면과 연직한 전체 투영 면적이다. 블록 부근 유속  $V_d$ 는 단체 블록에서는 블록 천단 위치에서의 유속이 되며 군체 블록의 경우에는 상당조도 높이에서의 유속이 된다. 상당조도는 단면 연직 평균유속을 이용해 계산하는데 마찰속도  $u_*$ 에 대해서는 군체시험에서의 항력을 이용해 다음과 같이 계산한다. 여기서  $V_0$ 는 단면 연직 평균 유속이다.

$$\frac{V_0}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{H_d}{k_s} \right) \tag{14}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{D}{\rho A_b}} \tag{15}$$

#### 4. 맺음말

호안 블록이 설치되는 경우의 제방 호안 설계를 위해서는 실험을 통해서 개별 블록의 수리특성이 명확히 제시되어야 한다. 미국의 경우 ASTM 기준을 통해서 실규모 실험을 수행하고 조도계수 및 한계 소류력을 제시한다. 일본의 경우에는 축소 모형 실험을 통해서 조도계수, 항력계수, 양력계수 등을

제시하고 있다. 미국 기준에 따른 시험방법은 실규모로 실제와 유사한 상황을 재현하여 기반층의 유실에 대한 검토가 함께 이루어진다는 장점이 있으나, 시험의 흐름상태가 사류라는 단점도 있다. 일본의 경우에는 축소모형 실험을 수행하여 형상에 의한 수리특성만 도출되므로 기반층의 유실은 실험과정에서 검토되지 않고 설계과정에서 검토하는 특징을 가진다.

최근 국내에서는 다양한 친환경 호안 블록 제품이 개발되어 하천 현장에 적용되고 있으나 수리 특

성이 명확하게 제시되지 않은 상태로 시공되는 실정이다. 국내에서도 미국 및 일본의 사례를 바탕으로 체계적이고 과학적인 호안 블록 시험방법의 도입이 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 '2011 자연공생하천관리기술개발'에 의해 수행되었습니다. ☺

### 참고문헌

1. 류권규, 이남주, 이상호 (2010). "침식에 대한 일본의 제방 안정성 평가 방법", 물과 미래, 한국수자원학회, 제43권, 제4호, pp. 32-37.
2. 윤광석, 김규호, 이성준 (2006). "하천제방의 안전성(수공학적측면)", 물과미래, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 14-19.
3. 國土開發技術研究センター(1999) 護岸の力學設計法, 山海堂.
4. 財団法人土木研究センター(1999) 護岸ブロックの水利特性試験法マニュアル.
5. 國土開發技術研究センター(2002) 河道計畫檢討の手引き, 山海堂.
6. ASTM D7276-06, "Standard Guide for Analysis and Interpretation of Test Data for Articulating Concrete Block (ACB) Revetment Systems in Open Channel Flow".
7. ASTM D7277-08, "Standard Test Method for Performance Testing of Articulating Concrete Block(ACB) Revetment Systems for Hydraulic Stability in Open Channel Flow".