

# 鋼筋混凝土單孔方形箱涵之設計比較(續)

## Comparison on the Working Stress Design and Ultimate Strength Design of Reinforced Concrete Square Box Culverts (II)

經濟部水資會編譯兼淡江文理學院水利系副教授

林 伯 信

### 11. 設計圖

設計圖詳見圖 5, A 與 B 類鋼筋兩端採用標準彎鉤 (Standard hook) (ACI 318-63, 801 a.b), 最小彎曲半徑以鋼筋直徑之 2½ 倍轉彎, 並至少需

延長鋼筋直徑之 4 倍長或 2.5 吋, C 類鋼筋採用直條鋼筋, 兩端各延長 6 吋。

### 12. 工程數量

詳見結論中之工程數量比較表, 表 16。

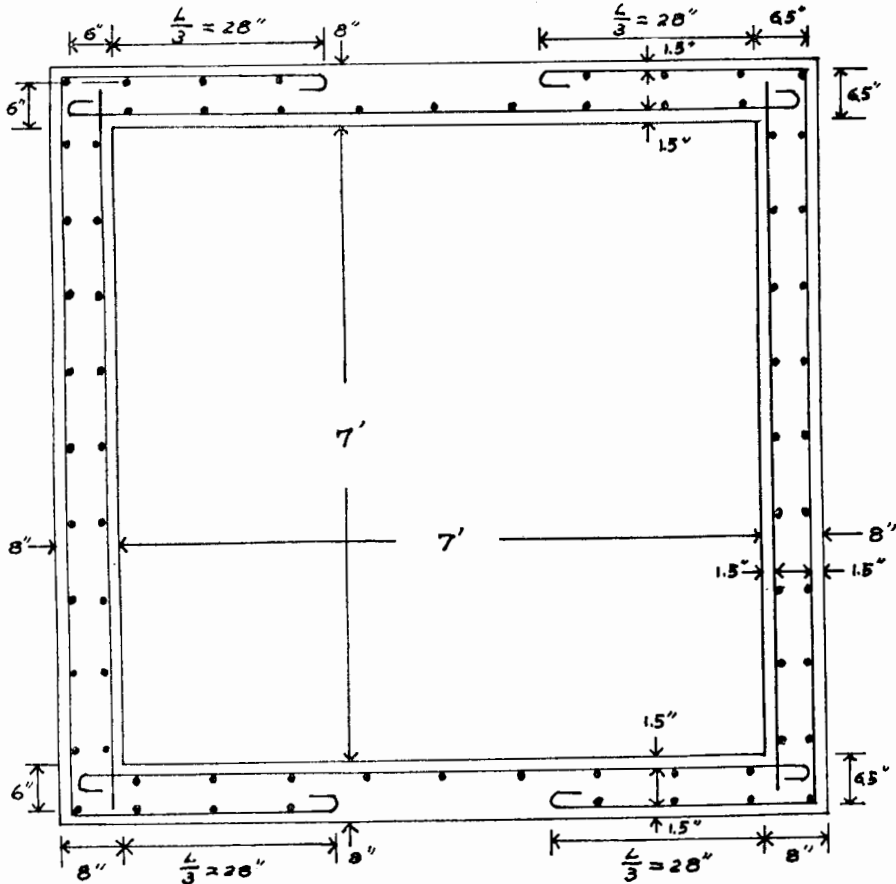


圖 5. 設計圖

### (二) 極限強度法 (ACI 318-63)

1. 設計條件, 2. 斷面決定, 3. 載重計算均同(一)工作應力法, 惟極限強度法之設計極限荷重, 尚需考慮超重因素與折減因素, 由式(10)得知靜重之超重因素為 1.5, 活重之超重因素為 1.8, 各種荷重類別之極限荷重及極限荷重力學計算如表 8; 4. 斷面彎矩計算如表 9; 5. 軸力計算如表 10; 6. 設計彎矩計算如表 11。

### 7. 鋼筋決定

斷面核對試以前表之最大設計極限彎矩 13,761 呎磅為例, 折減因素  $\phi$  為 0.90,

$$\therefore p = 0.75p_b = 0.0278, m = \frac{f_y}{0.85f_c'} = \frac{40,000}{0.85 \times 3,000} = 15.69, \phi = 0.90,$$

$$R_u = pf_y \left(1 - \frac{1}{2} pm\right) = 0.0278 \times 40,000 \left(1 - \frac{1}{2} \times 0.0278 \times 15.69\right) = 870 \text{ psi}$$

$$\therefore d = \sqrt{\frac{M_u}{\phi b R_u}} = \sqrt{\frac{13,761 \times 12}{0.90 \times 12 \times 870}} \times 4.20 \text{ in}$$

$$t = 4.20 + 1.5 \text{ (最小護層包括鋼筋半徑)}$$

$$= 5.70 \text{ in} < 8 \text{ in} \quad \therefore \text{O. K.}$$

故 涵面版牆厚度仍採用  $t = 8 \text{ in}$ ,  $d = 8 - 1.5 = 6.5 \text{ in}$ , 所需鋼筋面積:

$$\therefore R_u = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{13,671 \times 12}{0.9 \times 12 \times 6.5^2} = 361.89 \text{ psi}$$

$$m = \frac{f_y}{0.85f_c'} = 15.69$$

表8. 極限荷重及極限荷重力素計算 (極限強度法ACI 318-63)

荷重類別	覆蓋土厚度	荷重		極限荷重	極限荷重力素	
垂直集中載重		P		$P_u = 18$	$P_u L$	
	0	3,498		6,296	48,290	
	1	2,474		4,453	34,155	
	2	1,142		2,056	15,770	
	3	697		1,255	9,626	
	4	476		857	6,573	
	5	381		686	5,262	
	6	317		571	4,380	
	7	272		490	3,758	
	8	238		428	3,283	
9	212		382	2,930		
垂直均佈載重		$W_D$	$W_L$	$w_u = 1.5w_D + 1.8w_L$	$w_u L$	$w_u L^2$
	0	130	429	967	7,417	56,888
	1	200	429	1,072	8,222	63,065
	2	300	429	1,222	9,373	71,890
	3	400	429	1,372	10,523	80,713
	4	500	429	1,522	11,674	89,538
	5	600	429	1,672	12,824	98,362
	6	700	429	1,822	13,975	107,186
	7	800	429	1,972	15,125	116,011
	8	900	429	2,122	16,276	124,835
9	1000	429	2,272	17,426	133,659	
涵牆自重		W		$W_u = 1.5W$	$W_u L$	
	0~9	767		1,151	8,828	
兩側均佈側壓力		p		$p_u$	$p_u H$	$p_u H^2$
	0~9	土	219.90	$1.5p = 330$	2,531	19,414
	0~9	水	-428.75	$1.8p = -643$	-4,932	-37,327
兩側均佈側壓力		$p_c$	$p_s$	$p_u = 1.5p_c + 1.8p_s$	$p_u H$	$p_u H^2$
	0	0	86.01	155	1,189	9,119
	1	23.67	86.01	198	1,519	11,648
	2	57.34	86.01	241	1,849	14,178
	3	86.01	86.01	284	2,178	16,707
	4	114.68	86.01	327	2,508	19,237
	5	143.35	86.01	370	2,838	21,767
	6	172.02	86.01	413	3,168	24,296
	7	200.69	86.01	456	3,498	26,825
	8	229.36	86.01	499	3,827	29,356
9	258.03	86.01	542	4,157	31,885	

表9. 斷面彎矩計算(極限強度法 ACI 318-63)

荷重類別	K 值	覆蓋土 厚度	極限荷重 力 素	斷 面				
				1	A	2	B	3
垂直集中載重	1.0		$P_u L$	+ 0,0885	-0,0365	-0,0521	-0,0677	+ 0,1823
		0	48,250	+ 4,274	-1,763	-2,516	-3,269	+ 8,803
		1	34,155	+ 3,023	-1,247	-1,780	-2,312	+ 6,227
		2	15,770	+ 1,396	- 576	- 822	-1,068	+ 2,875
		3	9,626	+ 852	- 351	- 502	- 652	+ 1,755
		4	6,573	+ 582	- 240	- 343	- 445	+ 1,198
		5	5,262	+ 466	- 192	- 274	- 356	+ 959
		6	4,380	+ 388	- 160	- 228	- 297	+ 799
		7	3,758	+ 333	- 137	- 196	- 254	+ 685
		8	3,283	+ 291	- 120	- 171	- 222	+ 599
		9	2,930	+ 259	- 107	- 153	- 198	+ 534
垂直均佈載重	1.0		$w_u L^2$	+ 0,0833	-0,0417	-0,0417	-0,0417	+ 0,0833
		0	56,888	+ 4,739	-2,372	-2,372	-2,372	+ 4,739
		1	63,065	+ 5,253	-2,630	-2,630	-2,630	+ 5,253
		2	71,890	+ 5,988	-2,998	-2,998	-2,998	+ 5,988
		3	80,713	+ 6,723	-3,366	-3,366	-3,366	+ 6,723
		4	89,538	+ 7,459	-3,734	-3,734	-3,734	+ 7,459
		5	98,362	+ 8,194	-4,102	-4,102	-4,102	+ 8,194
		6	107,186	+ 8,929	-4,470	-4,470	-4,470	+ 8,929
		7	116,011	+ 9,664	-4,838	-4,838	-4,838	+ 9,664
		8	124,835	+10,399	-5,206	-5,206	-5,206	+10,399
		9	133,659	+11,134	-5,574	-5,574	-5,574	+11,134
涵牆自重	1.0		$W_u L$	+ 0,1458	-0,1042	-0,0417	+0,0208	+ 0,0208
		0~9	8,828	+ 1,287	- 920	- 368	+ 184	+ 184
兩側均變側壓力	1.0		$p_u H^2$	- 0,0229	-0,0229	+0,0417	-0,0188	- 0,0188
		0~9	19,414	- 445	- 445	+ 810	- 365	- 365
		0~9	-37,827	+ 866	+ 866	-1,577	+ 711	+ 711
兩側均佈側壓力	1.0		$p_u H^2$	- 0,0417	-0,0417	+0,0833	-0,0417	- 0,0417
		0	9,119	- 380	- 380	+ 760	- 380	- 380
		1	11,648	- 486	- 486	+ 970	- 486	- 486
		2	14,178	- 591	- 591	+1,181	- 591	- 591
		3	16,707	- 697	- 697	+1,392	- 697	- 697
		4	19,237	- 802	- 802	+1,602	- 802	- 802
		5	21,767	- 903	- 908	+1,813	- 908	- 908
		6	24,296	- 1,013	-1,013	+2,024	-1,013	- 1,013
		7	26,826	- 1,119	-1,119	+2,235	-1,119	- 1,119
		8	29,356	- 1,224	-1,224	+2,445	-1,224	- 1,224
		9	31,885	- 1,330	-1,330	+2,656	-1,330	- 1,330

合 計	1.0	0	+10,341	-5,014	-5,263	-5,491	+13,692
		1	+ 9,498	-4,862	-4,575	-4,898	+11,524
		2	+ 8,501	-4,664	-3,774	-4,127	+ 8,802
		3	+ 8,586	-4,913	-3,611	-4,185	+ 8,311
		4	+ 8,947	-5,275	-3,610	-4,451	+ 8,358
		5	+ 9,460	-5,701	-3,698	-4,836	+ 8,775
		6	+10,012	-6,142	-3,809	-5,250	+ 9,245
		7	+10,586	-6,593	-3,934	-5,681	+ 9,760
		8	+11,174	-7,049	-4,067	-6,122	+10,304
		9	+11,771	-7,510	-4,206	-6,572	+10,868

表10. 軸力計算(極限強度法 ACI 318-63)

荷 重 類 別	K 值	覆蓋土厚度	極限荷重力素	斷 面		
				$N_1$	$N_2$	$N_3$
垂直集中載重	1.0		$P_u$	-0.0313	+0.5	+0.0313
		0	6,296	- 197	+3,148	+ 197
		1	4,453	- 139	+2,227	+ 139
		2	2,056	- 64	+1,028	+ 64
		3	1,255	- 39	+ 628	+ 39
		4	857	- 27	+ 429	+ 27
		5	686	- 22	+ 343	+ 22
		6	571	- 18	+ 286	+ 18
		7	490	- 15	+ 245	+ 15
		8	428	- 13	+ 214	+ 13
垂直均佈載重	1.0		$w_u L$	0	+0.5	0
		0	7,417	0	+3,710	0
		1	8,222	0	+4,111	0
		2	9,373	0	+4,687	0
		3	10,523	0	+5,262	0
		4	11,674	0	+5,837	0
		5	12,824	0	+6,412	0
		6	13,975	0	+6,988	0
		7	15,125	0	+7,563	0
		8	16,276	0	+8,138	0
涵 牆 自 重	1.0		$W_u$	+0.1250	+1.0	-0.1250
		0~9	1,151	+ 144	+1,151	- 144
兩側均變側壓力	1.0		$p_u H$	+0.3375	0	+0.1625
		0~9	2,531	+ 854	0	+ 411
		0~9	-4,932	-1,665	0	- 802

			$p_u H$	+0.5	0	+0.5
兩側均佈側壓力	1.0	0	1,189	+ 595	0	+ 595
		1	1,519	+ 760	0	+ 760
		2	1,849	+ 925	0	+ 925
		3	2,178	+1,089	0	+1,089
		4	2,508	+1,254	0	+1,254
		5	2,838	+1,419	0	+1,419
		6	3,168	+1,584	0	+1,584
		7	3,498	+1,749	0	+1,749
		8	3,827	+1,914	0	+1,914
		9	4,157	+2,079	0	+2,079
合 計	1.0	0		- 269	+8,009	+ 257
		1		- 46	+7,489	+ 364
		2		+ 194	+6,866	+ 454
		3		+ 383	+7,041	+ 593
		4		+ 560	+7,417	+ 746
		5		+ 730	+7,906	+ 906
		6		+ 899	+8,425	+1,067
		7		+1,067	+8,959	+1,229
		8		+1,234	+9,503	+1,392
		9		+1,400	+10,055	+1,556

表11. 設計彎矩計算(極限強度法 ACI 318-63)

覆蓋土 厚度	斷 面 1				斷 面 2				斷 面 3			
	M	N	$N \frac{4t-d}{8}$	$M_u$	M	N	$N \frac{4t-d}{8}$	$M_u$	M	N	$N \frac{8t-d}{8}$	$M_u$
0	10,341	269	73	10,414	5,263	8,009	2,162	7,425	13,692	257	69	13,761
1	9,498	46	12	9,510	4,575	7,489	2,022	6,597	11,524	364	98	11,622
2	8,501	194	52	8,553	3,774	6,856	1,854	5,628	8,802	454	123	8,925
3	8,586	383	103	8,689	3,611	7,041	1,901	5,512	8,311	593	160	8,471
4	8,947	560	151	9,098	3,610	7,417	2,003	5,613	8,385	746	201	8,586
5	9,460	730	197	9,657	3,698	7,906	2,135	5,833	8,775	906	245	9,020
6	10,012	899	243	10,255	3,809	8,425	2,275	6,084	9,245	1,067	288	9,533
7	10,586	1,067	288	10,874	3,934	8,959	2,419	6,353	9,760	1,229	332	10,092
8	11,174	1,234	333	11,507	4,067	9,503	2,566	6,633	10,304	1,392	376	10,680
9	11,771	1,400	378	12,149	4,206	10,055	2,715	6,921	10,868	1,556	420	11,288

$$p = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_u}{f_y}}\right) = \frac{1}{15.69} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 15.69 \cdot 361.89}{40,000}}\right) = 0.00980,$$

$$\therefore A_s = pbd = 0.00980 \times 12 \times 6.5 = 0.76 \text{ sq.in.}$$

橫向鋼筋所需之百分數由式(4)為：

$$\text{百分數} = \frac{100}{\sqrt{S}} = \frac{100}{\sqrt{7.67}} = 36.11\%$$

所需溫度鋼筋面積為

$$A_s' = 0.0025bt = 0.24 \text{ sq.in.}$$

D 類鋼筋之最少量均採用此值，茲計算各斷面所需鋼筋面積及各類鋼筋安排如表 7。

### 8. 應變核對 (ACI 318-63, 1503, 1601)

以最大設計極限彎矩 13,761 呎磅之斷面為例，

核對其應變計算如下：

$$\therefore \#6@6\frac{1}{2} \text{ in, } A_s = 0.81 \text{ sq.in, } b = 12 \text{ in, } d = 6.5 \text{ in,}$$

$$\therefore T = A_s f_y = 0.81 \times 40,000 = 32,400 \text{ lb.}$$

$$C = 0.85 f'_c b a = 0.35 \times 3,000 \times 12 a = 30,600 a$$

$$\therefore a = \frac{32,400}{30,600} = 1.06 \text{ in, } \frac{a}{2} = 0.53 \text{ in,}$$

$$d - \frac{a}{2} = 5.97 \text{ in.}$$

$$\text{即 } M_u' = T(d - \frac{a}{2}) = 32,400 \frac{5.97}{12} \\ = 16,119 \text{ ft-lb} > \text{設計 } M_u' = \frac{13,761}{0.9} \\ = 15,290 \text{ ft-lb}$$

$$\therefore x = \frac{a}{k_1} = \frac{1.06}{0.85} = 1.25 \text{ in, } d - x = 5.25 \text{ in}$$

$$\therefore \epsilon_s = 0.003 \frac{d-x}{x} = 0.003 \frac{5.25}{1.25} \\ = 0.0126 \text{ in} > \epsilon_y = 0.00138 \text{ in.} \quad \therefore \text{O.K.}$$

### 9. 剪力核對 (ACI 318-63, 1701a,c)

以最大設計極限軸力 10,055 磅為例，折減因素

為 0.85，核對其單位剪力計算如下：

$\therefore$  核算斷面之剪力為：

$$V_u' = \frac{10,055}{0.85} \times \frac{7.67 - 0.875}{2} = 9,130 \text{ lb,}$$

$$\text{Allow } V_{uc} = 3.5 \phi \sqrt{f'_c (1 + \frac{0.002N}{A_g})} \\ = 3.5 \times 0.85 \sqrt{3,000 (1 + \frac{0.002 \times 9,130}{12 \times 8})} \\ = 178 \text{ psi,}$$

$$\therefore v_u = \frac{V_u'}{bd} = \frac{9,130}{12 \times 6.5} = 117 \text{ psi} < \text{Allow } v_{uc} \\ = 178 \text{ psi} \quad \therefore \text{O.K.}$$

### 10. 粘結力核對 (ACI 318-63, 1801a,c)

以最大設計極限軸力 10,055 磅，即覆蓋土厚度呎者為例，折減因素  $\phi$  為 0.85，核對涵牆內側面單位粘結力計算如下：

$\therefore$  核算斷面之剪力為：

$$V_u' = \frac{10,055}{0.85} \times \frac{7.67 - 0.333}{2} = 10,802 \text{ lb,}$$

$$\text{A 類鋼筋爲 } \#6@7\frac{1}{2} \text{ in, } A_s = 0.70 \text{ sq.in,}$$

$$\Sigma_0 = 3.8 \text{ in, } jd = d - \frac{a}{2} = 6.04 \text{ in, (由應變核對計} \\ \text{算), Allow } u = \frac{9.5 \sqrt{f'_c}}{D} = 693 \text{ psi 或 } 800 \text{ psi,}$$

$$\therefore u = \frac{V_u'}{\Sigma_0 jd} = \frac{10,802}{3.8 \times 6.04} = 471 \text{ psi} < \text{Allow } u \\ = 693 \text{ psi} \quad \therefore \text{O.K.}$$

$$\text{B 類鋼筋爲 } \#5@9 \text{ in, } A_s = 0.41 \text{ sq.in, } \Sigma_0 =$$

$$2. \text{ in, } jd = d - \frac{a}{2} = 6.23 \text{ in (由應變核對計算),} \\ \text{Allow } u = \frac{6.7 \sqrt{f'_c}}{D} = 587 \text{ psi 或 } 560 \text{ psi,}$$

$$\therefore u = \frac{V_u'}{\Sigma_0 jd} = \frac{10,802}{2.6 \times 6.23} = 667 \text{ psi} < \text{Allow } u = \\ 560 \text{ psi}$$

茲再核算其錨定長度，對於 #5 鋼筋所需錨定長度

$$\therefore A_b = 0.31 \text{ sq.in, } \Sigma_0 = 1.963 \text{ in, } 0.8 \text{ Allow } u = \\ 0.8 \times 560 = 448 \text{ psi,}$$

$$\therefore L = \frac{f_y A_b}{0.8 u \Sigma_0} = \frac{40,000 \times 0.31}{448 \times 1.963} = 14.1 \text{ in} < 28 \text{ in}$$

原安排長度大於所需錨定長度，故屬安全。

$$\text{C 類鋼筋爲 } \#5@10 \text{ in, } A_s = 0.37 \text{ sq.in, } \Sigma_0 =$$

$$2.4 \text{ in, } jd = d - \frac{a}{2} = 6.26 \text{ in, (由應變核對計算),}$$

$$\text{Allow } u = \frac{9.5 \sqrt{f'_c}}{D} = 832 \text{ psi 或 } 800 \text{ psi,}$$

$$\therefore u = \frac{V_u'}{\Sigma_0 jd} = \frac{10,802}{2.4 \times 6.26} = 719 \text{ psi} < \text{Allow } u = \\ 800 \text{ psi} \quad \therefore \text{O.K.}$$

### 11. 設計圖

設計圖詳見圖 5，A 與 B 類鋼筋兩端採用標準彎鉤，C 類鋼筋採用直條鋼筋兩端各延長 6 吋。

### 12. 工程數量

詳見結論中之工程數量比較表 (表 16)。

### (三) 極限強度法 (ACI 318-71)

1. 設計條件，2. 斷面決定，3. 載重計算均同(一)工作應力法，其設計極限荷重對於超重因素業已修正如式(11)，即靜重，液壓力與液壓重之超重因素為 1.5；活重及側土壓力之超重因素為 1.7；各種荷重類別之極限荷重及極限荷重力素計算如表 12；4. 斷面彎矩計算如表 13；5. 軸力計算如表 14；6. 設計彎矩計算如表 15；

表 12. 極限荷重及極限荷重力素計算 (極限強度法 ACI 318-71)

荷重類別	覆蓋土厚度	荷重	極限荷重	極限荷重力素		
垂直集中載重		P	$P_u = 1.7P$	$P_u L$		
	0	3,498	5,947	45,614		
	1	2,474	4,206	32,260		
	2	1,142	1,941	14,888		
	3	697	1,185	9,089		
	4	476	809	6,205		
	5	381	648	4,970		
	6	317	539	4,134		
	7	272	462	3,544		
	8	228	405	3,106		
9	212	360	2,761			
垂直均佈載重		$W_D$	$W_L$	$W_u = 1.4W_D + 1.7W_L$	$W_u L$	$W_u L^2$
	0	130	429	911	6,987	53,593
	1	200	429	1,009	7,739	59,358
	2	300	429	1,149	8,813	67,594
	3	400	429	1,289	9,887	75,831
	4	500	429	1,429	10,960	84,067
	5	600	429	1,569	12,034	92,303
	6	700	429	1,709	13,108	100,538
	7	800	429	1,849	14,182	108,775
	8	900	429	1,989	15,256	117,011
9	1,000	429	2,129	16,329	125,247	
涵 牆 自 重	0~9	W	$W_u = 1.4W$	$W_u L$		
		767	1,074	8,238		
兩側均佈側壓力	0~9	P	$p_u$	$p_u H$	$p_u H^2$	
	0~9	土 219.90 水 -428.75	$1.7p = 374$ $1.4p = -600$	2,869 -4,602	22,002 -35,297	
兩側均佈側壓力		P	$p_u = 1.7p$	$p_u H$	$p_u H^2$	
	0	86.01	146	1,120	8,589	
	1	114.68	195	1,496	11,472	
	2	143.35	244	1,872	14,354	
	3	172.02	292	2,240	17,178	
	4	200.69	341	2,616	20,061	
	5	229.36	390	2,991	22,943	
	6	258.03	439	3,367	25,826	
	7	286.70	487	3,735	28,650	
	8	315.37	536	4,111	31,522	
9	344.04	585	4,487	34,415		

表13. 斷面彎矩計算(極限強度法 ACI 318-17)

荷重類別	K 值	覆蓋土 厚度	極限荷重 力素	斷面				
				1	A	2	B	3
垂直集中載重	1.0		$P_u L$	+0.0885	-0.0365	-0.0521	-0.0677	+0.1823
		0	45,615	+4,037	-1,665	-2,377	-3,088	+8,316
		1	32,260	+2,855	-1,178	-1,681	-2,184	+5,881
		2	14,868	+1,318	-543	-776	-1,008	-2,714
		3	9,089	+804	-332	-474	-615	+1,657
		4	6,205	+549	-227	-323	-420	+1,131
		5	4,970	+440	-181	-259	-337	+906
		6	4,134	+366	-151	-215	-280	+754
		7	3,544	+314	-129	-185	-240	+646
		8	3,106	+275	-113	-162	-210	+566
9	2,761	+244	-101	-144	-187	+503		
垂直均佈載重	1.0		$w_u L^2$	+0.0833	-0.0417	-0.0417	-0.0417	+0.0833
		0	53,593	+4,464	-2,235	-2,235	-2,235	+4,464
		1	59,358	+4,945	-2,475	-2,475	-2,475	+4,945
		2	67,594	+5,631	-2,819	-2,819	-2,819	+5,631
		3	75,831	+6,317	-3,162	-3,162	-3,162	+6,317
		4	84,067	+7,003	-3,506	-3,506	-3,506	+7,003
		5	92,303	+7,689	-3,849	-3,849	-3,849	+7,689
		6	100,538	+8,375	-4,192	-4,192	-4,192	+8,375
		7	108,775	+9,061	-4,536	-4,536	-4,536	+9,061
		8	117,011	+9,747	-4,879	-4,879	-4,879	+9,747
9	125,247	+10,433	-5,223	-5,223	-5,223	+10,433		
涵牆自重	1.0		$W_u L$	+0.1458	-0.1042	-0.0417	+0.0208	+0.0208
		0~9	8,238	+1,201	-858	-344	+171	+171
兩側均佈側壓力	1.0		$p_u H^2$	-0.0229	-0.0229	+0.0417	-0.0188	-0.0188
		0~9	22,002	-504	-504	+918	-414	-414
		0~9	-35,297	+808	+808	-1,471	+664	+664
兩側均佈側壓力	1.0		$p_u H^2$	-0.0417	-0.0417	+0.0833	-0.0417	-0.0417
		0	8,589	-358	-358	+716	-358	-358
		1	11,472	-478	-478	+956	-478	-478
		2	14,354	-599	-599	+1,196	-599	-599
		3	17,178	-716	-716	+1,431	-716	-716
		4	20,061	-837	-837	+1,671	-837	-837
		5	22,943	-957	-957	+1,911	-957	-957
		6	25,826	-1,077	-1,077	+2,151	-1,077	-1,077
		7	28,650	-1,195	-1,195	+2,387	-1,195	-1,195
		8	31,532	-1,315	-1,315	+2,627	-1,315	-1,315
9	34,415	-1,435	-1,435	+2,867	-1,435	-1,435		



		0	+9,648	-4,812	-4,794	-5,260	+12,843
		1	+8,827	-4,685	-4,098	-4,716	+10,769
		2	+7,855	-4,515	-3,297	-4,005	+8,167
		3	+7,910	-4,764	-3,103	-4,072	+7,679
合	計	4	+8,220	-5,124	-3,056	-4,341	+7,718
	1.0	5	+8,677	-5,541	-3,095	-4,722	+8,059
		6	+9,169	-5,974	-3,154	-5,128	+8,473
		7	+9,685	-6,414	-3,232	-5,550	+8,933
		8	+10,212	-6,861	-3,312	-5,983	+9,419
		9	+10,747	-7,313	-3,398	-6,424	+9,922

表 14 軸力計算(極限強度法 ACI 318-71)

荷重類別	K 值	覆蓋土厚度	極根荷重力素	斷 面		
				$N_1$	$N_2$	$N_3$
垂直集中載重	1.0		$P_u$	-0.0313	+0.5	+0.0313
		0	5,947	- 186	+2,974	+ 186
		1	4,206	- 132	+2,103	+ 132
		2	1,941	- 61	+ 971	+ 61
		3	1,185	- 37	+ 593	+ 37
		4	809	- 25	+ 405	+ 25
		5	648	- 20	+ 324	+ 20
		6	539	- 17	+ 270	+ 17
		7	462	- 15	+ 231	+ 15
		8	405	- 13	+ 203	+ 13
垂直均佈載重	1.0		$w_u L$	0	+0.5	0
		0	6,987	0	+3,494	0
		1	7,739	0	+3,870	0
		2	8,813	0	+4,407	0
		3	9,887	0	+4,944	0
		4	10,960	0	+5,480	0
		5	12,034	0	+6,017	0
		6	13,108	0	+6,554	0
		7	14,182	0	+7,091	0
		8	15,256	0	+7,628	0
涵牆自重	1.0		$W_u$	+0.1250	+1.0	-0.1250
		0~9	1,074	+ 134	+1,074	- 134
兩側均變側壓力	1.0		$p_u H$	+0.3375	0	+0.1625
		0~9	2,869	+ 968	0	+ 466
		0~9	-4,602	-1,553	0	- 748

		$p_u H$		+0.5	0	+0.5
兩側均佈側壓力	1.0	0	1,120	+ 560	0	+ 560
		1	1,496	+ 748	0	+ 748
		2	1,872	+ 936	0	+ 936
		3	2,240	+1,120	0	+1,120
		4	2,616	+1,308	0	+1,308
		5	2,991	+1,456	0	+1,496
		6	3,367	+1,684	0	+1,684
		7	3,735	+1,868	0	+1,868
		8	4,111	+2,056	0	+2,056
		9	4,487	+ 2,244	0	+2,244
合 計	1.0	0		- 77	+7,542	+ 598
		1		+ 165	+7,047	+ 732
		2		+ 424	+6,452	+ 849
		3		+ 632	+6,611	+1,009
		4		+ 832	+6,959	+1,185
		5		+1,025	+7,415	+1,368
		6		+1,216	+7,698	+1,553
		7		+1,402	+8,396	+1,735
		8		+1,592	+8,905	+1,921
		9		+1,782	+9,419	+2,107

表15. 設計彎矩計算(極限強度法 ACI 318-71)

覆蓋土 厚度	斷 面 1				斷 面 2				斷 面 3			
	M	N	$N \frac{4t-d}{8}$	$M_u$	M	N	$N \frac{4t-d}{8}$	$M_u$	M	N	$N \frac{4t-d}{8}$	$M_u$
0	9,648	77	21	9,725	4,794	7,542	2,036	6,830	12,843	598	162	13,005
1	8,827	165	45	8,872	4,098	7,047	1,903	6,001	20,769	732	198	10,967
2	7,855	424	115	7,970	3,297	6,452	1,742	5,039	8,167	849	229	8,396
3	7,910	632	171	8,081	3,103	6,611	1,785	4,888	7,679	1,009	272	7,951
4	8,220	832	225	8,445	3,056	6,959	1,879	4,935	7,718	1,185	320	8,038
5	8,677	1,025	277	8,954	3,093	7,415	2,002	5,097	8,059	1,368	369	8,428
6	9,169	1,216	328	9,497	3,154	7,898	2,133	5,287	8,473	1,553	419	8,892
7	9,685	1,402	279	9,964	3,232	8,376	2,267	5,499	8,923	1,735	469	9,402
8	10,212	1,592	430	10,642	3,312	8,905	2,404	5,716	9,419	1,921	519	9,938
9	10,747	1,782	481	11,228	3,398	9,419	2,543	5,941	9,522	2,107	569	10,491

### 7. 鋼筋決定

包括斷面核對，所需鋼筋面積計算，橫向鋼筋所需百分數，溫度鋼筋面積計算均同( )極限強度法 ( ACI 318-63 ) ; 茲計算各斷面所需鋼筋面積及各類鋼筋安排如表 7。

### 8. 應變核對 ( ACI 318-71, 10.2, 10.3 )

應變核對計算均同( )極限強度法 ( ACI 318-63 )

### 9 剪力核對 ( ACI 318-71, 11.4 )

以最大設計極限軸力 9,419 磅為例，折減因素  $\phi$

為 0.85，核對其單位剪力計算如下：

∴ 核算斷面之剪力為：

$$V_u = \frac{9.419}{0.85} \times \frac{7.67}{2} - 0.875 = 8.553 \text{ lb.}$$

$$\text{Allow } v_c = 3.5\sqrt{f_c'} \cdot \sqrt{1 + 0.002 \frac{N_u}{A_g}}$$

$$= 2\sqrt{3000} \sqrt{1 + 0.002 \frac{8.553}{12 \times 8}} = 208 \text{ psi.}$$

$$\therefore v_c = 2\sqrt{f_c'} (1 + 0.0005 \frac{N_u}{A_g})$$

$$= 2\sqrt{3000} (1 + 0.0005 \frac{8.553}{12 \times 8})$$

$$= 114 \text{ psi} < \text{Allow } v_c = 208 \text{ psi.}$$

∴ O. K.

10 握持長度核對 (ACI 318-71, 12.5a b)

關於粘結力核對，已有重大的修正而改以握持長度 (Development length) 來核算，對於 #11 或以下鋼筋之握持長度為  $l_d = \frac{0.04 A_b f_y}{\sqrt{f_c'}}$  或不得小於  $l_d = 0.004 d_b f_y$ ；茲核對各類鋼筋之握持長度如下：

A 類鋼筋為 #6,  $A_b = 0.44 \text{ sq.in.}$ ,  $d_b = 0.75 \text{ in.}$

$$\therefore l_d = \frac{0.04 \times 0.44 \times 40,000}{\sqrt{3,000}} = 13 \text{ in 或 Min } l_d =$$

$$0.0004 \times 0.75 \times 40,000 = 12 \text{ in}$$

因 A 類鋼筋兩端均用標準彎鉤 (8.89 吋) 並營展至涵牆內 6 吋，故握持長度應屬安全。

B 類鋼筋為 #5，屬於頂部鋼筋 (Top reinforcement)，其握持長度應加 1.4 倍， $A_b = 0.31 \text{ sq.in.}$   $d_b = 0.625 \text{ in.}$

$$\therefore l_d = \frac{1.4 \times 0.04 \times 0.31 \times 40,000}{\sqrt{3,000}} = 13 \text{ in 或}$$

$$\text{Min } l_d = 1.4 \times 0.0004 \times 0.625 \times 40,000 = 14 \text{ in.}$$

因頂部鋼筋兩端均用標準彎鉤 (7.41 吋) 並營展至有效跨徑之三分之一，即 28 吋，故握持長度應屬安全。

C 類鋼筋為 #5,  $A_b = 0.31 \text{ sq.in.}$ ,  $d_b = 0.625 \text{ in.}$

$$\therefore l_d = \frac{0.04 \times 0.31 \times 40,000}{\sqrt{3,000}} = 9 \text{ in. 或 Min } l_d =$$

$$0.0004 \times 0.625 \times 40,000 = 10 \text{ in.}$$

因 C 類鋼筋兩端需用標準彎鉤 (7.41 吋) 並營展至涵版內 6 吋，故握持長度應屬安全。

11. 設計圖

設計圖參考圖 5，各類主鋼筋兩端均採用標準彎

鉤 (ACI 318-71, 7.1)，A 與 C 類鋼筋並營展至涵牆或涵版內 6 吋。

12. 工程數量

詳見結論中之工程數量比較表 (表 16)。

## 六、討論與結論

(一) 本文中所述之結構分析，包括表 1 之彎矩圖，彎矩公式及軸力公式表，表 2 之彎矩係數表及表 3 之軸力係數表，不祇適用於方形箱涵，亦可適用於矩形箱涵。

(二) 對於鋼筋混凝土設計規範，ACI 318-63 規定極限強度設計法可與工作應力設計法者同行，但 ACI 318-71 已修正為全以極限強度設計法為基礎，而以工作應力設計法為替代方法 (Alternate design method)，爰以三種方式來設計比較。

(三) 箱涵流向與行車方向相同之箱涵，本文未再列述，其載重分析與本設計例略有差異，然其結構分析與演算方法可謂均同，其載重分析部份尚需補充規範規定等資料。

(四) 工作應力法與極限強度法之設計實例演算如前所示，其單位呎長之工程數量則如表 16。

(五) 在設計條件與混凝土斷面相同的情況下，由本文就此三種方式所作之結果顯示：

1. 同以 ACI 318-63 為基準者，極限強度設計法之鋼筋量祇需工作應力法設計者之 88.27% 至 93.72%。由於設計方法之不同，必將影響其工程數量與工程費，並可示意工作應力法設計者，其鋼筋量似乎尚容許減少 6.28% 至 11.73%。

2. 若就以極限強度法設計者相比較，則以 ACI 318-71 為基準者，其鋼筋量祇為 ACI 318-63 為基準者之 95.85% 至 99.27%。由於使用基準規範之不同，其工程數量與工程費用亦有差異，此係由於 ACI 318-63 之超重因素 (Overload factors) 為  $U = 1.5D + 1.8L$ ，而 ACI 318-71 業已修正為  $U = 1.4D + 1.7L$ ，且側土壓力部份為 1.7，液壓力或液壓重為 1.4；其他如粘結與錨定部份改用握持長度 (Development length) 為其重大的改變。

3. 若以工作應力法設計者與極限強度法以 ACI 318-71 為基準者相比較，則其鋼筋量祇需工作應力法設計者之 86.35% 至 91.14%。

(六) 就覆蓋土厚度而論，由本文就此三種方式各以十種覆蓋厚度所作之結果顯示：

1. 無覆蓋土者之鋼量為最大。

表 16. 工 程 數 量 比 較 表

(單位呎)

項 目		工作應力法 (ACI 318-63)					極限強度法 (ACI 318-63)					極限強度法 (ACI 318-71)				
混凝土數量		8'4"×8'4"-7'×7'=20.44 ft³					20.44 ft³					20.44 ft³				
覆蓋土 厚 度	鋼 筋 類 別	規格	間隔	長度	支數	數量	規格	間隔	長度	支數	數量	規格	間隔	長度	支數	數量
			in	ft	支	(b)		in	ft	支	(b)		in	ft	支	(b)
0	A	# 6	6	9.48	2.00	28.48	# 6	6 $\frac{1}{2}$	9.48	1.85	26.34	# 6	7	9.48	1.71	24.35
	B	# 5	11 $\frac{1}{2}$	15.07	1.04	16.35	# 5	13	15.07	0.92	14.46	# 5	13	15.07	0.92	14.46
	C	# 5	8	8	1.50	12.52	# 5	9	8	1.33	11.10	# 5	10	9.24	1.20	11.57
	D	# 4	8	1	.86	57.45	# 4	9	1	.78	52.10	# 4	9	1	.78	52.10
	合 計					114.80					104.00					102.48
	百分比					100					90.59					89.27
	百分比					110.39					100					98.54
1	A	# 6	7 $\frac{1}{2}$	9.48	1.60	22.78	# 6	8	9.48	1.50	21.36	# 6	8 $\frac{1}{2}$	9.48	1.41	20.08
	B	# 5	12	15.07	1.00	15.72	# 5	14	15.07	0.86	13.52	# 5	15	15.07	0.80	12.57
	C	# 5	9	8	1.33	11.10	# 5	10 $\frac{1}{2}$	8	1.14	9.51	# 5	11 $\frac{1}{2}$	9.24	1.04	10.02
	D	# 4	9 $\frac{1}{2}$	1	.74	49.43	# 4	10	1	.70	46.76	# 4	10	1	.70	46.76
	合 計					99.03					91.15					89.43
	百分比					100					92.04					90.31
	百分比					108.65					100					98.11
2	A	# 6	9 $\frac{1}{2}$	9.48	1.26	17.94	# 6	10	9.48	1.20	17.09	# 6	11 $\frac{1}{2}$	9.48	1.04	14.81
	B	# 5	12	15.07	1.00	15.73	# 5	15	15.07	0.80	12.57	# 5	15	15.07	0.80	12.57
	C	# 5	10	8	1.20	10.01	# 5	12	8	1.00	8.34	# 5	14	9.24	0.86	8.29
	D	# 4	10	1	.70	46.76	# 4	10	1	.70	46.76	# 4	10	1	.70	46.76
	合 計					90.44					84.76					82.43
	百分比					100					93.72					91.14
	百分比					106.70					100					97.25
3	A	# 6	9 $\frac{1}{2}$	9.48	1.26	17.94	# 6	11	9.48	1.09	15.52	# 6	12	9.48	1.00	14.24
	B	# 5	11 $\frac{1}{2}$	15.07	1.04	16.35	# 5	14	15.07	0.86	13.52	# 5	15	15.07	0.80	12.57
	C	# 5	10	8	1.20	10.01	# 5	13	8	0.92	7.68	# 5	14	9.24	0.86	8.29
	D	# 4	10	1	.70	46.76	# 4	10	1	.70	46.76	# 4	10	1	.70	46.76
	合 計					91.06					83.48					81.86
	百分比					100					91.68					89.90
	百分比					109.08					100					98.06
4	A	# 6	8 $\frac{1}{2}$	9.48	1.41	20.08	# 6	10 $\frac{1}{2}$	9.48	1.14	16.23	# 6	11 $\frac{1}{2}$	9.48	1.04	14.81
	B	# 5	11	15.07	1.09	17.13	# 5	13	15.07	0.92	14.46	# 5	14	15.07	0.86	13.52
	C	# 5	10	8	1.20	10.01	# 5	12	8	1.00	8.34	# 5	14	9.24	0.86	8.29
	D	# 4	10	1	.70	46.76	# 4	10	1	.70	46.76	# 4	10	1	.70	46.76
	合 計					93.98					85.79					83.38
	百分比					100					91.29					88.72
	百分比					109.55					100					97.19

5	A	# 6	8	9.48	1.50	21.36	# 6	10	9.48	1.20	17.09	# 6	11	9.48	1.09	15.52
	B	# 5	10	15.07	1.20	18.86	# 5	12	15.07	1.00	15.72	# 5	13	15.07	0.92	14.46
	C	# 5	9½	8	1.26	10.51	# 5	12	8	1.00	8.34	# 5	14	9.24	0.86	8.29
	D	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76
	合計					97.49					87.91					85.03
	百分比				100					90.17					87.22	
	百分比				110.90					100					96.72	
6	A	# 6	7½	9.48	1.60	22.78	# 6	9½	9.48	1.26	17.94	# 6	10	9.48	1.20	17.09
	B	# 5	9	15.07	1.33	20.91	# 5	11½	15.07	1.04	16.35	# 5	11½	15.07	1.04	16.35
	C	# 5	9	8	1.33	11.10	# 5	11½	8	1.04	8.68	# 5	13	9.24	0.92	8.87
	D	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76
	合計					101.55					89.73					89.07
	百分比				100					88.36					87.71	
	百分比				113.17					100					99.27	
7	A	# 6	7	9.48	1.71	24.35	# 6	9	9.48	1.33	18.94	# 6	9½	9.48	1.26	17.94
	B	# 5	8½	15.07	1.41	22.16	# 5	10½	15.07	1.14	17.92	# 5	11	15.07	1.09	17.13
	C	# 5	8½	8	1.41	11.77	# 5	11	8	1.09	9.10	# 5	13	9.24	0.92	8.87
	D	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76
	合計					105.04					92.72					90.70
	百分比				100					88.27					86.35	
	百分比				113.29					100					97.82	
8	A	# 6	6½	9.48	1.85	26.34	# 6	8	9.48	1.50	21.36	# 6	9	9.48	1.33	18.94
	B	# 5	8	15.07	1.50	23.58	# 5	9½	15.07	1.26	19.81	# 5	10	15.07	1.20	18.86
	C	# 5	8½	8	1.41	11.77	# 5	10½	8	1.14	9.51	# 5	12	9.24	1.00	9.64
	D	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76
	合計					108.45					97.44					94.20
	百分比				100					89.85					86.86	
	百分比				111.30					100					96.68	
9	A	# 6	6½	9.48	1.85	26.34	# 6	7½	9.48	1.60	22.78	# 6	8½	9.48	1.41	20.08
	B	# 5	7½	15.07	1.60	25.15	# 5	9	15.07	1.33	20.91	# 5	9½	15.07	1.26	19.81
	C	# 5	8	8	1.50	12.52	# 5	10	8	1.20	10.01	# 5	12	9.24	1.00	9.64
	D	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76	# 4	10	1	70	46.76
	合計					110.77					100.46					96.29
	百分比				100					90.69					86.93	
	百分比				110.26					100					95.85	

2 無覆蓋土者之所需鋼筋量，比有覆蓋土者為大。

3 覆蓋土厚度以 2 至 3 呎間者之鋼筋量為最少。

4 覆蓋土厚度 4 呎以上者，其鋼筋量將隨其覆蓋土厚度之增加而增加。

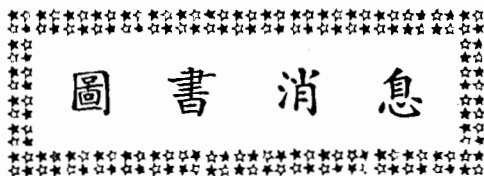
(七)對於各種鋼筋混凝土構造物之設計，安全與經濟為其必備之條件，然以極限強度法設計者，比工作應力法設計者為合理，因其鋼筋與混凝土之應力強度與應變 (Strain)，均可達到其塑性範圍 (Plastic range)，並可滿足構造物安全之條件，由本文之設

計成果比較，似可推論工作應力法設計者，確比極限強度法設計者為保守，避免浪費，推行極限強度法似有其必要性；再者，對於單孔方形箱涵之規劃與設計，當以覆蓋土厚度以 2 至 3 呎間者為最經濟而理想。本文疏漏錯誤難免，尚祈各界先進不吝指正。

### 參 考 資 料

(1) Design of Concrete Structure Eighth Edition (1973) p. 546-551 by G. Winter, A.H. Nilson. 淡江書局  
 (2) Concrete Culverts and Conduits p. 14-18.  
 (3) Reinforced Concrete Design (1965) p. 209-214, 118, 618-749, 80-82. by C.K. Wang and C.G. Salmon. 中央圖書出版社  
 (4) Rigid Frame Formulas. p. 413-422. by A. Kleinlogel.

(5) Reinforced Concrete Designer's Handbook Fourth Edition. p. 257. by Chas. E. Reynolds.  
 (6) ACI Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63). Reported by ACI Committee 318.  
 (7) ACI Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71). Reported by ACI Committee 318.  
 (8) Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71) Reported by ACI Committee 318.  
 (9) 擋土牆之安定分析及極限強度設計 臺灣水利, 21卷 2期, 62年 6月出版。  
 (10) 鋼筋混凝土版梁橋之設計比較 臺灣公路工程, 22卷 1期, 62年 11月出版。



### 圖 書 消 息

本會承各機關團體及會員陸續捐贈書刊，茲將贈書者大名刊登以表謝意。

捐 贈 者	書 名	出版日期	冊 數
行政院秘書處編印	經濟會議實錄	63. 3. 26	1
中國機械工程學會	機械工程 61	64. 3.	1
"	會刊第 281 期	64. 4.	1
中國農村復興聯合委員水利工程組	管路灌溉方法及技術	63. 10	1
中國工程師學會	海域油氣探採技術	64. 4. 22	1
金屬工業發展中心	金 工 第九卷 第二期		1
經濟部中央標準局	標 準 公 報 第二卷 第 4. 5.	64. 4. 5	2
"	商 標 公 報 第二卷	64. 4. 5	2
"	專 利 公 報 第二卷	64. 4. 5	2
中國測量工程學會	測 量 工 程 第十七卷 第 1 期	64. 3	1
中國工程師學會會刊	工 程 第四八卷 第 5 及 6 期	64. 4. 5; 6, 6	2
臺灣省農業試驗所	農 業 研 究 第二三卷 第 4 期	63. 12	1
Finnish Journal of Water Economy			
Hydraulic and Agricultural Engineering	VESITALOUS Vol. 15. No 6. 1974		1