

W tablicy 5-3 obliczono wartości siły n_0^* i momentu m_0^* w poszczególnych przekrojach powłoki walcowej, a wykresy tych sił podano na rys. 5-2b. Porównując rozkłady sił wewnętrznych w zbiornikach z przykładów 5-1 i 5-2 nie-trudno spostrzec istotne różnice, zwłaszcza w rozkładzie momentów zginających w pobliżu węzła A.

TABLICA 5-3

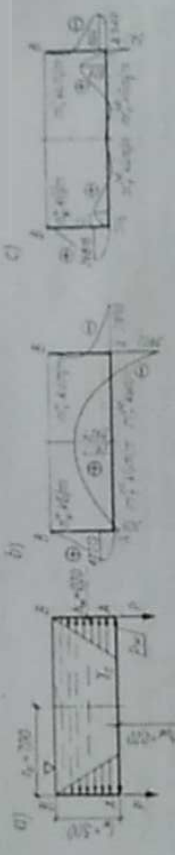
$n_0^* = 74\,500\,N_0^*/m$; $m_0^* = 5020\,M_0^*/m$

ξ	N_0^*	M_0^*	n_0^* kG/m	m_0^* kGm/m
0,00	0,00000	0,90000	0	4518
0,05	0,15601	0,18627	11623	945
0,10	0,42263	-0,13067	31466	-656
0,15	0,63390	-0,20837	47226	-1046
0,20	0,74577	-0,17375	55545	-872
0,25	0,77155	-0,10831	57480	-544
0,30	0,74297	-0,05139	55351	-258
0,40	0,62445	0,00309	46522	16
0,50	0,50390	0,00818	37541	41
0,60	0,39824	0,00283	29669	14
0,70	0,29877	0,00002	22258	0
0,75	0,24954	-0,00034	18576	-2
0,80	0,19974	-0,00037	14881	-2
0,85	0,14998	-0,00025	11174	-1
0,90	0,10008	-0,00013	7456	-1
0,95	0,05012	-0,00003	3734	0
1,00	0,00014	0	10	0

Przykład 5-3. Obliczyć siły wewnętrzne w zbiorniku żelbetowym typu 5 (rys. 5-3a) wypełnionym cieczą o ciężarze objętościowym $\gamma_c = 1000\,kG/m^3$.

Dane: $l_w = 5,0\,m$, $h_w = h_{pd} = 0,20\,m$, $r_0 = 7,0\,m$, $C = 5 \cdot 10^6\,kG/m^3$, $E = 29 \cdot 10^6\,kG/m^2$.
 Obciążenia wynoszą:
 $P_w = \gamma_c l_w = 1000 \cdot 5,0 = 5000\,kG/m^2$
 $P = 2500 \cdot 0,20 \cdot 5,0 = 2500\,kG/m$.

Uwaga na jednostki
 kG/m³ - kilogram siły na metr³
 Dopiero ostateczne wyniki sił proszę przeliczyć na jednostki kN



Rys. 5-3

Przeanalizować dwa przypadki: płytę denną poddaną równomiernemu odporowi podłoża oraz płytę denną na podłożu *Winklera*.
 a. Równomierny odpór podłoża. Siły wewnętrzne w zbiorniku należy obliczać ze wzorów podanych w p. 8.5a:

$$H_A = \frac{1}{W} \left[\frac{P_w}{2\lambda_w} (H_{10}^* - A_1) - \frac{P_0^2 \lambda_w A_0 B_3}{2(1+\nu)} \right],$$

$$n_0^* = P_w r_0 \left[N_1^* + \frac{1}{W} (N_1^* - D_1 A_1) \right] - \frac{P_0^2 \lambda_w A_0 N_3^*}{(1+\nu) W},$$

$$m_0^* = \frac{1}{W} \left[\frac{P_w}{2\lambda_w} (M_0^* - A_2 D_2) - \frac{P_0^2 \lambda_w A_0 M_3^*}{2(1+\nu)} \right],$$

$$m_0^{*d} = \frac{1}{8} (3+\nu) P_0 D_{3T} + m_0^*|_{\xi=0},$$

$$m_0^{*d} = \frac{P_0}{8} [2(1-\nu) + (1+3\nu) D_{3T}] + m_0^*|_{\xi=0},$$

gdzie: $W = H_1^* + B_3 A_1$
 W pierwszym etapie wyznacza się wielkości charakterystyczne dla powłoki walcowej podane w p. 4.1:

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{r_0^3 h_w^2}} = \frac{1,3068}{\sqrt{7,0 \cdot 0,20}} = 1,104\,1/m,$$

$$V_w = \lambda_w l_w = 1,104 \cdot 5,0 = 5,52 \approx 5,5.$$

W drugim etapie, ze wzorów podanych w rozdz. 7, wyznacza się wszystkie współczynniki A istniejące we wzorach na siły:

$$A_1 = \left(\frac{h_w}{h_{pd}} \right)^3 = \left(\frac{0,20}{0,20} \right)^3 = 1,0,$$

$$A_2 = - \frac{2 \lambda_w r_0 A_0}{1+\nu} = - \frac{2 \cdot 1,104 \cdot 7,0 \cdot 1,0}{1+0,1667} = -13,2476$$

oraz współczynniki zależne od obciążenia:

$$P_w r_0 = 5000 \cdot 7,0 = 35\,000\,kG/m,$$

$$\frac{P_w}{2 \lambda_w} = \frac{5000}{2 \cdot 1,104} = 2264\,kG/m,$$

$$\frac{P_w}{2 \lambda_w^2} = \frac{5000}{2 \cdot 1,104^2} = 2051\,kGm/m,$$

$$m_0^* = 35\,000 \left(N_0^* + \frac{N_1^* + 13,2476 D_1}{14,2490} \right) - 69\,405 N_1^* - 69\,405 N_1^*$$

ζ_*	N_0^*	N_1^*	D_1	N_1^*	m_0^* kG/m
0,00	1,00	-1,00013	-1,00010	0,00000	0
0,05	0,95	-0,89991	-0,73111	-0,20629	21566
0,10	0,90	-0,73870	-0,49193	-0,30161	34611
0,15	0,85	-0,56082	-0,29741	-0,32196	41039
0,20	0,80	-0,39375	-0,15100	-0,29671	42713
0,25	0,75	-0,25209	-0,04915	-0,24805	41247
0,30	0,70	-0,14134	0,01530	-0,19146	37936
0,40	0,60	-0,00771	0,06551	-0,08950	29326
0,50	0,50	0,03991	0,05968	-0,02416	21217
0,60	0,40	0,04238	0,03725	0,00627	14681
0,70	0,30	0,02866	0,01684	0,01444	10117
0,75	0,25	0,02073	0,00925	0,01403	8126
0,80	0,20	0,01322	0,00332	0,01210	6300
0,85	0,15	0,00638	-0,00130	0,00939	4570
0,90	0,10	0,00012	-0,00506	0,00633	2896
0,95	0,05	-0,00579	-0,00838	0,00316	1244
1,00	0,00	-0,01158	-0,01156	-0,00003	-404

TABLICA 5-5

$$m_0^* = \frac{1}{14,2490} [2051 (M_0^* + 13,2476 D_1) - 57958 M_1^*]$$

ζ_*	M_0^*	D_1	M_1^*	m_0^* kG/m
0,00	0,81823	0,00000	1,00010	-3950
0,05	0,39190	-0,20625	0,73111	-3311
0,10	0,10093	-0,30154	0,49193	-2561
0,15	-0,07852	-0,23185	0,29743	-1835
0,20	-0,17299	-0,29657	0,15105	-1205
0,25	-0,20759	-0,24788	0,04029	-703
0,30	-0,20366	-0,19129	-0,01511	-331
0,40	-0,14269	-0,08943	-0,06509	-74
0,50	-0,07271	-0,02444	-0,05899	183
0,60	-0,02463	0,00223	-0,03650	155
0,70	-0,00141	0,01223	-0,01667	91
0,75	0,00313	0,01116	-0,00962	62
0,80	0,00453	0,00868	-0,00507	38
0,85	0,00392	0,00567	-0,00215	20
0,90	0,00233	0,00285	-0,00063	8
0,95	0,00073	0,00079	-0,00008	2
1,00	0,00000	0,00000	0,00000	0

$$\frac{P r_0^2 \lambda_0 A_0}{2(1+\nu)} = \frac{2500 \cdot 7,0^3 \cdot 1,104^2 \cdot 1,0}{2(1+0,1667)} = 63\,985 \text{ kG/m,}$$

$$\frac{P r_0^2 \lambda_0 A_0}{1+\nu} = \frac{2500 \cdot 7,0^3 \cdot 1,104^2 \cdot 1,0}{1+0,1667} = 98\,955 \text{ kG/m,}$$

$$\frac{P r_0^2 \lambda_0 A_0}{2(1+\nu)} = \frac{2500 \cdot 7,0^3 \cdot 1,104 \cdot 1,0}{2(1+0,1667)} = 57\,958 \text{ kGm/m,}$$

$$\frac{P r_0}{8} = \frac{2500 \cdot 7,0}{8} = 2187 \text{ kGm/m,}$$

$$\frac{P r_0}{8} (3+\nu) = 2187(3+0,1667) = 6927 \text{ kGm/m,}$$

$$2(1-\nu) = 2(1-0,1667) = 1,6667,$$

$$1+3\nu = 1+3 \cdot 0,1667 = 1,5001,$$

$$W = H_1^* + B_1 A_1 = 1,00013 - 13,2476(-1,00010) = 14,2490.$$

Wzory na sily wewnętrzne mają postać:

$$H_s = \frac{1}{14,2490} [2264(1,81824 + 13,2476) - 63985 \cdot 1,00007] = -2091 \text{ kG/m.}$$

Współczynniki B_1, B_2, H_1^* i H_2^* - wzięto z tablic dla $\nu_* = 5,5$.

$$n_0^* = 35\,000 \left(N_0^* + \frac{N_1^* + 13,2476 D_1}{14,2490} \right) - 988\,955 \frac{N_1^*}{14,2490} =$$

$$= 35\,000 \left(N_0^* + \frac{N_1^* + 13,2476 D_1}{14,2490} \right) - 69\,405 N_1^*, \text{ kG/m,}$$

$$m_0^* = \frac{1}{14,2490} [2051 (M_0^* + 13,2476 D_1) - 57\,958 M_1^*], \text{ kGm/m,}$$

$$m_1^* = 6927 D_{31} - 3950 \text{ kGm/m,}$$

$$m_2^* = 2187(1,6667 + 1,5001 D_{31}) - 3950, \text{ kGm/m.}$$

W tablicach 5-4, 5-5 i 5-6 podano wartości sił w poszczególnych przekrojach oraz wypisano z tablic liczbowych rozdz. 9 wartości współczynników istniejących we wzorach, a na rys. 5-3b podano wykresy tych sił wewnętrznych w poszczególnych elementach składowych zbiornika.

$$m_0^{2d} = 6927 D_{37} - 3950$$

$$m_1^{2d} = 2187(1,6667 + 1,5001 D_{37}) - 3950$$

e	D_{37}	m_0^{2d} kGm/m	$2187(1,6667 + 1,5001 D_{37})$ kGm/m	m_1^{2d} kGm/m
0,00	1,00000	2977	6926	2976
0,05	0,99750	2960	6917	2967
0,10	0,99500	2908	6893	2943
0,15	0,97750	2821	6852	2902
0,20	0,96000	2700	6795	2845
0,25	0,93750	2544	6721	2771
0,30	0,91000	2354	6631	2681
0,40	0,84000	1869	6401	2451
0,50	0,75000	1245	6106	2156
0,60	0,64000	483	5745	1795
0,70	0,51000	-417	5318	1368
0,75	0,43750	-919	5080	1130
0,80	0,36000	-1456	4826	876
0,85	0,27750	-2028	4556	606
0,90	0,19000	-2634	4268	318
0,95	0,09750	-3275	3965	15
1,00	0,00000	-3950	3645	-305

b. Płyta denna na podłożu *Winklera*. Siły wewnętrzne w zbiorniku należy obliczać teraz ze wzorów podanych w p. 8.5c:

$$H_A = \frac{1}{W} \left[\frac{p_w}{2 \lambda_w} (H_1^{2d} - A_1) - 2 P \lambda_w^2 L^2 A_0 B_5 B_{11} \right],$$

$$n_0^{2d} = p_w r_0 \left[N_0^{1d} + \frac{1}{W} (N_1^{1d} - D_1 A_1) \right] - \frac{4}{W} P \lambda_w^2 L^2 r_0 A_0 B_{11} N_5^{2d},$$

$$m_x^{2d} = \frac{1}{W} \left[\frac{p_w}{2 \lambda_w^2} (M_0^{2d} - D_2 A_2) - 2 P \lambda_w L^2 A_0 B_{11} M_2^{2d} \right],$$

$$m_r^{2d} = PL D_5 + D_7 m_x^{2d}|_{z=0}, \quad m_r^{2d} = PL D_6 + D_8 m_x^{2d}|_{z=0},$$

gdzie: $W = H_2^{2d} + B_1 A_4$.

Oprócz współczynników λ_w i V_w , obliczonych poprzednio, należy według wzorów podanych w p. 4.8 wyznaczyć dodatkowo wielkości:

$$D_{5d} = \frac{E h_{2d}^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{29 \cdot 10^6 \cdot 0,20^3}{12(1-0,1667^2)} = 1\,988\,617 \text{ kGm},$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{D_{5d}}{C}} = \sqrt[4]{\frac{1\,988\,617}{5 \cdot 10^6}} = 0,794 \text{ m},$$

$$\eta = \frac{r_0}{L} = \frac{7,00}{0,794} = 8,82 \approx 8,8.$$

W dalszym etapie obliczamy współczynniki:

$$A_0 = 1,0,$$

$$A_1 = -2 \lambda_w L B_{13} A_0 - 2 \cdot 1,104 \cdot 0,794 \cdot 1,47845 \cdot 1,0 = -2,5920 \quad (B_{13} \text{ -- z tabl. 9-2 rozdz. 9})$$

oraz wyrażenia zależne od obciążenia:

$$2 P \lambda_w^2 L^2 A_0 = 2 \cdot 2500 \cdot 1 \cdot 104^2 \cdot 0,794^2 \cdot 1,0 = 3842 \text{ kG/m},$$

$$4 P \lambda_w^2 L^2 r_0 A_0 = 4 \cdot 2500 \cdot 2 \cdot 104^2 \cdot 0,794^2 \cdot 7,0 \cdot 1,0 = 59\,382 \text{ kG/m},$$

$$2 P \lambda_w L^2 A_0 = 2 \cdot 2500 \cdot 1,104 \cdot 0,794^2 \cdot 1,0 = 3480 \text{ kGm/m},$$

$$PL = 2500 \cdot 0,794 = 1985 \text{ kGm/m},$$

$$W = H_2^{2d} + B_1 A_1 = 1,00013 - 2,5920 \cdot (-1,00010) = 3,5924$$

(H_2^{2d} i B_1 -- z tabl. rozdz. 9 dla $V_w = 5,5$).

Wzory na siły wewnętrzne mają postać:

$$H_A = \frac{1}{3,5924} [2264(1,81824 + 2,5920) -$$

$$- 3842 \cdot 1,00007 \cdot 1,03940] = 1668 \text{ kG/m},$$

$$n_0^{2d} = 35\,000 \left(N_0^{1d} + \frac{N_1^{1d} + 2,5920 D_1}{3,5924} \right) - \frac{59\,382 \cdot 1,03940}{3,5924} N_5^{2d} =$$

$$= 35\,000 \left(N_0^{1d} + \frac{N_1^{1d} + 2,5920 D_1}{3,5924} \right) - 17\,181 N_5^{2d} \text{ kG/m},$$

$$m_x^{2d} = \frac{1}{3,5924} [2051 (M_0^{2d} + 2,5920 D_2) - 3480 \cdot 1,03940 M_2^{2d}] =$$

$$= \frac{1}{3,5924} [2051 (M_0^{2d} + 2,5920 D_2) - 3617 M_2^{2d}], \text{ kGm/m},$$

$$m_r^{2d} = 1985 D_6 - 540 D_7, \text{ kGm/m},$$

$$m_r^{2d} = 1985 D_6 - 540 D_8, \text{ kGm/m}.$$

Obliczenie wartości wszystkich sił wewnętrznych w poszczególnych przekrojach podano w tabl. 5-7, 5-8 i 5-9, zamieszczając w nich jednocześnie wartości współczynników z tablic rozdz. 9. Wykresy tych sił przedstawiono na rys. 5-3c.

TABLICA 5-7

$$n_v^* = 35000 \left[N_1^{1a} + \frac{1}{3,5924} (N_1^{1a} + 2,5920 D_1) \right] - 17181 N_2^{1a}$$

ζ_v	N_1^{1a}	N_2^{1a}	D_1	$\frac{N_1^{1a} + 2,5920 D_1}{3,5924}$	$35000[(2) + (5)]$	$17181 N_2^{1a}$	n_v^* kG/m
1	2	3	4	5	6	7	8
0,00	1,00	1,00013	1,00010	-1,00000	0	0	0
0,05	0,95	0,89991	0,73111	-0,7780	6020	3544	9564
0,10	0,90	0,73870	0,49193	-0,5606	11879	5182	17061
0,15	0,85	0,56082	0,29741	-0,3707	16775	5532	22307
0,20	0,80	0,39375	0,15100	-0,2185	20352	5098	25450
0,25	0,75	0,25269	0,04915	-0,1096	22554	4262	26816
0,30	0,70	0,14134	0,01530	-0,0283	23509	3289	26798
0,40	0,60	0,00771	0,06551	0,0451	22578	1538	24116
0,50	0,50	0,09991	0,09968	0,0542	19397	415	19812
0,60	0,40	0,04238	0,03725	0,0387	15354	108	15246
0,70	0,30	0,02866	0,01684	0,0201	11203	248	10955
0,75	0,25	0,02073	0,00925	0,0124	9184	241	8943
0,80	0,20	0,01322	0,00332	0,0061	7213	208	7005
0,85	0,15	0,00638	0,00130	0,0008	5278	161	5117
0,90	0,10	0,00012	0,00056	-0,0036	3374	109	3265
0,95	0,05	-0,00579	-0,00838	-0,0077	1480	54	1426
1,00	0,00	-0,01158	-0,01156	-0,0116	-406	-1	-405

TABLICA 5-8

$$m_x^* = \frac{1}{3,5924} [2051 (M_0^{1a} + 2,5920 D_2) - 3617 M_2^{1a}]$$

ζ_x	$2051(M_0^{1a} + 2,5920 D_2)$	$3617 M_2^{1a}$	$(2) - (3)$	m_x^* kG/m
1	2	3	4	5
0,00	1678	3617	-1939	-540
0,05	-293	2644	-2937	-818
0,10	-1396	1779	-3175	-884
0,15	-1872	1076	-2948	-821
0,20	-1931	546	-2477	-690
0,25	-1744	178	-1922	-535
0,30	-1435	-55	-1380	-384
0,40	-768	-235	-533	-148
0,50	-279	-213	-66	-18
0,60	-23	132	109	30
0,70	62	60	122	34
0,75	66	-36	102	28
0,80	55	-18	73	20
0,85	38	-8	46	13
0,90	20	-2	22	6
0,95	6	0	6	2
1,00	0	0	0	0

TABLICA 5-9

$$m^{1a} = 1985 D_5 - 540 D_2; \quad m^{1a} = 1985 D_5 - 540 D_2$$

ζ	D_5	D_2	m^{1a} kG/m
0,00	-0,00553	0,00399	-0,00553
0,05	-0,00667	0,00150	-0,00667
0,10	-0,00819	0,00150	-0,00819
0,15	-0,01178	-0,00279	-0,01178
0,20	-0,01630	-0,00899	-0,01630
0,25	-0,02110	-0,01710	-0,02110
0,30	-0,02510	-0,02686	-0,02510
0,40	-0,02402	-0,04758	-0,04758
0,50	0,00665	-0,05440	-0,05440
0,60	0,09193	-0,01203	-0,01490
0,70	0,24437	0,13163	0,06807
0,75	0,33648	0,25604	0,10338
0,80	0,42139	0,41705	0,14038
0,85	0,47429	0,60486	0,17240
0,90	0,45723	0,79659	0,18894
0,95	0,31911	0,95000	0,17531
1,00	0,00000	1,00000	0,11339
0,00	-0,00553	0,00440	-0,00553
0,05	-0,00667	0,00316	-0,00667
0,10	-0,00819	0,00104	-0,00819
0,15	-0,01178	-0,00201	-0,01178
0,20	-0,01630	-0,00601	-0,01630
0,25	-0,02110	-0,01357	-0,02110
0,30	-0,02510	-0,01619	-0,02510
0,40	-0,02402	-0,01879	-0,02402
0,50	0,00665	-0,01164	-0,01164
0,60	0,09193	-0,01490	-0,01490
0,70	0,24437	0,01475	0,01475
0,75	0,33648	0,10338	0,10338
0,80	0,42139	0,14038	0,14038
0,85	0,47429	0,16933	0,16933
0,90	0,45723	0,18894	0,18894
0,95	0,31911	0,21139	0,21139
1,00	0,00000	0,236129	0,236129
0,00	-0,00553	0,00440	-0,00553
0,05	-0,00667	0,00316	-0,00667
0,10	-0,00819	0,00104	-0,00819
0,15	-0,01178	-0,00279	-0,01178
0,20	-0,01630	-0,00899	-0,01630
0,25	-0,02110	-0,01710	-0,02110
0,30	-0,02510	-0,02686	-0,02510
0,40	-0,02402	-0,04758	-0,04758
0,50	0,00665	-0,05440	-0,05440
0,60	0,09193	-0,01203	-0,01490
0,70	0,24437	0,13163	0,06807
0,75	0,33648	0,25604	0,10338
0,80	0,42139	0,41705	0,14038
0,85	0,47429	0,60486	0,17240
0,90	0,45723	0,79659	0,18894
0,95	0,31911	0,95000	0,21139
1,00	0,00000	1,00000	0,236129