

원형교각주위의 흐름특성

Flow Characteristics around Circular Bridge Pier

윤태훈¹⁾, ○차준호²⁾

1. 서론

하상에 연직으로 위치해 있는 원형교각주위의 흐름에 대한 연구는 하천 수리학에 있어서 고전적인 문제로 제기되어 왔다. 이에 관하여 최근에 수행되는 연구의 목적은 수치모형 및 실험에 의해서 원형교각주위의 흐름영역에 대한 더 나은 이해를 얻는데 있으며 이러한 흐름에 대한 모의는 원형교각주위의 국부세굴의 해석에 대한 선행연구로서 중요한 역할을 하고 있다.

원형교각표면에서 박리되어 나온 흐름은 자유전단층을 이루다가 외부흐름에 의해 안쪽으로 말리면서 교각의 후면에서 와형성영역을 만들게 된다. 와형성영역은 박리현상과 후류를 서로 이어주는 역할을 하게 되며 와형성영역의 길이가 증가하면 후면 압력이 증가하고 Reynolds수의 증가에 따라 와형성영역의 길이는 감소하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 원형교각주위의 흐름특성을 알아보기 위해서 경계처리가 용이한 유한요소법을 사용하는 수심평균된 2차원 모형인 BOSS SMS(Surfacewater Modeling System)가 사용되었으며 먼저 Reynolds수에 따른 원형교각주위의 흐름을 해석하고 이러한 흐름해석을 바탕으로 교각상류에 설치된 구조물이 교각주위의 흐름에 미치는 영향에 대해 검토되었다. 이러한 교각상류 구조물의 예로서 희생말뚝 또는 희생교각(sacrificial pile 또는 pier)을 들 수 있는데 지금까지의 대개의 기존 연구들이 하상의 보호공 개념인데 반하여 이는 흐름을 변화시키는 방안으로 희생말뚝에 의하여 발생하는 후류, 그리고 빠른 접근 유속에 대한 흐름의 변형을 도모하여 교각을 국부세굴로부터 보호하는 방법이다.

이번 연구는 이러한 교각주위의 흐름특성을 알아보고 흐름의 변화를 모의하여 교각상류구조물에 의해 교각을 국부세굴로부터 보호하는데 있어서 선행연구가 되고자 한다.

2. 모형의 검증과 원형교각주위의 흐름특성

Yulistiyanto et al.(1998)은 천수 방정식을 이용하여 원주주변의 흐름을 모의하였다. 상류 경계와 하류경계에서 정상 상태의 경계조건을 사용함으로써 정상상태에 대한 수렴값을 얻었다. 또한 수로 벽면에서의 경계 처리에 있어서는 모형과 동일한 perfect slip 조건을 이용하였다. 이들의 계산영역에서의 각 변수들의 정의는 그림 1과 같으며 본 모형에서는 그림 1에서의 박리점(separation point)의 각도를 θ , turbulent wake의 길이를 L_w 로 나타내었다. 표1은 Yulistiyanto et al.의 수로매개변수이다. 결과로서 Yulistiyanto et al.는 $Re_p(=VD/\nu)=1.48 \times 10^5$, $Fr=0.497$ 에 대해서 박리점(separation point)위치는 $\theta \approx 100^\circ$, L_w (length of turbulent wake)는 1.3D를, $Re_p=7.04 \times 10^5$, $Fr=0.264$ 에 대해서 $\theta \approx 125^\circ$, L_w 는 0.70D를 얻었다. 이는 Dairy와 Harleman(1966)이 언급한 값과 잘 일치됨을 보이고 있다. 표 2는 표 1의 Test 1에 대해 수로매개변수에 대한 이들의 계산결과와 본 모형에서의 계산결과이며 원형교각후면에 흐름방향의 속도변동이 최대가 되는 지점까지를 L_w 로 결정하였다.

1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
2) 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

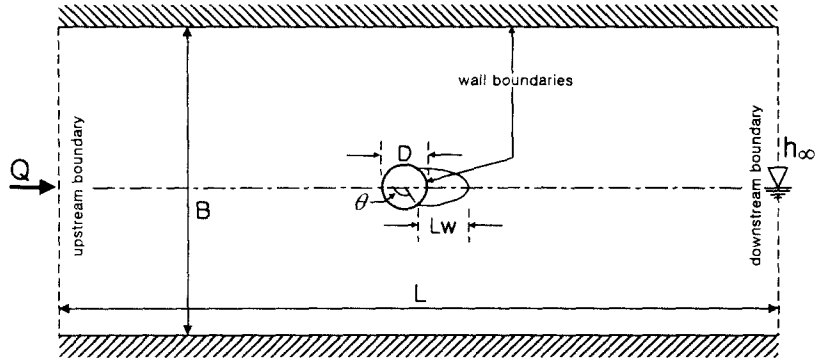


그림 1. Computational Domain of Numerical Simulation

표 1. Uniform Flow Variables and Channel Parameters

Test	Cylinder		Channel : uniform Flow						
	D (m)	Re _D × 10 ⁵	B/L (m/m)	Q (m ³ /s)	S ₀ × 10 ⁻⁴	n (m ^{1/3} /s)	U _∞ (m/s)	V _∞ (m/s)	h _∞ (m)
1	0.22	1.48	2.0/4.0	0.248	6.25	0.012	0.67	0.000	0.185
2	0.22	0.95	2.0/4.0	0.149	2.80	0.012	0.43	0.00	0.173
3	0.22	7.04	4.0/8.0	3.978	4.11	0.025	0.88	0.00	0.13

표 2. Comparison between Yulistiyanto et al. and SMS

Test	Yulistiyanto et al.		SMS	
	θ (°) (angle of separation point)	L _w (length of turbulent wake)	θ (°)	L _w
1	100	1.3D	99.7~118.5	0.88D~1.14D

표1의 수로매개변수에 의한 표 2의 결과산출에 있어서 경계조건과 함께 동수역학 모형을 정의하는데 있어 SMS모형은 일련의 재료특성이 필요하다. 유한요소망을 구성하는 개개 요소는 고유번호를 갖게되며 4개의 E(turbulent exchange coefficient)와 1개의 Manning의 n을 갖게 되는데 E는 다음과 같이 설명되어진다. E는 와점성계수(eddy viscosity coefficient)라고도 불리며 대부분의 경우 4개의 E는 같은 값을 갖는다.

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = x\text{방향의 법선난류교환계수,} & \epsilon_{xy} = x\text{방향의 접선난류교환계수} \\ \epsilon_{yy} = y\text{방향의 법선난류교환계수,} & \epsilon_{yx} = y\text{방향의 접선난류교환계수} \end{cases}$$

일반적으로 계수값들은 안정성문제를 야기하지 않는 범위에서 가능한 한 작게 유지되어야 하며 큰 E값은 안정된 해를 얻을 수 있으나 흐름분포, 흐름의 이탈 그리고 와류 등의 현상을 적절히 모의 할 수 없다. 반대로 너무 작은 E값은 해를 불안정하게 하여 연속성에 문제를 일으키게 된다. 따라서 적절한 E값을 부여하는 것은 중요한 요소 중의 하나이다. 와점성은 단지 물리현상에만 근거하는 것이 아니며 이는 안정성을 위해 필수적으로 필요한 수치점성을 포함하며, 요소의 간격, 예상유속 등이 모두 초기 E값 선정에 반영되어야 한다. 난류교환계수의 결정방법에는 Peclet수를 정해 줌으로서 유속과 격점의 간격에 따라 E값을 결정해주는

방법과 사용자가 직접 정해주는 방법이 있으나 본 모형에서는 계산영역에서의 요소의 크기 및 유속의 변화가 심하므로 Peclet수를 이용할 경우 수치점성이 커지게 되고 교각주위에서의 흐름변화에 대해 정확하게 표현할 수 없을 것으로 판단되어 직접 결정하는 방법을 사용하였으며 일반적으로 구조물 주위의 흐름이탈에 대한 대표적인 E값은 50~240(Pa-sec)로 알려져 있다. 그러나 Yulistiyanto et al. 의 비교에 있어서 실험수로의 계산영역이 작아 요소의 구성시에 한 요소의 크기가 일반적인 SMS의 최소적용한계보다 작기 때문에 E값은 Test 1의 경우 0.8~0.9(Pa-sec)에서 원형교각주위의 흐름이탈을 모의할 수 있었다. 따라서 교각주위의 상류구조물에 대한 모의를 위한 입력매개변수의 결정을 위해 상사를 이용한 수로매개변수의 수정이 필요하다. 수로매개변수의 수정에 있어서 점성이 다른 유체를 사용하지 않는 한 Froude상사와 Reynolds상사를 동시에 만족할 수 없으므로 계산영역에는 기하학적 상사를, 개수로 흐름에는 Froude상사를 적용하였다. 모형의 크기는 일반적인 교각의 크기에 가까운 20배가 검증용 위해서 선택되어졌다. 표 3은 표 1의 Test1의 값들을 상사를 이용하여 다시 정리한 것이며 일반적으로 L_w 는 Reynolds수의 함수로 알려져 있으나 검증에 있어서 상사에 의한 수로매개변수값이 모형의 적용에 적합하지 않으므로 Reynolds수에 따른 θ 와 L_w 는 상사의 적용이 아닌 Re_D 의 변화에 따라 검토되었다. 표 1에서는 Manning의 조도계수(n)차원을 $[L^{1/3}T]$ 로 나타내고 있으나 n이 $[T]$ 차원을 갖는 것은 불합리하므로 n의 차원 $[L^{1/6}]$ (Chow, 1959)과 비교하였다. Froude상사시에는 같은 값을 갖게 되나 Reynolds상사시에는 다른 값을 갖게 됨을 표 3을 통해 알 수 있다.

표 3 Hydraulic Similitude for Test 1

Similitude	Scale	Cylinder		Channel : uniform Flow								
		D (m)	$Re_D \times 10^5$	Fr	B/L (m/m)	Q (m ³ /s)	$S_0 \times 10^{-4}$	n (m ^{-1/3} /s)	n (m ^{1/6})	U_∞ (m/s)	V_∞ (m/s)	h_∞ (m)
Prototype	1:1	0.22	1.48	0.497	2.0/4.0	0.248	6.25	0.012		0.67	0.0	0.185
Fr	1:10	2.2	35.58	0.497	20/40	78.424	6.25	0.0176	0.0176	2.119	0.0	1.85
	1:20	4.4	100.64	0.497	40/80	443.636	6.25	0.0198	0.0198	2.996	0.0	3.7
	1:30	6.6	184.89	0.497	60/120	1222.517	6.25	0.0212	0.0212	3.670	0.0	5.55
Re	1:10	2.2	1.48	0.021	20/40	3.249	6.25	0.4252	0.0176	0.088	0.0	1.85
	1:20	4.4	1.48	0.007	40/80	6.498	6.25	1.3499	0.0198	0.044	0.0	3.7
	1:30	6.6	1.48	0.004	60/120	9.746	6.25	2.6533	0.0212	0.029	0.0	5.55

물체주위의 흐름이탈에 대하여 θ 에 따라 특정한 L_w 를 갖는다는 것은 일반적인 사실이며 계산결과 $Re(=Vh_\infty/\nu)=8.0 \times 10^6 \sim 10.1 \times 10^6$, $Re_D=9.5 \times 10^6 \sim 11.0 \times 10^6$ 에 대해서 L_w 가 0.63D에서 θ 는 132°로 일정함을 알 수 있었다. 그림 2는 상사를 통한 모형의 검증에 의해 선정된 θ 와 L_w , 유속벡터, 등유속선도를 나타낸다. Yulistiyanto et al.의 결과에 대해 Reynolds수가 증가할수록 θ 는 커지며 L_w 는 감소하고 있다. 같은 수로매개변수를 갖는 흐름에 대해서 Re_D 에 따른 θ 와 L_w 의 변화는 그림 3과 같으며 작은 Re_D 에서는 상대적으로 작은 요소간격을 필요로 하므로 작은 E값을 갖게 되어 L_w 의 변동폭이 크지만 높은 Re_D 로 갈수록 변동폭이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 상사와 같은 조건의 Reynolds수에서 Froude수만의 변화를 주었을 경우에 같은 θ 와 L_w 를 얻기 위한 E값을 나타낸다. 이 경우 일정한 Reynolds수에 대해서 Froude수와 E값은 선형비례하며 다음과 같은 식을 만족한다.

$$E = 2914.29 \times Fr - 1341.72 \quad (0.48 < Fr < 0.53)$$

계산결과 위 식은 $Re(=Vh_\infty/\nu)=8.0 \times 10^6 \sim 10.1 \times 10^6$, $Re_D=9.5 \times 10^6 \sim 11.0 \times 10^6$ 에 대해서 만족하며 표 4는 Re, Re_D , 그리고 Fr에 따른 원형교각주위의 흐름이탈에 관한 E값의 범위, L_w , θ 를 나타낸다.

표 4. Range of E, θ , and L_w for Test 1

Test 1	Fr	Re $\times 10^5$	Re _D $\times 10^5$	Q (m ³ /s)	h _w (m)	range of E (Pa-sec)	range of θ (°)	range of L _w (m)
Froude Similitude	0.497	84.6	100.6	443.636	3.7	40-110	118.5-132	0.63-1.14D
h - constant	0.47	80.0	95.1	419.006	3.7	40	118.5-132	0.41D
	0.48	82.7	97.1	427.921	3.7	40-60	118.5-132	0.63-0.88D
	0.49	83.4	99.1	436.836	3.7	40-90	118.5-132	0.52-1.01D
	0.50	85.1	100.1	445.751	3.7	40-120	118.5-132	0.52-1.43D
	0.51	86.8	103.2	454.666	3.7	50-160	118.5-132	0.41-1.01D
	0.52	88.5	105.2	463.582	3.7	90-190	118.5-132	0.52-1.29D
	0.53	90.2	107.2	472.497	3.7	100-240	118.5-132	0.63-1.43D
Q constant	0.47	84.6	96.9	443.636	3.84	40	118.5-132	0.41D
	0.48	84.6	98.3	443.636	3.79	40-60	118.5-132	0.63-0.88D
	0.49	84.6	99.6	443.636	3.74	40-90	118.5-132	0.63-1.01D
	0.50	84.6	101.0	443.636	3.69	40-120	118.5-132	0.52-1.43D
	0.51	84.6	102.3	443.636	3.64	50-160	118.5-132	0.41-1.58D
	0.52	84.6	103.7	443.636	3.59	80-190	118.5-132	0.52-1.43D
	0.53	84.6	105.0	443.636	3.55	80-230	118.5-132	0.41-2.06D

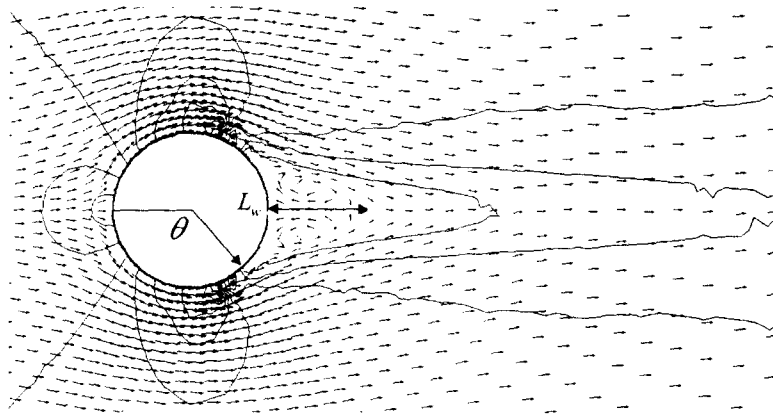


그림 2. Numerical Simulation for Froude Similitude ($\theta=132^\circ$, $L_w=0.63D$, $E=110$ Pa-sec)

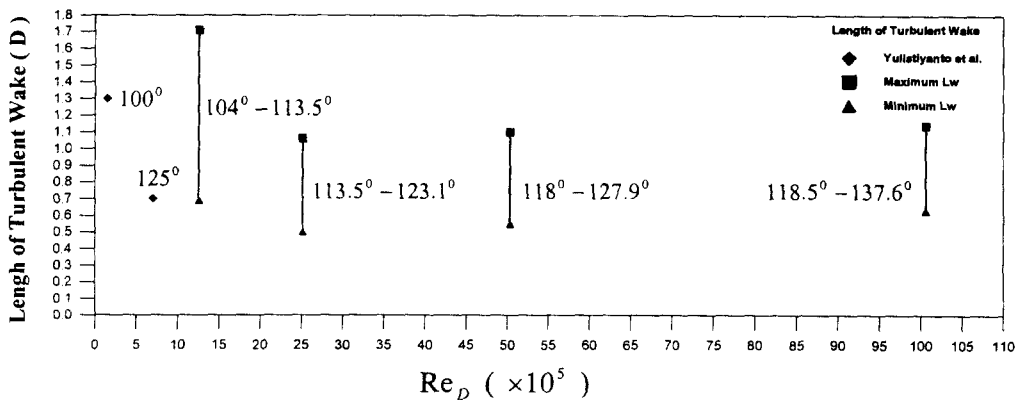


그림 3. Variation L_w, θ due to Re_p

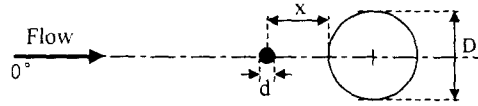
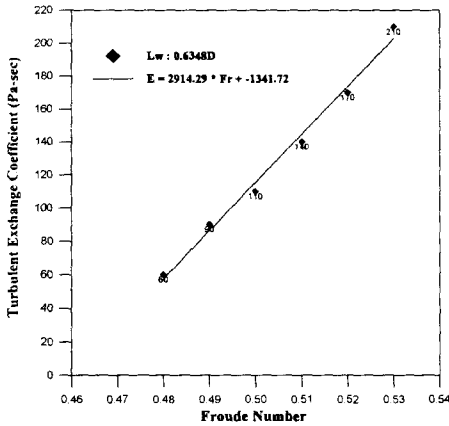


그림 4. Curve Fitting of $L_w=0.6348D$ 그림 5. Sacrificial Pile at Upstream of Circular Bridge Pier

3. 교각상류구조물에 의한 원형교각주위의 흐름변화에 대한 모의

최근의 연구에 있어 Melville과 Hadfield(1999)는 본 연구에 있어 유용한 기초자료를 제공하고 있다. 그들의 결과에서 흐름이 편기되어 있는 경우 세굴감소효과가 크지 못하므로 흐름방향에 대하여 설치되어 있는 경우에 국한하여 검증된 흐름에 대해서 말뚝을 교각전면에 대해 이동하면서 흐름변화에 대한 모의가 이루어졌다(그림 5). 그림 6은 교각전면에 대해서 설치된 희생말뚝의 이동에 따른 교각 전면부의 수위의 변동을 나타내고 있으며 이 경우 Full-depth 말뚝에 대하여 d 는 $0.125D$ 가 사용되었다. 희생말뚝에 의한 교각전면부의 수위변화는 희생말뚝이 교각 $2.5D$ 이상이 되면서 수위변화폭이 감소하며 교각 전면부에서의 수위상승이 희생말뚝의 후류에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다.

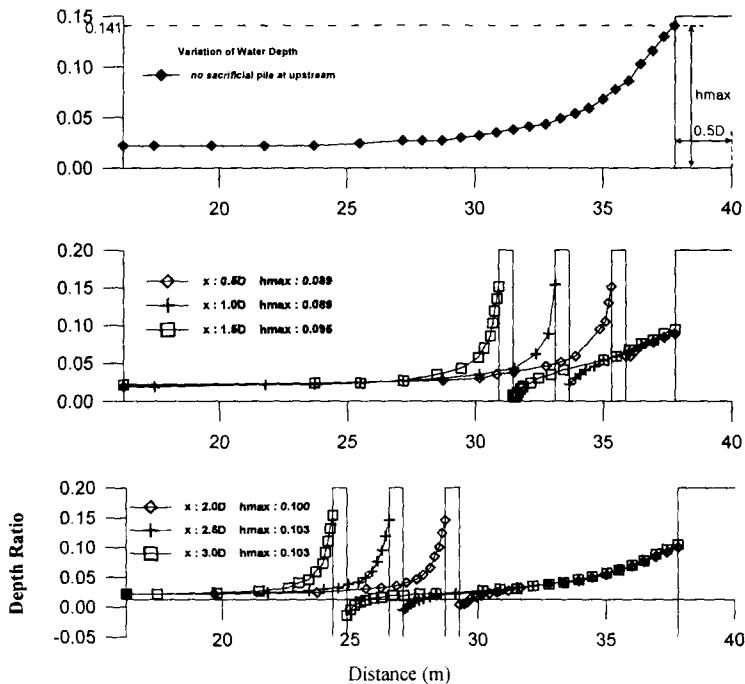


그림 6. Variation of Water Depth ($\text{Depth Ratio} = (h - h_\infty) / h_\infty$, $h_\infty = 3.7\text{m}$, $D = 4.4\text{m}$, $d = 0.125D$)

희생말뚝을 상류로 이동시킴에 따라서 교각측면부에서의 유속비는 점차 작아지며 일정거리 이상이 되면 유속비가 회복되기 시작하였다. 그러나 교각전면부에 있어서는 희생말뚝을 교각상류방향에 대하여 위치시킴에 따라 지속적인 유속비의 회복이 일어났다. 그림 7에서는 희생말뚝이 없는 경우의 유속크기 V_i 에 대한 비로 희생말뚝의 위치에 따른 교각측면부의 유속크기의 변화를 나타내었다.

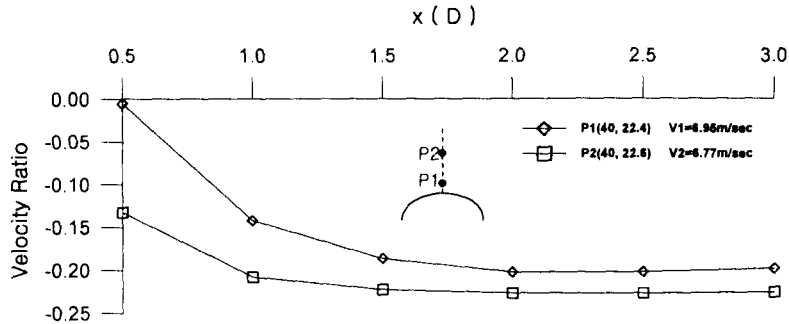


그림 7. Variation of Velocity Magnitude (Velocity Ratio= $(V-V_i)/V_i$)

그림 7에서와 같이 희생말뚝이 원형교각상류 2.0D-2.5D에 위치하게 되면 유속비는 일정한 값을 유지하며 2.5D이상이 되면 유속비는 회복되기 시작하였다. 이러한 현상은 원형교각주위의 흐름에 대한 상류구조물 즉 희생말뚝의 후류영향이 감소함으로써 발생한다. 후류영향의 감소로 인하여 유속비는 회복되며 원형교각주위의 흐름변화를 모의하여 상류구조물의 기하학적인 위치를 선정하는데 있어 후류영역의 선정은 중요한 요소이다.

4. 결론

이번 연구에서 원형교각주위의 흐름특성을 알아보았다. 원형교각주위의 흐름에 있어서 수로매개변수에 의한 Re , Re_D , 그리고 Fr 의 변화는 L_w , θ 에 영향을 미치며 원형교각주위의 흐름변화를 모의함에 있어서는 교각전면부의 수심비와 측면부의 유속비를 이용하여 상류구조물의 영향이 검토되었다.

참고 문헌

- Chow, Ven Te (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw. Hill, Inc.
- Dairy, J. W. and Harleman, D. R. F. (1966). *Fluid Dynamics*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc.
- US Army Corps of Engineers-Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory (1995). *User's Guide to RMA2 Version. 4.3*.
- BOSS International and Brigham Young University (1996). *User's Guide BOSS SMS*.
- Graf, W. H. and Yulistiyanto, B. (1998). "Experiments on flow around a cylinder ; the velocity and vorticity fields," *J. Hydr. Res.*, Vol. 36, No. 4, pp. 637-653.
- Melville, B. W. and Hadfield, A. C. (1999). "Use of Sacrificial Piles as Pier Scour Countermeasures," *J. Hydr. Engrg.*, pp. 1221-1224.
- Yulistiyanto, B., Zech, Y., and Graf, W. H. (1998). "Flow around a Cylinder : Shallow-Water Modeling with Diffusion-Dispersion," *J. Hydr. Engrg.*, Vol. 124, No. 4, pp. 419-429.
- Zdravkovich, M. M. (1997). *Flow around Circular Cylinders*, Oxford University Press Inc.