

zawiliych, że przekreślone byłoby znaczenie tej metody jako metody praktycznej. Należy więc poczynić pewne uproszczenia, które jednak nie zmniejszają wartości omówionej metody, metody ujmującej pracę zapory w sposób najbardziej zbliżony do rzeczywistości. Byłoby bezcelowe ustalać zupełnie ściśle wzory, w których występujące wartości są przybliżone, lub wręcz hipotetyczne np. wpływ temperatury, zmienność współczynnika sprężystości betonu, nieregularny kształt doliny, niezupełnie sztywne zamocowanie łuków i wsporników w skale i t.d.. Uproszczenia polegają na pominięciu wszystkich przesunięć z wyjątkiem przesunięcia δ . Należy zatem rozwiązać równania

$$\delta_{nsp} = \delta_{luk} ;$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 ;$$

Przebieg obliczenia

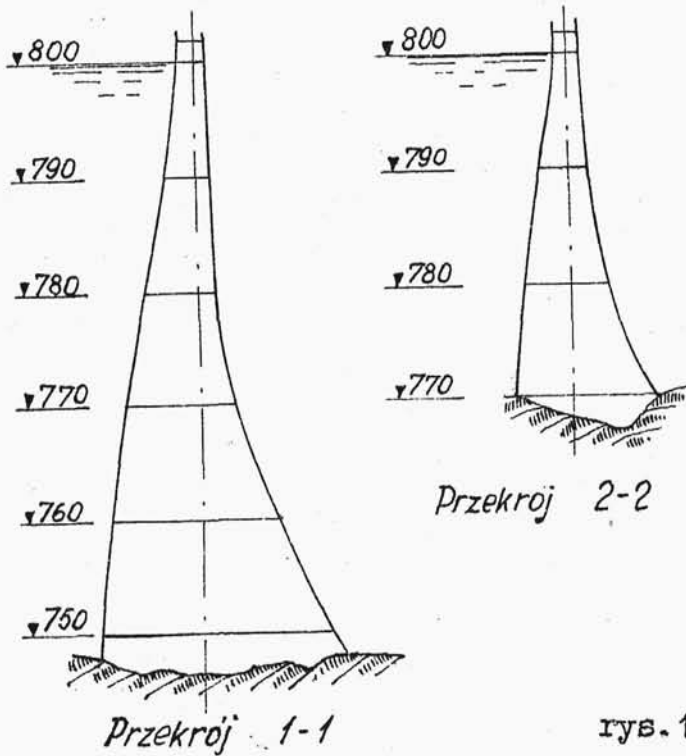
Kolejność obliczeń jest następująca:

- 1 - przybliżone określenie wymiarów zapory,
- 2 - pierwsze prawdopodobne rozdzielenie parcia wody,
- 3 - ustalenie odkształcenia wsporników,

- 4 - obliczenie wielkości statycznie niewyznaczalnych łuków,
- 5 - obliczenie kształtów łuków,
- 6 - porównanie odkształceń wsporników i łuków oraz poprawienie rozdziału parcia wody. jeśli różnice ugięć wsporników i łuków wypadają mniejsze od 10 %, można dalszych przybliżeń nie robić,
- 7 - ostateczne obliczenie łuków /wielkości hiperstatycznych/ na podstawie definitywnie ustalonego rozdziału parcia wody,
- 8 - sprawdzenie naprężeń.

Kształt zapory zakładamy sobie, dobierając promień krzywizny i stały kąt środkowy na różnych wysokościach odpowiednio do konfiguracji doliny, prowadząc łuki możliwie prostopadle do warstwie /rys.100/. Grubości zapory określamy na razie w przybliżeniu np. wzorem Naviera dla naczyń cienkościennych, przy czym na ogół łukem dajemy większe grubości w wezłowiach. Kształt zapory w przekroju pionowym pokazany jest na rys.108 /położenie przekrojów zaznaczone jest na rys.136/. Część górna, gdzie uwydatnia się większy wpływ łuków, jest cienka. Część dolna - obszar dominującego

Montsalvens (rz. Jogne), Szwajcaria



rys. 108.

wpływu wsporników - kształtem swym przypomina przekrój zapory ciężkiej.

A. Stücky podaje następujące normy grubości d zapory na dnie w zależności od wysokości H zapory i od rozpiętości $2.l$ doliny, mierzonej na wysokości korony zapory:

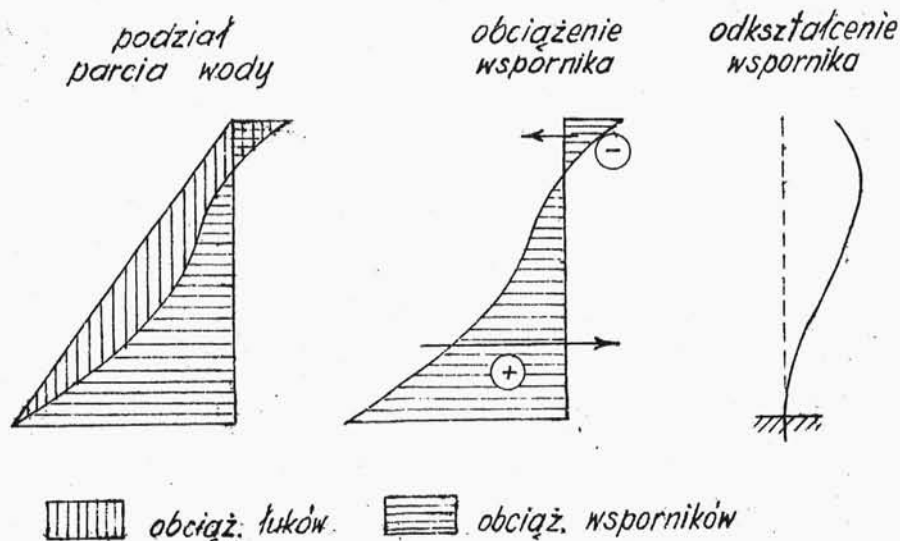
$\frac{2.l}{H}$	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,50	/3,00/
$\frac{d}{H}$	0,21	0,26	0,31	0,35	0,39	0,45	/0,50/

Grubość muru w koronie

$$\frac{\sqrt{H}}{2};$$

o ile nie ma drogi kołowej.

Przy pierwszym podziale parcia hydrostatycznego kierujemy się następującą wskazówką: im bardziej sztywny jest wspornik /lub łuk/, tym większą część obciążenia przejmuje. Tak więc w najniższych przekrojach środkowych całe parcie wody obciążą wsporniki /rys. 106 i 109/. Odwrotnie rzecz się ma w przekrojach najwyższych, gdzie całkowite parcie wody przejmuje łuki, a działanie wsporników może być nawet ujemne /rys. 106 i 109/.



rys. 109.

Wynika to wskutek tego, że swobodnemu ugięciu się końca wspornika przeciwdziałają górne łuki /i korona/. Łuki te odkształcają się tylko wskutek deformacji wsporników; parcie wody tam nie istnieje.

Gdy znów ustalać będziemy rozdział parcia wody w przekrojach poziomych, to ponieważ sztywne węzłowie są jednocześnie nieodkształcalnymi podstawami bocznych wsporników, parcie wody rozdziela się jednakowo na wspornik i łuk w tym miejscu zamocowany /rys.106/.

Korona zapory, chociaż nie jest bezpośrednio obciążona parciem wody, jednak przez to, że stanowi jedną całość z murem zapory, bierze udział w "pracy" muru zapory. Jeżeli korona ma duże wymiary /np. w celu pomieszczenia drogi/, to wówczas jest bardziej sztywna od sąsiednich, niżej położonych łuków, i wskutek tego przyjmuje większą część parcia wody, odciążając górne warstwy zapory i przeciwstawiając się odkształceniom końców wsporników /rys.109/.

Pierwszy przybliżony rozdział parcia wody można też wykonać, posiłkując się wzorami Résala

$$p_1 = \gamma y \left(\frac{y}{H} \right)^\alpha ;$$

$$p_2 = \gamma y \left[1 - \left(\frac{y}{H} \right)^\alpha \right] ;$$

Wykładnik potęgi α

zależy od geometrycz-

nych kształtów zapory,

a mianowicie od wy-

sokości H , promie-

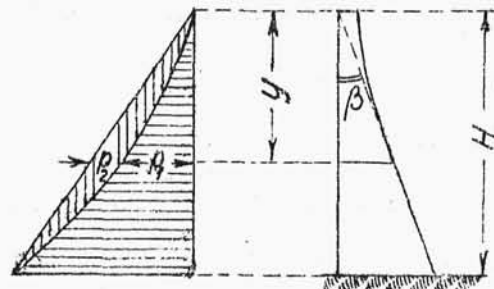
nia r krzywizny ko-

rony łuku, kąta środ-

kowego 2φ oraz po-

chylenia β ściany od strony powietrza /rys.110/.

Wielkości α można przyjąć z poniższych tablic.



rys. 110.

$\frac{H}{r} \cdot \frac{\text{ctg } \beta}{\sqrt{C}}$	α	$\frac{H}{r} \cdot \frac{\text{ctg } \beta}{\sqrt{C}}$	α	φ	C
0,00	0,00	4,5	2,50	45°	1,9
0,91	0,25	5,0	2,80	50°	2,0
1,00	0,30	5,3	3,00	55°	2,0
1,36	0,50	7,0	4,00	60°	2,0
1,50	0,58	8,7	5,00	65°	2,0
1,80	0,75	9,0	5,25		
2,00	0,87	10,5	6,00		
2,20	1,00	11,0	6,25		
2,96	1,50	12,5	7,0		
3,00	1,50	13,0	7,3		
3,76	2,00	15,0	7,9		
4,00	2,15	15,2	8,0		

Tablice z podręcznika Kalinowicza "Naczala teorii betonnych plotin".

Na ogół obliczamy większą liczbę łuków /rozpatrując przekroje co 3....5....10....15 m zależnie od wysokości zapory/ a tylko kilka wsporników, czasem w korzystnych warunkach tylko jeden, środkowy.

Na zakończenie jedna uwaga. Wyżej przedstawiona metoda ścisłego obliczenia zapory łukowej słuszna jest dopóty, dopóki nie powstaną w zapory pęknięcia. Pęknięcie poziome odcina część wspornika /górną/, która już nie może brać udziału w jego pracy, powodując tym samym przeciążenie elementów łukowych. Jest to szczególnie niebezpieczne, gdy pęknięcie /ścięcie/ nastąpi u spodu zapory, niwecząc wpływ sztywnego zamocowania zapory w dnie doliny. Pęknięcia poziome mogą często powstawać pod wpływem zmian temperatury. Jeśli pęknięcie będzie pionowe, wówczas zmieniają się warunki pracy łuków, powodując przeciążenie wsporników. Zjawiska te wyraźnie obserwowano przy badaniu zapory doświadczalnej w Ameryce /porów. rozdz. "Badanie zapór na modelach", ustępy omawiające wyniki badań zapory doświadczalnej na rz. Stevenson/.

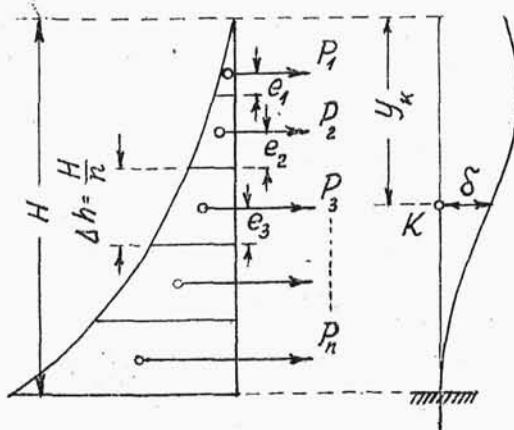
Odształcenie wspornika.

Wstęp.

Parcie wody, występujące w sposób ciągły zastępujemy siłami skupionymi $P_1 P_2 P_3 \dots$ /rys.111/, dzieląc całą wysokość zapory na n odcinków równych o wysokości Δh każdy. Liczba n odpowiada ilości rozpatrywanych łuków.

Punkty zaczepienia sił $P_1 P_2 P_3 \dots$ można określić graficznie lub algebraicznie, znajdując położenie środków ciężkości odpowiednich pól wykresu. Jeśli Δh jest niewielkie, można z dostateczną dokładnością przyjąć

$$e_1 = e_2 = \dots = \frac{\Delta h}{2};$$



rys.111.

Wyjatek może stanowić odległość e_1 określająca położenie siły P_1 , która w przypadku ostrokątnego zakończenia wykresu parć jednostkowych /rys.111/ działała w odległości

$$e_1 = \frac{\Delta h}{3};$$

Obliczenie ugięć przy pomocy równania
energii sprężystej.

W celu obliczenia ugięcia δ w pcie K , określamy kolejno ugięcia $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m, \dots, \delta_n$, występujące w tymże pcie K wskutek działania każdej z sił $P_1, P_2, \dots, P_m, \dots, P_n$ osobno. Suma ugięć w ten sposób obliczonych da nam szukaną wielkość

$$\delta = \sum_{m=1}^{m=n} \delta_m ;$$

Ugięcia $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m, \dots, \delta_n$ oblicza się wzorem

$$\delta_m = \int_{y_k}^H \frac{M \cdot M_1}{E \cdot J} \cdot dy ;$$

gdzie M jest momentem gnącym wywołanym siłą P_m ;

M_1 - moment gnący wywołany siłą $= 1$, zaczepioną w punkcie poszukiwanego ugięcia, tj. w K ;

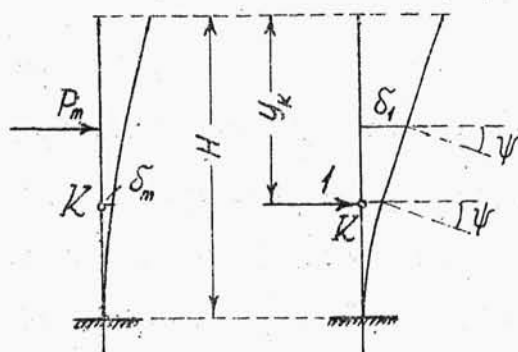
EJ - sztywność wspornika.

Wzór ten wynika z twierdzenia Bettiego, które brzmi: jeżeli na daną konstrukcję działają kolejno dwa układy sił, to praca sił I układu wzdłuż przesunięć wywołanych siłami układu II równa się pracy sił układu II wzdłuż przesunięć wywołanych przez siły układu I.

W I układzie działa jedna siła P_m , w II

- też tylko jedna siła = 1 zaczepiona w pcie K , zatem twierdzenie powyższe wyrażone będzie równaniem /rys.112/

$$1. \delta_m = P_m \cdot \delta_1 ;$$



rys. 112.

Ponieważ twierdzenie Bettiego stosuje się w statyce budowli do t.zw. "uogólnionych sił" i "uogólnionych przesunięć", więc zamiast iloczynu $P_m \cdot \delta_1$ można wstawić iloczyn $M \cdot \psi$, gdzie M jest momentem gnącym wywołanym przez siłę P_m , a ψ jest kątem obrotu przekroju w pcie K , spowodowanym działaniem siły = 1. Jak wiadomo ze statyki budowli

$$\psi = \int_H^{y_k} \frac{M_1 \cdot dy}{E \cdot J} ;$$

M_1 oznacza moment gnący wywołany siłą = 1. Granice całkowania od miejsca utwierdzenia tylko do ptu K ; wyżej kąt obrotu jest jednakowy dla wszystkich przekrojów. Ostatecznie otrzymujemy

$$\delta_m = \int_{y_k}^H \frac{M M_1}{E J} dy ;$$

Granice całkowania odwrócone /w porównaniu ze wzorem określającym ψ /, co nie wpływa na zmianę znaku, a jest zgodne z tym, że przyjęto odmierzać rzędne y od zwierciadła wody w dół.

Obliczamy teraz wielkości M i M_i . W głębokości y siła P_m wywołuje moment gnący

$$M = P_m (y - y_m);$$

zatem dla dowolnego odcinka i /rys.113/ otrzymamy

$$M_i = P_m (y_i - y_m);$$

Uwzględniając podział na odcinki Δh , można napisać

$$y_i = \Delta h \left(i - \frac{1}{2} \right);$$

$$y_m = \Delta h \left(m - \frac{1}{2} \right);$$

zatem

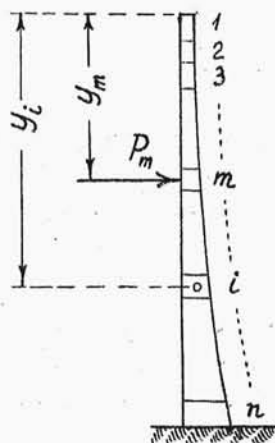
$$M_i = \Delta h \cdot (i - m) \cdot P_m;$$

Siła = 1 wywołuje momenty gnące

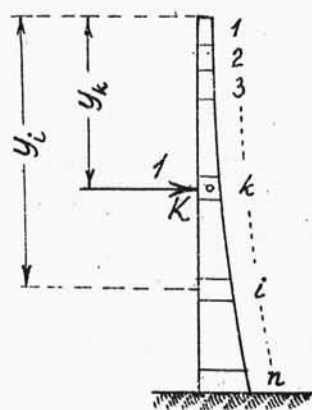
$$M_i = 0; \quad \text{powyżej ptu } K$$

$$M_i = 1 \cdot (y - y_k); \quad \text{gdy } y > y_k$$

Zatem dla odcinka i otrzymamy /rys.114/:



rys.113.



rys.114.

$$M_i = 1(y_i - y_k) = \left[\Delta h \left(i - \frac{1}{2} \right) - \Delta h \left(k - \frac{1}{2} \right) \right] = \Delta h (i - k);$$

Dochodzimy zatem do równania

$$\delta_m = \int_{y_k}^H \frac{P_m (y - y_m) \cdot (y - y_k)}{EJ} dy ;$$

uwzględniając zaś sumowanie odcinkami

$$\delta_m = \Delta h^3 \cdot \sum_{i=k}^{i=n} P_m \cdot \frac{(i-m)(i-k)}{EJ_i} ;$$

i ostatecznie szukane

$$\delta = \Delta h^3 \sum_{m=1}^{m=n} \left[P_m \cdot \sum_{i=k}^{i=n} \frac{(i-m)(i-k)}{EJ_i} \right] ;$$

k - oznacza numer odcinka, dla którego obliczamy ugięcie,

m oraz i - zmienne sumowania,

P_m - obciążenie odcinka z numerem m .

Metoda momentów wtórnych.

Obliczenie krzywej ugięcia wspornika może być też dokonane przy pomocy momentów wtórnych, znajdując ugięcie z równania

$$\delta = \frac{m}{EJ} ;$$

gdzie m oznacza moment wtórny.

Obliczenia dokonać można albo wykreślnie, albo arytmetycznie; w tym ostatnim wypadku ułatwiamy sobie pracę przez ułożenie odpowiedniego schematu obliczeń np. w formie tabeli jak w przykładzie poniższym.

Przykład.

Znajdźmy ugięcia betonowego wspornika obciążonego parciem wody i reakcją R korony. Wymiary wspornika i wielkości parcia wody podano na rys. 115. Reakcję korony przyjęto w wielkości $R = 5850$ kg, działającą w odległości $\xi = 2,00$ m od wierzchołka zapory /od zwierciadła wody/. Reakcję tę można też przedstawić w postaci parę jednostkowych ujemnych /t.zn. odwrotnie skierowanych niż parcie wody/, odciażających wspornik w części górnej na długości 3ξ /rozkład parę ujemnych jest trójkątny/.

Wspornik podzielono przekrojami 1- , 2- i 3- na jednakowe odcinki $\Delta h = 6,00$ m.

Momenty gnące, wywołane parciem wody, określają wzpry

$$M_1 = P_1 e_1 ;$$

$$M_2 = P_1 (e_1 + \Delta h) + P_2 e_2 = M_1 + P_1 \Delta h + P_2 e_2 ;$$