

셀 구조물의 항복하중에 미치는 체적의 영향

The Effect of the Volume of the Cellular Bulkhead on the Yield Load

장정욱* · 김현국** · 이재석*
 Jeong-Wook Jang*, Hyun-Guk Kim** and Jae-Seok Lee*

요 지 : 본 연구에서는 셀 구조물의 체적과 항복하중과의 상관관계를 규명하기 위하여 실내실험 및 수치해석을 수행하였다. 실험과 해석 결과 산출된 항복하중 값은 양호한 상관관계를 보였으며, 항복하중 값의 산출에 있어서 본 연구에서 수행한 유한요소 해석 기법은 타당한 것으로 검증되었다. 유한요소해석 결과, 셀 구조물의 체적 증가에 따라 항복하중은 증가되었으며 항복하중은 체적 증가비율만큼 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 셀구조물, 항복하중, 모형실험, 유한요소해석

Abstract : Experimental and numerical analysis has been carried out in this paper to understand correlation between volume and yield of cellular bulkhead. It was firstly confirmed from these results that the conditions and parameters considered in the finite element analysis were reasonable and realistic due to the fact that the yield loads determined by the two different methods were equivalent in actual. Based on this results, a series of intensive numerical analysis has been further performed and revealed that the yield load varied in direct proportion to the change in the volume of the cellular bulkhead.

Keywords : cellular bulkhead, yield load, model test, finite element method(FEM)

1. 서 론

셀 구조물은 1908년 뉴욕의 Buffalo 부근에 있는 Black Rock이라는 항만공사에서 처음으로 사용되었다. 그리고 1910년에는 Havana항에서 미국 전함인 Main호가 침몰되었을 때 주변 물막이 구조물로 사용되었다. 그 후 수문이나 가설구조물로서 각국에서 사용되기 시작하였다. 일본에 있어서 셀 구조물이 등장한 것은 1954년에서 1958년까지 실시된 鹽釜항에서의 1만톤 항만공사에서였다. 그 후 각 항만의 안벽공사에 본격적으로 사용되기 시작하였으며, 1970년대 중반에는 매립호안 구조물로서도 이용되게 되었다.

셀 구조물에 대한 설계법은 전단변형에 대한 셀 채움재의 저항을 어떻게 평가하느냐에 따라 그 내용이 상당히 달라진다(Terzaghi, 1945; White and Prentis, 1950). 현재까지 국외의 여러 연구 결과, 채움재의 전단저항에 대한 메카니즘의 상당 부분이 규명되어져 있다(White et al., 1963; Cummings, 1957). 그러나 그 연구의 대부분은 가설구조물로서 주로 사용되었던 이중벽 구조물이나 강시판 셀을 대상으로 수행되어진 것들이다. 따라서 현재 강시판 셀에 대한 설계법은 거의 확립되어 있다고 할 수 있다.

그러나 강판 셀 구조물에 대한 설계법은 아직 확립되어 있지 않다. 강시판 셀과 강판 셀은 외력에 대한 저항메카니즘에 있어서 상당한 차이를 가지고 있음에도 불구하고 현재 강판 셀의 설계시에는 강시판 셀을 대상으로 발전된 이론을 그대로 사용하고 있는 실정이다. 그 중에서도 수평외력이 작용했을 때의 변형특성을 추정하는 방법에 대해서는 강시판 셀에 대해서도 아직 확립되어 있지 않다.

셀 구조물에 관한 국내 연구로는 이차원 모델시험(Jang, 1996)과 셀 구조물의 축소모형시험(Jang, 1997)을 수행하여 수평외력에 대한 변형특성을 규명한 연구가 있으며(Jang, 1998), 채움재 보강 및 장경비에 따른 셀 구조물의 거동특성에 관한 연구가 있다(Kim, 2011; Lee, 2012).

셀 구조물이란 일정한 크기의 원통형 구조물을 해상에 일렬로 거치하거나 근입시켜 그 내부에 모래나 자갈 등의 채움재를 채워 외력에 대하여 저항하는 중력식 구조물이다. 셀 구조물은 설치와 동시에 채움재를 채우게 되므로 조기안정화가 가능하며, 구조가 단순하여 급속시공이 가능하고 수밀성이 뛰어나다는 등의 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 셀 구조물은 가설구조물에서부터 안벽이나 호안과 같은 영구 구조물에 이르기까지 폭 넓게 이용되어 지고 있다. 그리고 최

*창원대학교 토목환경화공융합공학부(Corresponding author: Jeong-Wook Jang, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon, Gyeongnam, 641-773, Korea, Tel:+82-55-213-3775, Fax:+82-55-213-3775, jang@changwon.ac.kr)

** (주)헤인이앤씨 지반부(Geotechnical Department, Hyein E&C)

근 해안 및 해안에 건설 또는 계획되고 있는 풍력발전기의 하부구조물로서의 적용성 또한 높을 것으로 판단된다.

이와 같이 셀 구조물은 다양한 용도로 이용되어질 수 있으며, 용도 및 건설 환경에 따라 그 크기 및 형태 또한 다양해질 것이다. 형태 및 크기에 따라 셀 구조물의 거동 특성 또한 달라질 것으로 생각되나 이에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 셀 구조물의 체적에 따른 거동특성을 알아보고자 하며, 구체적으로는 셀 구조물의 체적과 항복 하중과의 상관관계를 구명하고자 하였다.

셀 구조물의 거동특성은 실물 크기의 모형실험을 통하여 파악하는 것이 가장 정확할 수 있으나 이에는 상당한 비용과 시간이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 해석적 기법에 의하여 그 거동특성을 파악하고자 하였다.

본 연구에서는 장경비가 다른 셀 모형을 이용하여 재하높이 및 근입비를 변수로 하는 모형실험을 수행하였으며, 또한 동일 조건의 유한요소해석을 수행하였다. 실험과 해석 결과의 비교 분석을 통하여 해석적 기법의 타당성을 검증하고 셀 구조물의 체적이 항복하중에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 수행하였다.

2. 해석 기법의 검증

2.1 해석 기법 검증을 위한 실험 및 해석

본 연구의 해석 기법 검증을 위하여 모형 셀의 직경(B)과 높이(H)의 비를 기준으로 하중 재하위치별로 D/H(근입비)를 달리하여 총 20 CASE의 실험과 해석을 수행하였다. Table 1은 전체 실험 및 해석의 CASE를 정리한 것이며, Table 2는 B/H(장경비)에 따른 모형 셀의 폭과 높이, 근입깊이 그리고 체적을 정리한 것이다.

Table 1. Cases for experimental and numerical tests

B/H	Top loading		Central loading	
	D/H=0	D/H=0.25	D/H=0	D/H=0.25
1.00	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
0.90	CASE 5	CASE 6	CASE 7	CASE 8
0.76	CASE 9	CASE 10	CASE 11	CASE 12
0.60	CASE 13	CASE 14	CASE 15	CASE 16
0.49	CASE 17	CASE 18	CASE 19	CASE 20

Table 2. Geometrical features of cells use in the tests

B/H	B (cm)	H (cm)	Embedded depth (cm)	Volume (cm ³)
1.00	33.0	33.0	8.3	28210.5
0.90	32.0	35.5	8.9	28536.3
0.75	30.0	40.0	10.0	28260.0
0.60	28.0	46.5	11.5	28618.0
0.49	26.0	53.0	13.3	28125.0

2.2 모형실험

Fig. 1은 모형실험 장치의 전체 개요를 나타내고 있다. 길이 150 cm, 폭 100 cm, 높이 100 cm인 토조에 10층으로 나누어 각 층마다 다짐봉으로 다져 단위중량 15kN/m³의 균질한 지반을 조성하였다.

본 실험에서는 B/H와 D/H에 따라 총 10종류의 모형 셀을 사용하였다. 모형 셀은 두께 0.03 mm의 스테인리스 강판을 사용하여 제작하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용한 모형 셀을 나타내고 있다.

모형 셀을 지반에 거치 또는 근입시킨 후, 셀 내부에 채움재를 4단계로 층 다짐하여 단위중량이 15kN/m³이 되게 하였다. 재하는 폭 4 cm, 두께 0.03 mm의 스테인리스 밴드를 모형 셀에 밀착되도록 설치하여 밴드와 Load cell을 연결하고, Load cell과 하중 판을 와이어로 연결한 후 하중 판에 추를 올려놓는 방법으로 수행하였다. 재하하중은 Load cell에 의하여 측정하였으며, 재하위치는 두 종류(상부재하, 중부재하)로 하였다. 상부재하인 경우에는 재하밴드 상부가 셀의 상단부와 일치되는 조건, 중부재하인 경우에는 재하밴드 중앙부가 셀 높이의 중앙부에 일치되는 조건으로 재하를 수행하였다.

2.3 유한요소해석

MIDAS/GTS 프로그램을 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용한 정수는 Table 3과 같다.

셀 구조물은 채움재와 강판 셀로 이루어진 복합구조물이다. 채움재와 강판 셀은 서로 다른 재료이므로 둘 사이의 접촉면의 거동을 묘사하기 위해서는 경계요소의 적용이 필요하며, 경계요소 항목별 값은 Table 4에 정리하였다.

Fig. 3은 해석 과정을 나타내고 있다. 셀의 요소는 높이 방

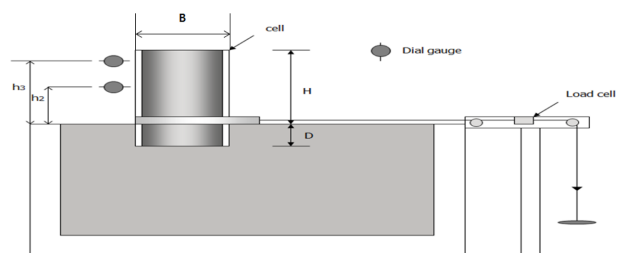


Fig. 1. Layout of experimental apparatus.



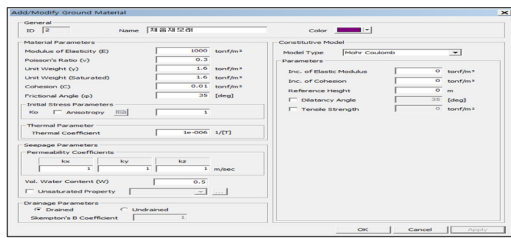
Fig. 2. Cells used in the tests.

Table 3. Input parameters for the numerical tests

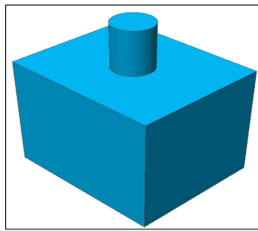
	Model type	$r_f(\text{kN/m}^3)$	$\phi(^{\circ})$	$c(\text{kN/m}^2)$	ν	$E_s(\text{kN/m}^2)$
Ground	M.C	15.0	35	0.0	0.3	1.0×10^4
Filler	M.C	15.0	35	0.0	0.3	1.0×10^4
Cell	Elastic	78.5	-	-	0.3	2.0×10^7

Table 4. Interface elements

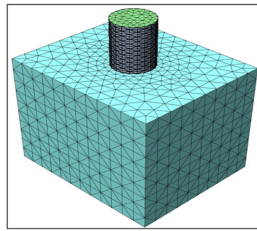
$R \times \phi(^{\circ})$	$R \times c(\text{kN/m}^2)$	$K_n(\text{kN/m}^3)$	$R_t(\text{kN/m}^3)$
$\frac{1}{3} \times 35$	0.0	1.0×10^5	3.0×10^4



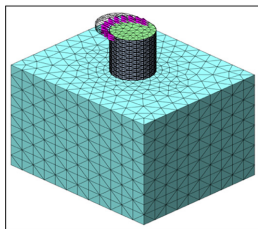
① Input Parameter



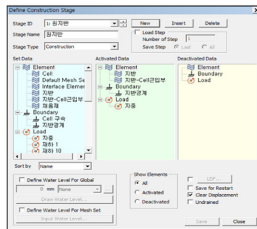
② Generating Solid



③ Generating Elements and Boundary Conditions set



④ Loading



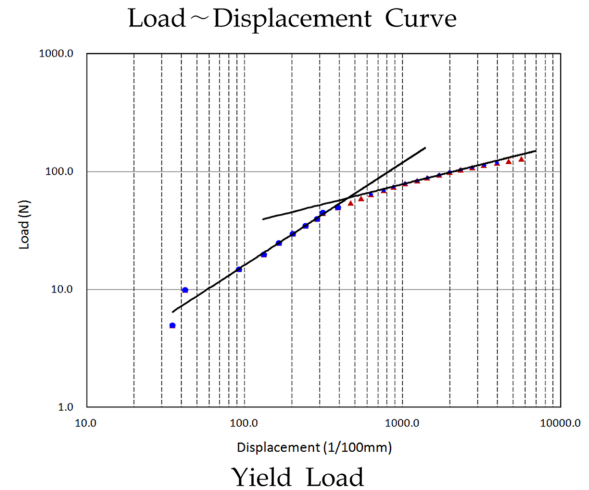
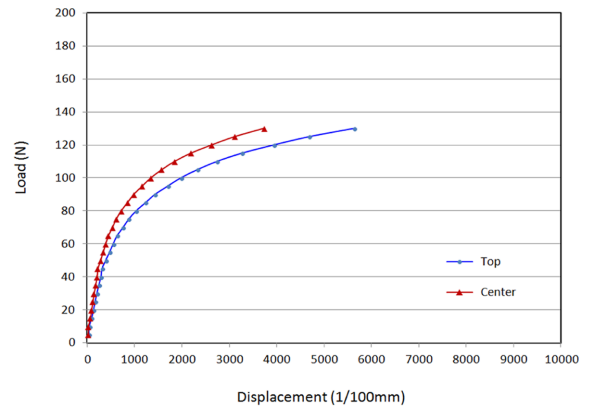
⑤ Construction Stage Definition and Analysis

Fig. 3. Analysis Process.

향으로는 2 cm씩 일정하게 분할하고 원주방향에 대해서는 등간격을 가지는 20개의 절점으로 분할하여 생성시켰다. 재하하는 재하밴드와 접촉하는 셀의 요소를 선택한 후, 총 하중을 접촉 면적으로 나눈 값을 등분포하중으로 접촉 요소에 작용시켜 모델링하였다.

2.4 항복하중의 정의 및 실험과 해석 결과의 비교

실험 및 해석 결과에서 얻어진 하중과 변위와의 관계를 양대수 그래프에 나타내어 직선으로 연결해 보면 변곡점을 찾을 수가 있다(Fig. 4). 이 변곡점은 하중에 의한 셀 변위의 변화율이 가장 크게 나타나는 상태를 의미하므로 외관상 항복

**Fig. 4.** An example of determining yield load by use of load-displacement curve.**Table 5.** Results of determined yield loads with respect to B/H in the cases of the top loading

B/H	Model Test (N)		FEM (N)	
	D/H=0	D/H=0.25	D/H=0	D/H=0.25
1.00	103.8	133.1	110.2	138.7
0.90	93.7	120.2	98.0	123.9
0.75	82.1	107.0	81.7	104.9
0.60	64.7	81.6	64.9	85.2
0.49	55.8	72.6	58.7	73.6

Table 6. Results of determined yield loads with respect to B/H in the cases of the center loading

B/H	Model Test (N)		FEM (N)	
	D/H=0	D/H=0.25	D/H=0	D/H=0.25
1.00	172.2	224.2	177.8	219.1
0.90	151.1	198.7	152.3	190.0
0.75	127.2	164.3	126.2	165.2
0.60	108.8	135.3	102.8	129.5
0.49	93.7	107.9	93.0	115.3

점으로 간주할 수 있다. 따라서 이 항복점에 대응하는 하중을 항복하중(Yield Load)이라 정의하였다.

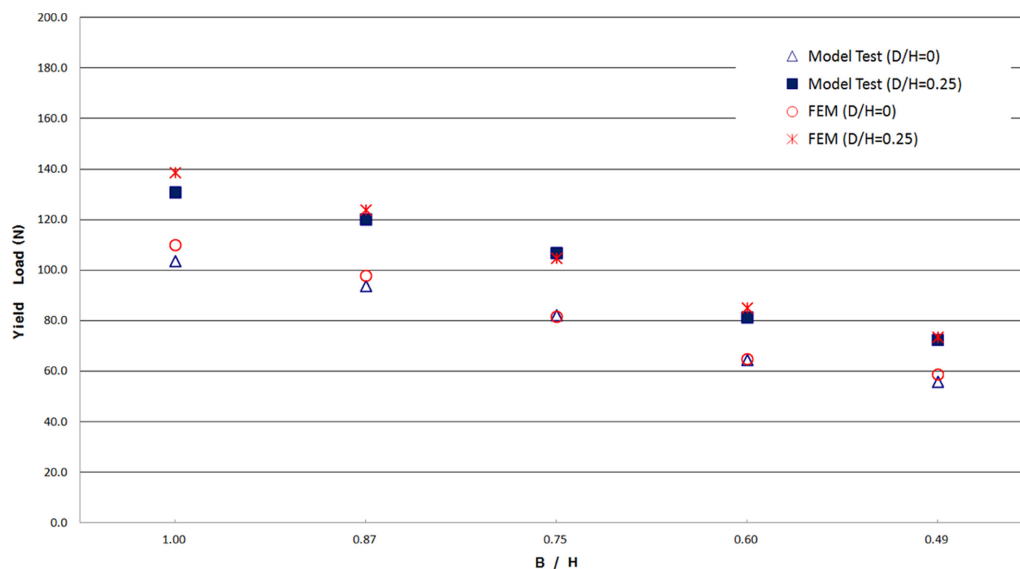


Fig. 5. Results of determined yield loads with respect to B/H in the cases of the top loading.

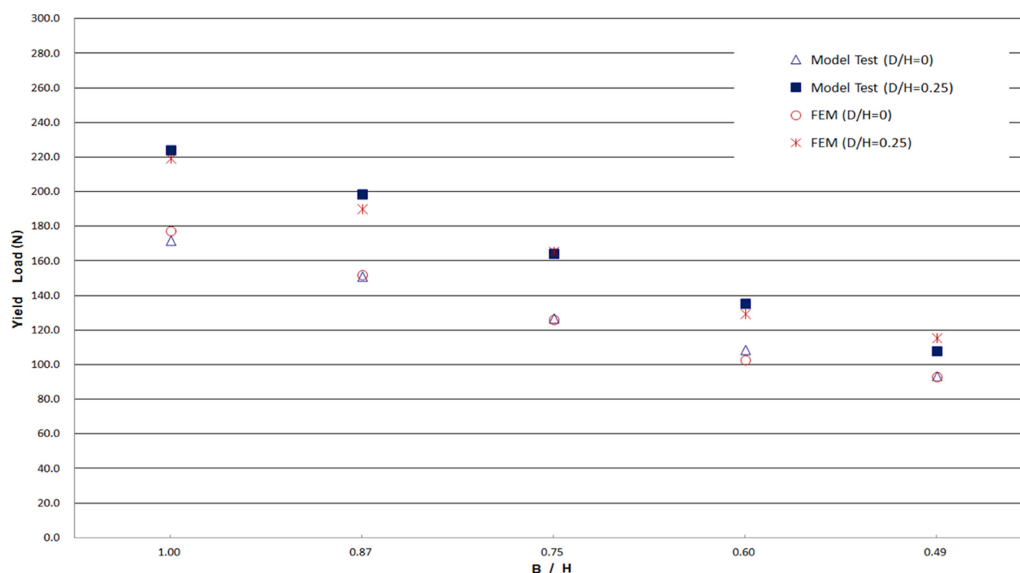


Fig. 6. Results of determined yield loads with respect to B/H in the cases of the center loading.

Table 5와 Table 6은 각각 상부재하 및 중부재하시의 모형 실험과 해석 결과로부터 산정된 항복하중을 정리한 것이다.

Fig. 5와 6은 Table 5와 6의 항복하중을 그래프로 나타낸 것이다.

Table 5와 6 그리고 Fig. 5와 6으로부터 모든 CASE에서 유한요소해석과 모형실험의 항복하중 값은 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 해석 시 사용한 각 정수들의 값과 해석 기법은 타당한 것으로 판단할 수 있다.

3. 체적비와 항복하중관계

체적과 항복하중과의 상관관계를 알아보기 위하여 해석기법의 타당성 검증을 위해 수행한 모형실험 및 해석과 거의 동일한 조건(B/H, D/H)을 가지고 체적만 달리하는 셀 구조물에 대한 해석을 수행하였다. Table 7은 체적이 증가된 셀 구

Table 7. Geometrical features of cells use in the additional numerical tests

B/H	B (cm)	H (cm)	volume (cm ³)
1.00	100.0	100.0	785398.2
0.87	95.6	110.0	789584.0
0.76	91.2	120.0	783900.3
0.60	84.6	140.0	786970.8
0.49	79.0	160.0	784267.2

조물의 체적을 나타내고 있으며, Table 8은 해석결과로부터 얻어진 항복하중 값을 정리한 것이다.

Table 9는 Table 8의 항복하중과 Table 5와 6의 항복하중(해석결과)을 비교하여 그 증가비를 정리한 것이다.

동일한 장경비에서 체적의 증가는 약 27.7배이며, 항복하중은 평균 26.1배 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 체적의 증

Table 8. Results of determined yield loads with respect to B/H in the additional numerical tests

B/H	Yield load (N)			
	Top Loading		Center loading	
	D/H=0	D/H=0.25	D/H=0	D/H=0.25
1.00	2,754	3,677	4,521	5,997
0.87	2,439	3,210	4,006	5,254
0.76	2,048	2,717	3,636	4,502
0.60	1,684	2,279	2,991	3,652
0.49	1,427	1,896	2,544	2,986

Table 9. Rates of yield loads with respect to cell volumes

B/H	Top loading		Center loading	
	D/H=0	D/H=0.25	D/H=0	D/H=0.25
1.00	25.0	26.5	25.4	27.4
0.87	24.9	25.9	26.3	27.7
0.76	25.1	25.9	28.8	27.3
0.60	25.9	26.7	29.1	28.2
0.49	24.3	25.8	27.4	25.9

가와 항복하중의 증가는 밀접한 관련이 있으며, 체적 증감에 따라 항복하중 값은 체적비에 비례하여 증감함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 셀 구조물의 체적과 항복하중과의 상관관계를 구명하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험과 해석 결과 산출된 항복하중 값은 양호한 상관관계를 보였으며, 항복하중 값의 산출에 있어서 본 연구에서 수행한 유한요소 해석 기법은 타당한 것으로 나타났다.
2. 셀 구조물의 체적 증감에 따라 항복하중은 증감되었으며, 항복하중은 체적 증감비율만큼 증감하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- Cummings, E.M. (1957). Cellular Cofferdams and Docks. Journal of Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, 83(WW3), 1366, 13-45.
- Jang, J.W. (1998). The Mechanical Behavior of Steel Circular Caisson by Horizontal Load. Journal of the Korean Society of Coastal & Ocean Engineers, 10(3), 141-150 (in Korean).
- Jang, J.W. (1997). Deformation Characteristic of Steel Plate Cellular Bulkhead. Journal of the Korean Society of Coastal & Ocean Engineers, 9(4), 165-175 (in Korean).
- Jang, J.W. (1997). Model Test on Steel Cellular Bulkhead. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.17, No.3-3, 261-267 (in Korean).
- Jang, J.W. (1996). A Study on Shear Behavior of Fill in Cellular Bulkhead by Two-Dimensional Model Test with Aluminium Rods. Journal of the Korean Geotechnical Society, 12(5), 55-62 (in Korean).
- Kim, H.G. (2011). An Analytical Study on Behavioral Characteristics of Cellular Bulkhead according to Aspect Ratio(B/H). Master's Thesis, Changwon University (in Korean).
- Lee, J.S. (2012). Model Tests and Analyses of the Cellular Bulkhead on Ratio of Diameter and Height. Master's Thesis, Changwon University (in Korean).
- Terzaghi, K. (1945). Discussion on Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams. Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 110, 1083
- White and Prentis. (1950). Cofferdams, Columbia University Press.
- White, A., Cheney, J. and Duke, C.M. (1963). Field Study of a Cellular Bulkhead. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 128, 463-508.

Received 22 July, 2015

Revised 8 August, 2015

Accepted 10 August, 2015