

Rozstaw filarów.

Mając w przybliżeniu określone rozmiary ekonomiczne sklepienia i filarów, można przystąpić do określenia najwłaściwszego rozstawu filarów na podstawie minimum kosztów całej zapory. Rozstaw ten co prawda musiał być już ustalony przed przystąpieniem do obliczeń statycznych łuków i filarów, teraz jednakże nastąpi sprawdzenie przyjętej wielkości i ewentualna korekta, która może nawet pociągnąć za sobą powtórne obliczenie łuków i filarów.

Rozstaw filarów zależy od konfiguracji doliny. Rozpatrzone będą dwa wypadki: zapory o jednakowej wysokości i zapory o wysokości zmiennej. Chociaż wypadek drugi w rzeczywistości przeważnie ma miejsce, to jednak pierwszego wypadku nie należy traktować jako zagadnienia czysto teoretycznego. Wypadek pierwszy może mieć miejsce w szerokiej płaskiej dolinie.

Przy określaniu najwłaściwszego rozstawu należy ustalić minimum kosztów zapory, na które składają się

1 - koszt materiału /betonu/ do budowy filarów,

- 2 - koszt materiału /żelbetu/ do budowy sklepień,
- 3 - " deskowania filarów,
- 4 - " " sklepień,
- 5 - " wykopania dołów fundamentowych pod filary,
- 6 - " materiału /żelbetu/ do wykonania belek stężających i korony.

Należy zatem określić:

- 1 - objętość filara,
- 2 - " sklepienia,
- 3 - powierzchnię boczną filara,
- 4 - " " sklepienia,
- 5 - objętość wykopu pod fundament filara,
- 6 - " belek stężających i korony.

Wszystkie powyższe wielkości należy odnieść do jednostki długości, wyrażając je przy tym w funkcji L , traktując wszystkie wymiary filara jako stałe.

Zapora o stałej wysokości.

1. Objętość filara określa wzór na str.107, który po odpowiednich przeróbkach przybiera postać

$$V = \frac{1}{6} H^2 L \lambda (m+n)(2\mu+1);$$

Wynika stąd, że w odniesieniu do jednostki

długości zapory objętość filara

$$V' = \frac{V}{L} = \text{const.}$$

jest niezależna od rozstawu filarów L .

2. Objętość sklepienia wyrażona jest wzorem na str.134, który po wprowadzeniu do niego odpowiednich wielkości możemy przedstawić w formie

$$V_1 = H (d_1 + d_2) \varphi r_0 \sqrt{1+n^2};$$

$$\text{gdzie } r_0 = \frac{l_0}{\sin \varphi};$$

Wprowadzając dalej $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ i $\delta = \frac{d}{l}$;

oraz przyjmując z nieznacznym błędem $r = r_0$

i $2l_0 = L$, otrzymujemy

$$V_1 = H \cdot \delta \cdot \frac{\varphi}{2 \sin \varphi} \cdot \sqrt{1+n^2} \cdot L^2;$$

Okazuje się więc, że jednostkowa objętość sklepienia

$$V_1' = \frac{V_1}{L} = B \cdot L;$$

jest wprost proporcjonalna do rozstawu filarów

/ $B = \text{constans}$ /.

3. Powierzchnia boczna filarów /porów. rys.45/:

powierzchnia czołowa od strony wody

$$\frac{a_1 + a_2}{2} \cdot \frac{H}{\cos \alpha} = \frac{1}{2} H \lambda (\mu + 1) \sqrt{1+n^2} \cdot L;$$

powierzchnia czołowa od strony powietrza

$$\frac{a_1 + a_2}{2} \cdot \frac{H}{\cos \beta} = \frac{1}{2} H \lambda (\mu + 1) \cdot \sqrt{1 + m^2} \cdot L ;$$

razem obie powierzchnie czołowe wynoszą

$$C_1 \cdot L ;$$

Dwie powierzchnie boczne /pomijając ich nieznaczne pochylenie/

$$2 \cdot \frac{bH}{2} = H^2 (m + n) = C_2 ;$$

wielkości C_1 oraz C_2 są stałe.

Cała powierzchnia boczna filara

$$S = C_1 \cdot L + C_2 ;$$

a na 1 m długości zapory

$$S' = C_1 + C_2 \cdot \frac{1}{L} ;$$

Koszt szalowania filara maleje przy wzrastającym rozstawie.

4. Powierzchnia boczna sklepień. Obliczenie można sobie uprościć, uważając powierzchnie zewnętrzna i wewnętrzną jako cylindryczne i dla każdej z nich przyjmując ten sam średni promień r w połowie głębokości. Zatem

$$S_1 = 2 \cdot \frac{H}{\cos \alpha} \cdot 2 \varphi r = 4 H \frac{\varphi}{\sin \varphi} \cdot \sqrt{1 + n^2} \cdot l ;$$

Jeśli przyjmiemy, że $2l = L$ to wypada

$$S_1 = D \cdot L ;$$

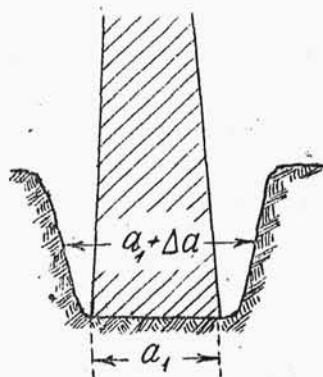
a na 1 m długości zapory

$$S_1' = D = \text{const.};$$

Koszty szalowania sklepień są niezależne od rozstawu filarów. Powyższy rezultat nie jest ścisły, gdyż nie uwzględnia kosztu krążyn, który bezsprzecznie związany jest z rozpiętością łuku, a tym samym z rozstawem filarów. Mimo tej niedokładności można poprzestać na powyższym wyniku.

5. Objętość wykopu fundamentowego /rys.65/

$$\begin{aligned} M &= (a_1 + \Delta a) b t = a_1 b t + \Delta a \cdot b t = \\ &= H t \lambda \mu (m+n) L + H t \cdot \Delta a \cdot (m+n); \end{aligned}$$



rys.65.

Wielkości Δa i t uwarunkowane są jedynie: pierwsza - wygodą wykonywania fundamentu w wykopie, druga - warunkami geologicznymi. Zatem wielkości te nie zależą od L . Po przeliczeniu na 1 mb zapory otrzymuje się

$$M' = E_1 + E_2 \cdot \frac{1}{L};$$

t.zn. że jednostkowe koszty wykopu fundamentowego wzrastają w miarę zmniejszania rozstawu filarów.

6. Objętość belek stężających i korony. Mate-

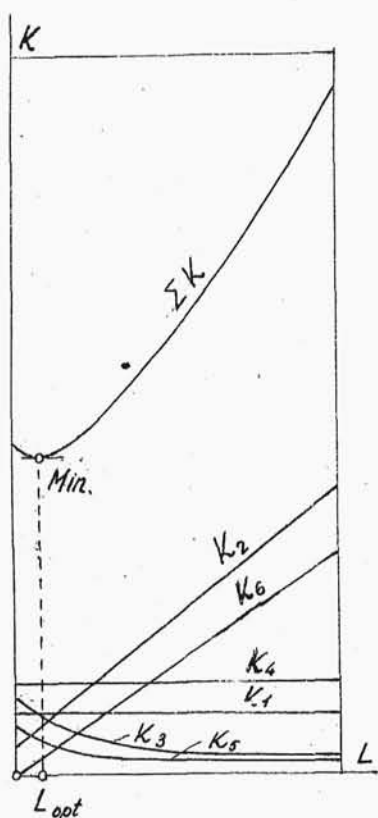
matyczne ustalenie zależności między objętością V_2 korony i belek wiążących a rozstawem jest niemożliwe. Ponieważ jednak belki stężające częściowo są skonstruowane jako pomosty /galeryjki rewizyjne/, więc można przyjąć, że ich koszt jednostkowy jest wprost proporcjonalny do rozpiętości L / tak jak koszt mostów/, czyli

$$V_2' = F \cdot L ;$$

Najprościej jest obliczyć rzeczywisty koszt korony i wszystkich stężeń na podstawie szkicu konstrukcyjnego i podzielić otrzymany rezultat na L^2 ; otrzymamy wtedy współczynnik F powyższego wzoru.

Mając już obecnie określone wszystkie wielkości podstawowe , należy pomnożyć je przez odpowiednie koszty jednostkowe betonu, żelbetu i t.d. , aby otrzymać zależność poszczególnych kosztów od rozstawu filarów :

- koszt filara $K_1 = k_1 A$;
" sklepienia $K_2 = k_2 B L$;
" szalowania filara $K_3 = k_3 (C_1 + C_2 \cdot \frac{1}{L})$;
" " sklepień $K_4 = k_4 D$;
" wykopu fundamentowego .. $K_5 = k_5 (E_1 + E_2 \cdot \frac{1}{L})$;



rys. 66.

koszt korony i tężników

$$K_6 = k_6 FL ;$$

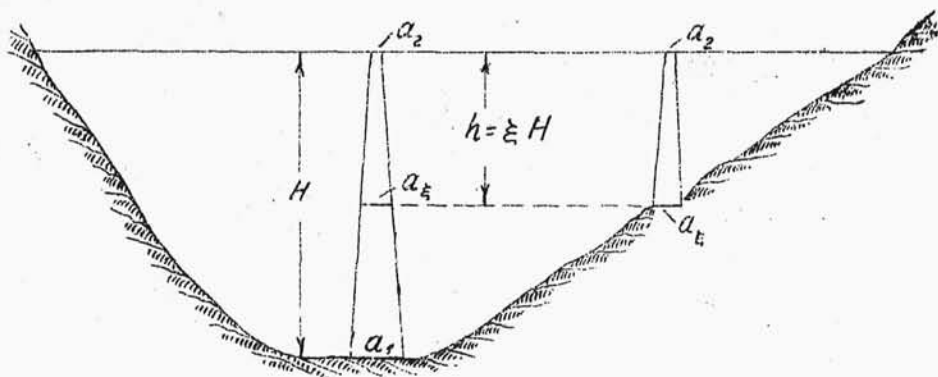
Krzywe powyższe i ich suma przedstawione są na rys. 66.

Minimum sumy kosztów ΣK określa najracjonalniejszy, najekonomiczniejszy rozstaw filarów: L_{opt} ;

Zapora o zmiennej wysokości

Przebieg rozważań będzie i tym razem taki sam, jak w wypadku zapory o stałej wysokości. Jedyną różnicą będzie wprowadzenie dodatkowej zależności od wysokości h zapory w danym miejscu doliny.

1. Ogólna objętość filarów. Niechaj wszystkie filary mają wymiary proporcjonalne do wymiarów



rys.67.

największego filara, t.zn. że szerokość podstawy II filara /rys.67/ o wysokości h jest taka sama, co grubość filara I /największego/ w głębokości h , a więc

$$a_\xi = a_2 + (a_1 - a_2) \cdot \frac{h}{H};$$

oraz

$$\mu_\xi = \frac{a_\xi}{a_2} = 1 + (\mu - 1) \cdot \frac{h}{H};$$

Objętość dowolnego filara o wysokości h wynosi

$$V_\xi = \frac{1}{6} h^2 L \lambda (m+n) (2\mu_\xi + 1);$$

/porów.ustęp poprzed.str.163/.

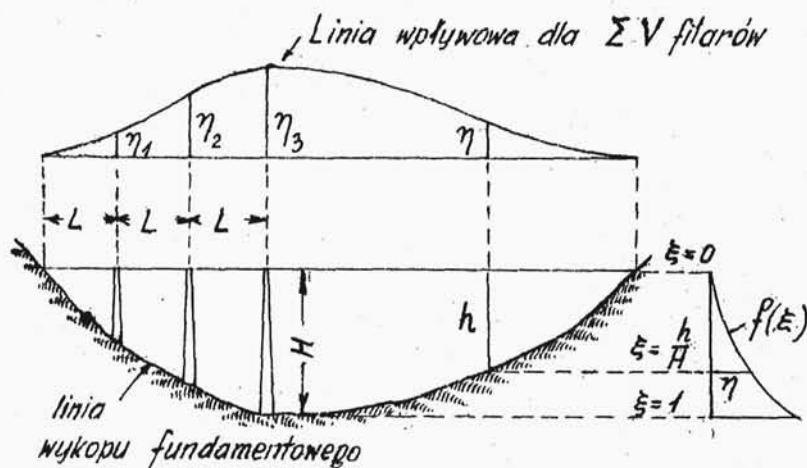
Wstawiając wielkość μ_ξ i oznaczając $\frac{h}{H} = \xi$ /zmiennie/, wypada

$$V_\xi = \frac{1}{6} \cdot H^2 \lambda (m+n) [2\xi^3 (\mu - 1) + 3\xi^2] \cdot L;$$

czyli $V_{\xi} = f(\xi) \cdot L$;

Wyznaczenie ogólnej kubatury wszystkich filarów przeprowadza się w następujący sposób.

Dla każdej głębokości h w granicach od 0 do H , t.zn. dla $\xi = 0 \dots\dots 1$ określa się wartości funkcji $f(\xi)$ i przedstawia na wykresie obok rysunku przekroju doliny /rys.68/. Następnie na pionowych rzędnych odkłada się w górę /od pewnej linii poziomej/ wartości $f(\xi)$, odpowiadające wielkości danej rzędnej. Na rys.68 pokazano tę manipulację dla rzędnej h , dla której $f(\xi) = \eta$. Otrzymuje się w ten sposób niejako "linię wpływową" dla objętości filarów. Terminu "linia wpływowa" dla objętości filarów. Terminu "linia wpływowa"



rys.68.

wowa" użyto z racji podobieństwa korzystania z niej. Mianowicie dla określenia ogólnej kubatury filarów, rozmieszczonych w odstępach L , odmierza się rzędne $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$ odpowiadające temu odstępowi /rys.68/. Suma pomierzonych w ten sposób rzędnych daje łączną objętość wszystkich filarów ustawionych w osiowej odległości L :

$$\sum V = L \cdot \sum \eta;$$

Wzór powyższy przedstawia pole pod linią wpływową, a więc dochodzimy do wniosku, że ogólny koszt filarów jest niezależny od rozstawu L .

2. Ogólną objętość sklepień $\sum V$, oblicza się w sposób analogiczny do podanego wyżej dla określenia $\sum V$ filarów. Podstawą będzie tutaj wzór /str.164/ dla dowolnej głębokości

$$V_{1\xi} = h \delta_{sr} \cdot \frac{\varphi}{2 \cdot \sin \varphi} \cdot \sqrt{1+n^2} \cdot L^2;$$

Chcąc do wzoru powyższego wprowadzić wielkość ξ , należy uciec się do następujących przeróbek

$$\delta_{sr} = \frac{\delta_{\xi} + \delta_2}{2};$$

δ_{sr} - względna grubość łuku w średniej głębokości $\frac{h}{2}$;

δ_{ξ} - względna grubość łuku w głębokości h ;

δ_2 - względna grubość łuku u szczytu zapory.

Jeśli grubości łuków wzrastają liniowo, to

$$\delta_{\xi} = \delta_2 + (\delta_1 - \delta_2) \cdot \frac{\xi}{H};$$

$$\delta_{sr} = \frac{1}{2} [2\delta_2 + (\delta_1 - \delta_2)\xi];$$

zatem

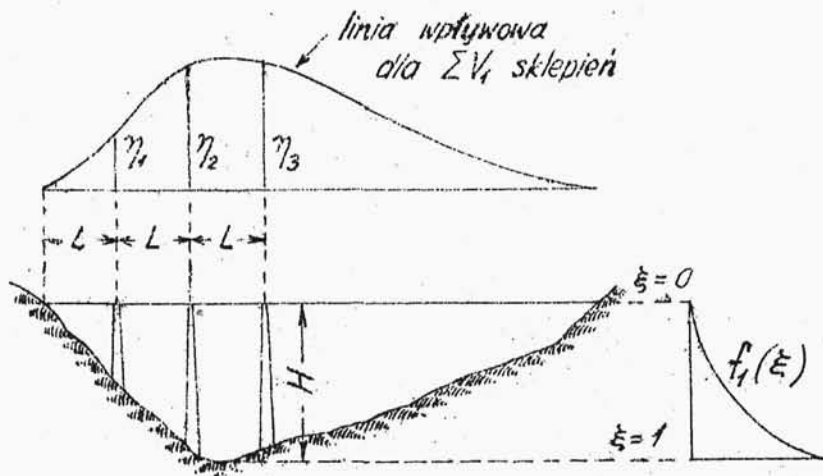
$$V_{1\xi} = H \cdot \frac{\varphi}{4 \sin \varphi} \cdot \sqrt{1+n^2} [2\delta_2 \xi + (\delta_1 - \delta_2)\xi^2] \cdot L^2;$$

$$V_{1\xi} = f_1(\xi) \cdot L^2;$$

W sposób poprzednio opisany konstruuje się linię wpływową dla ogólnej objętości sklepień /rys.69/ i określa ogólną kubaturę sklepień

$$\Sigma V_1 = L^2 \Sigma \eta;$$

We wzorze powyższym iloczyn $L \cdot \Sigma \eta$ oznacza pole pod linią wpływową, a więc wielkość stałą.



rys.69.

Wynika stąd, że koszt sklepień jest wprost proporcjonalny do rozstawu L

3. Ogólna powierzchnia boczna filarów na podstawie wzoru na str. 165

$$S = C_1 L + C_2 ;$$

Licząc jednak dokładniej otrzymuje się /na wysokości h /:

$$S_{\xi} = h \lambda \left(\mu_{\xi} + 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{1+n^2} + \sqrt{1+m^2}}{2} \cdot L + \\ + h^2 (m+n) ;$$

a ponieważ $\mu_{\xi} = 1 + (\mu - 1) \xi$ więc

$$S_{\xi} = H \lambda \cdot \frac{\sqrt{1+n^2} + \sqrt{1+m^2}}{2} \cdot [2\xi + (\mu - 1)\xi^2] \cdot L + \\ + H^2 (m+n) \xi^2 ;$$

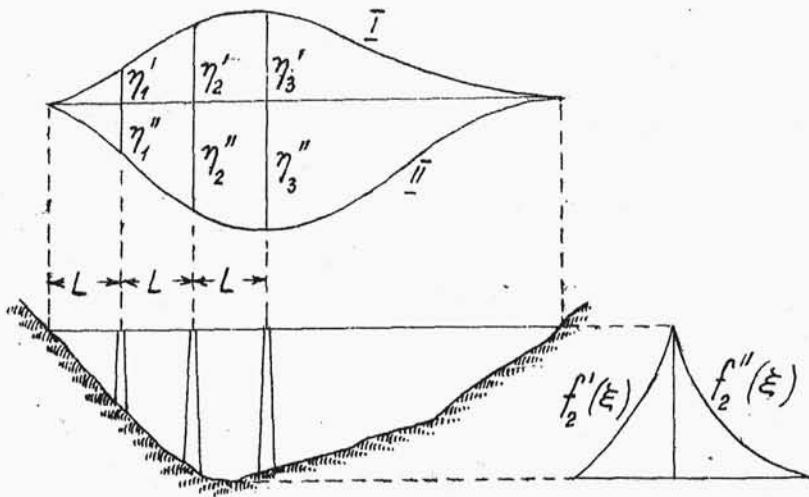
$$S_{\xi} = f_1'(\xi) \cdot L + f_2''(\xi) ;$$

Postępując jak poprzednio, można wykreślić dwie linie wpływowe: jedną /I/ na rys. 70/ odpowiadającą $f_1'(\xi)$ i drugą /II/ odpowiadającą $f_2''(\xi)$.

Ogólna powierzchnia boczna filarów wyniesie

$$\Sigma S = L \Sigma \eta' + \Sigma \eta'' ;$$

Składnik pierwszy wyraża pole pod krzywą I, składnik drugi, jak łatwo się przekonać, jest tym mniejszy, im rozstaw filarów uczynimy więk-



rys. 70.

szy. Zatem koszt szalowania filarów maleje przy zwiększającym się rozstawie.

4 Ogólna powierzchnia sklepień. Korzystamy ze wzoru podanego na str.165.

$$S_{1\xi} = 4 \frac{\varphi}{\sin \varphi} \sqrt{1+n^2} \cdot h \cdot L ;$$

zatem

$$\sum S_1 = 4 \frac{\varphi}{\sin \varphi} \cdot \sqrt{1+n^2} \cdot L \cdot \sum h ;$$

Iloczyn $L \sum h$ oznacza pole przekroju doliny, a więc wielkość stałą, czyli że koszty szalowania sklepień są niezależne od rozstawu filarów.

5. Ogólna objętość wykopu fundamentowego.

Ponieważ

$$\begin{aligned} M_{\xi} &= ht\lambda\mu_{\xi}(m+n)L + ht\Delta a(m+n) = \\ &= HtL(m+n)[\xi + (\mu-1)\xi^2]L + Ht\Delta a(m+n)\xi; \end{aligned}$$

więc
$$\Sigma M = L \cdot \Sigma f'_3(\xi) + \Sigma f''_3(\xi);$$

Dla określenia ΣM przy różnych L postępowanie będzie takie samo jak wyżej przy obliczaniu ΣS . Z podanego wzoru można wnioskować, że koszty fundowania maleją wraz ze wzrostem L .

6. Ogólną objętość belek stężających i korony najwygodniej jest ustalić na podstawie szkiców konstrukcyjnych dla rozmaitych L .

Z przebiegu powyższych rozważań widać, że koszty poszczególnych elementów zapory o zmiennej wysokości są w takiej samej zależności od rozstawu filarów, jak w wypadku, gdy wysokość zapory była stała. W dalszym więc ciągu postępujemy tak, jak przy poszukiwaniu $L_{opt.}$ dla zapory o stałej wysokości, konstruując wykres podobny do podanego na rys.66 /przebieg krzywych będzie zupełnie identyczny/ i znajdując minimum krzywej sumy kosztów.