

właściwego zwymiarowania można dojść tylko drogą prób, przyczem najpierw należy ustalić grubość przedniej ściany.

Obliczenie ściany przedniej.

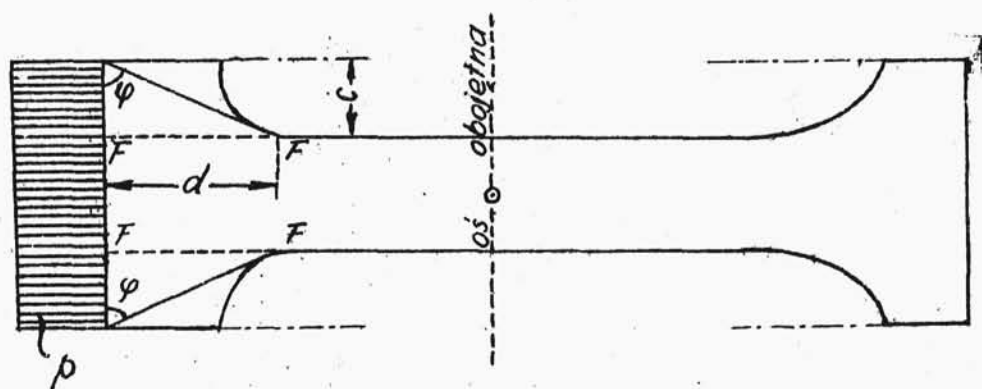
Rys.118, przedstawiający element obliczeniowy zapory, narzuca myśl, aby przednią ścianę uważać jako rozszerzenie filara, co razem z równomiernie rozłożonem obciążeniem p /parcie wody/ stwarza warunki podobne, jak w poszerzonych stopach fundamentów murów.

Obliczenie grubości ściany przedniej sprowadziłoby się wówczas do rozwiązania równania

$$\frac{M_F}{W_F} = \frac{\frac{p \cdot c^2}{2}}{\frac{d^2}{6}} \leq \sigma_{g. dop.} ;$$

gdzie M_F i W_F są odpowiednio: momentem gnącym w płaszczyźnie FF i wskaźnikiem wytrzymałości przekroju FF o "wysokości" d mierzonej wszerz zapory oraz "szerokości" l m mierzonej pionowo /t.zn. prostopadle do rysunku/,

$\sigma_{g. dop.}$ - jest dopuszczalnym naprężeniem przy zginaniu. Uwzględnia się w ten sposób wy-



rys. 118.

trzymałość betonu na rozciąganie i dlatego $\sigma_{g.dop} = \sigma_{r.dop}$, zaś dopuszczalne naprężenie przy rozciąganiu betonu wynosi $\sigma_{r.dop} = 2...3 \text{ kg/cm}^2$.

W równaniu powyższym dwie niewiadome: c i d wiąże się jeszcze dodatkowo warunkiem, że ciśnienia w betonie rozchodzą się pod $\alpha\varphi = 60^\circ$ /nasze przepisy dopuszczają $\varphi = 45^\circ$ / czyli

$$\frac{d}{c} = \operatorname{tg} 60^\circ \approx 0,6 ;$$

Wielkość c przyjmuje się narazie dowolnie. Z późniejszego sprawdzenia naprężeń ścinających w filarze okaże się, czy ta wielkość c obrana została prawidłowo.

Grubość ściany przedniej d musi być sprawdzona na ścięcie w płaszczyźnie FF' :

$$\frac{T}{A_f} = \frac{p.c}{f.d} \leq \tau_{dob.} ;$$

Założenie, że ściana przednia składa się z szeregu niepowiązanych ze sobą, tuż obok siebie ustawionych, rozszerzonych głowic filarów - daje w rezultacie zbyt duże wymiary, gdyż nie uwzględnia współpracy wszystkich przęseł ściany przedniej z powodu jej ciągłości.

Powyższe obliczenie jest jedynie uzasadnione w przęsłach dylatacyjnych, gdzie szew skurczowy poprowadzony pośrodku pomiędzy filarami przerywa ciągłość konstrukcji.

Obliczenie ściany przedniej musi się więc oprzeć na innych założeniach.

Ścianę przednią możnaby traktować jako szereg sklepień opartych na filarach, jednakże duża grubość tych sklepień każe wątpić, aby ściana pracowała rzeczywiście jak sklepienie w normalnych warunkach, szczególnie w niższych częściach zapory. Jej energia sprężysta i naprężenia zbliżają się raczej do tych stosunków, które obserwujemy w belkach. Powtóre: ciągłość konstrukcji, o której wyżej była mowa, nie może być jednak w rachunku uwzględniona. Duża grubość

filarów w stosunku do szerokości pustych miejsc nie pozwala na obliczanie odrazu całej ściany jako płyty ciągłej, lecz tylko odcinka zawartego pomiędzy filarami, jako płyty utwierdzonej na końcach/rys.119/.

Obliczenia dokonywa się na 1 m szerokości płyty /mierzonej wzwyż ściany, pionowo/. Tok obliczenia podług Rittera jest następujący.

Rozpiętość teoretyczną płyty można przyjąć

$$L = 1,05 \cdot l ;$$

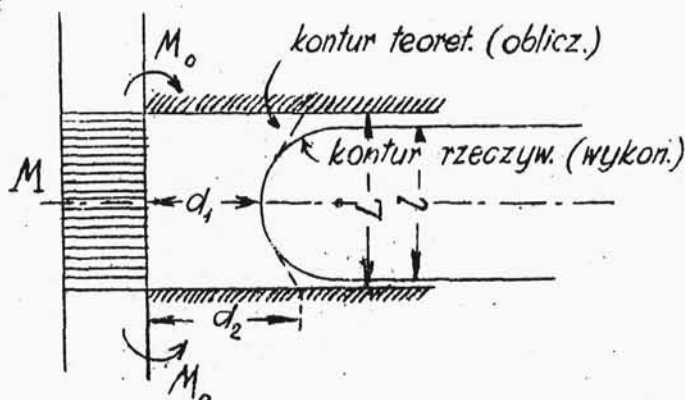
przyczem $l = 2 \cdot c ;$

Wielkości momentów gnących można wyrazić następująco:

moment gnący w środku przęsła: $M = \mu_1 \cdot p \cdot L^2 ;$

moment gnący w płaszczyźnie

teoretycznego zamocowania: $M_0 = \mu_2 \cdot p \cdot L^2 ;$



rys. 119.

Odpowiednie naprężenia:

w zworniku sklepienia

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\mu_1 \cdot p \cdot L^2}{\frac{d_1^2}{6}} = 6,62 \cdot \mu_1 \cdot p \cdot \left(\frac{l}{d_1}\right)^2;$$

w wezłowie

$$\sigma_0 = 6,62 \cdot \mu_2 \cdot p \cdot \left(\frac{l}{d_2}\right)^2;$$

Wpływ zmiany przekroju najlepiej uwidocznisz w rachunku wzorem Rittera, który moment gnący w środku belki o zmiennym przekroju, zamocowanej na końcach i obciążonej jednostajnie wyraża następująco

$$M = \frac{(3 \cdot k + r) \cdot (r + 1)}{(k + r) \cdot (r + 3)} \cdot \frac{p \cdot L^2}{24};$$

gdzie

$$k = \frac{J}{J_0} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3;$$

r - współczynnik zależny od kształtu łuku.

Przyjmując $r=2$ z dokładnością dostateczną w praktyce, wzór Rittera otrzyma postać:

$$M = \frac{1}{40} \cdot \frac{3 \cdot k + 2}{k + 2} \cdot p \cdot L^2;$$

Moment utwierdzenia można wyrazić następująco

$$M_0 = \frac{1}{8} \cdot p \cdot L^2 - M;$$

Teraz przez przyrównanie wyrażeń na M :

$$M = \frac{1}{40} \cdot \frac{3 \cdot k + 2}{k + 2} \cdot p \cdot L^2 = \mu_1 \cdot p \cdot L^2;$$

oraz wyrażen na M_0 .

$$M_0 = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{40} \cdot \frac{3 \cdot k + 2}{k + 2} \cdot p \cdot L^2 \right) = \mu_2 \cdot p \cdot L^2;$$

określamy współczynniki μ_1 i μ_2 i w ten sposób ustalamy wielkości naprężeń

$$\sigma = 0,165 \cdot \frac{3 \cdot k + 2}{k + 2} \cdot p \cdot \left(\frac{l}{d_1} \right)^2;$$

$$\sigma_0 = 0,165 \cdot \left(5 - \frac{3 \cdot k + 2}{k + 2} \right) \cdot p \cdot \left(\frac{l}{d_2} \right)^2;$$

Grubość płyty trzeba teraz tak dobrać, aby na całej wysokości zapory uzyskać zbliżone do siebie naprężenia i aby o ile możliwości $\sigma \cong \sigma_0$.

Ponieważ przy zginaniu występuje także rozciąganie, więc

$$\sigma \cong \sigma_0 \leq |\sigma_{r. dop.}|;$$

Do właściwego zwymiarowania dochodzi się drogą prób. Bezpośrednie obliczenie jest uniemożliwione zależnością k od grubości płyty.

Powyższy wywód teoretyczny jest o tyle nieusprawiedliwiony, że w rzeczywistości niema absolutnie sztywnego zamocowania płyty i rzeczywiste naprężenia w środku sklepień będą większe, a u węzłowi mniejsze od obliczonych.

Wielkości naprężeń rzeczywistych można przyjąć

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{reż.}} &= 1,2 \cdot \sigma ; \\ \sigma_o_{\text{reż.}} &= 0,9 \cdot \sigma_o ;\end{aligned}$$

Dokładne ustalenie wzorów na naprężenia, ściśle uwzględniających sposób pracy płyty, doprowadziłoby do zawiłych i długich równań, których celowość byłaby mocno wątpliwa. Nie rozchodzi się bowiem o dokładne wyznaczenie wielkości naprężeń, lecz o sprawdzenie, czy nie przekraczają one dopuszczalnych granic.

W ten sposób dochodzimy do określenia wymiarów ściany przedniej i filarów.

Wymiary ściany tylnej /od strony powietrza/ ustala się na podstawie ogólnej wymaganej kubatury muru, odejmując od niej ilości potrzebne na sklepienia i filary.

Dokładny podział materiału możliwy jest tylko drogą prób.

Naprężenia główne normalne.

Mając ustalony kształt przekroju poprzecznego zapory, oblicza się naprężenia główne, wychodząc z położenia linii ciśnień.

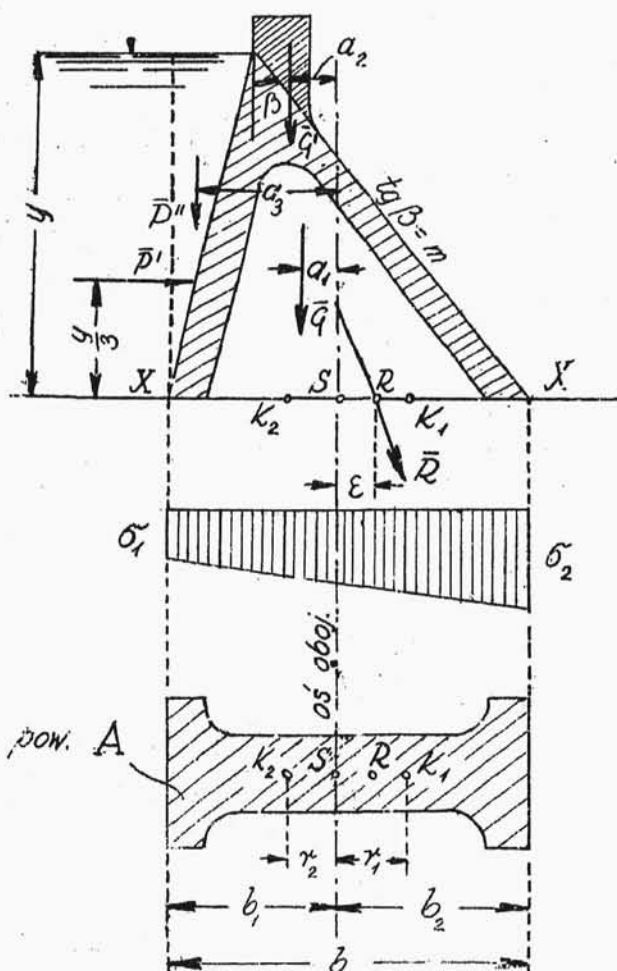
Położenie linii ciśnień w każdym przekroju określa wielkość ε /rys.120/:

$$\varepsilon = \frac{\sum M}{\sum N};$$

$\sum M = q \cdot a_1 + q' \cdot a_2 + p'' \cdot a_3 - p' \cdot \frac{y}{3}$; jest to suma momentów względem osi obojętnej wszystkich sił,

działających powyżej rozpatrywanego przekroju poziomego XX .
 $\sum N = q + q' + p''$;
 jest to suma składowych pionowych wszystkich sił, działających powyżej przekroju XX . /Porów.obliczenie analityczne zapory ciężkiej, str. 158/.

Położenie osi obojętnej przekroju musi być osobno wyznaczone wykreślnie lub analitycznie.



rys. 120.

Naprężenia na krawędziach wyniosą:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\Sigma N}{A} - \frac{\Sigma N \cdot \varepsilon}{W_1}; \\ \sigma_2 &= \frac{\Sigma N}{A} + \frac{\Sigma N \cdot \varepsilon}{W_2};\end{aligned}$$

gdzie A oznacza pole przekroju XX , zaś W_1 i W_2 jego wskaźniki wytrzymałości:

$$W_1 = \frac{J}{\delta_1}; \quad W_2 = \frac{J}{\delta_2};$$

J - moment bezwładności danego przekroju względem osi obojętnej.

W płaszczyźnie poziomej nie dopuszczamy naprężeń ujemnych, zatem linja ciśnień musi przebiegać w rdzeniu. Granice rdzenia określone są wielkościami promieni rdzenia:

$$r_1 = \frac{W_1}{A}; \quad r_2 = \frac{W_2}{A};$$

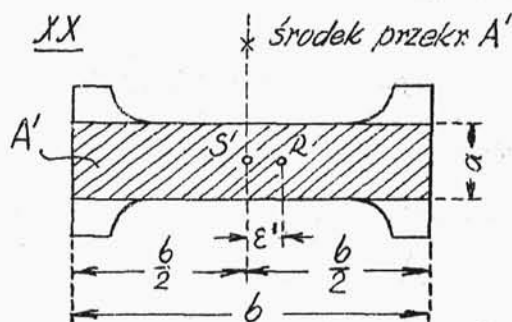
Absolutnie największe naprężenie wynosi /zbiornik pełny, krawędź od strony powietrza/:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma}{\sin^2 \beta} = (1 + m^2) \cdot \sigma_2 ;$$

Naprężenia tnące.

Przy obliczaniu naprężeń tnących lepiej nie uwzględniać całego przekroju poprzecznego podanego na rys.120, gdyż stopki belek dwuteowych biorą bar-

dzo niewielki udział
w przejmowaniu naprę-
żeń tnących. Bezpiecz-
niej jest liczyć na
ściananie jedynie pro-
stokątny przekrój fi-
lary /zakreskowane
pole $A' = a \cdot b$ na
rys. 121/.



rys. 121.

Naprężenia tnące mają wartość

$$\tau = \sigma' \cdot \operatorname{tg} \beta = m \cdot \sigma' ;$$

a największe naprężenia tnące wynoszą:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \sigma'_{\max} ;$$

/porów. oblicz. analit. zapory ciężkiej, str. 160/.

W powyższych wzorach σ' i σ'_{\max} są naprężeniami normalnymi, wywołanymi przez siły zewnętrzne w przekroju XX, lecz odniesione tylko do pola A'

$$\sigma'_1 = \frac{\sum N}{A'} - \frac{\sum N \cdot \varepsilon'}{W'} ; \quad \sigma'_2 = \frac{\sum N}{A'} + \frac{\sum N \cdot \varepsilon'}{W'} ;$$

przyczem $A' = a \cdot b$;

$$\varepsilon' = b_1 + \varepsilon - \frac{b}{2} ; \quad /porów. rys. 120/$$

$$W' = \frac{a \cdot b^2}{6} ;$$

poza

$$\sigma'_{max} = (1+m^2) \cdot \sigma' ;$$

Jeśli naprężenia tnące wypadają za duże, należy powiększyć przekrój filara t.zn. zwiększyć wymiar α kosztem wymiaru C czyli kosztem zwężenia miejsc pustych.

Wpływ temperatury.

Wpływu zmian temperatury zewnętrznej nie uwzględnia się, dając w pewnych odstępach szwy dylatacyjne. Są one umieszczone zawsze w kluczu sklepienia /porów.rys.116/. Gdyby umieścić je w osi filara, wówczas filar musiałby być ze względów konstrukcyjnych grubszy, a poza tym szew dylatacyjny narażony byłby na rozwarcie wskutek odkształceń sąsiednich sklepień.

Taksamo nie uwzględnia się wpływu ciepła, wywołującego się w czasie krzepnięcia betonu.

W zaporach ciężkich względy ekonomiczne zmuszają do szybkiego betonowania, nie czekając na ostygnięcie poprzednio wykonanych bloków. W konsekwencji "zabetonowuje się" duże ilości ciepła, powstają dodatkowe naprężenia i pęknięcia. Zapory wewnątrz puste nie przedstawiają tych niedogodności wobec dużych powierzchni, z których ciepło może się wydzielać na zewnątrz.

Wpływ wyporu.

Jak powiedziano już wyżej - wypór działa tylko pod ścianą przednią zapory. Jak daleko sięga pod filarem - tego ustalić niepodobna i przyjęcie jakiegokolwiek odległości będzie całkowicie hypotetyczne.

Wielkości i kierunki działania wyporu dostatecznie jasno przedstawione są na rys. 122. Dla uproszczenia rachunku - pola, na które działa wypór, ograniczone są prostymi.

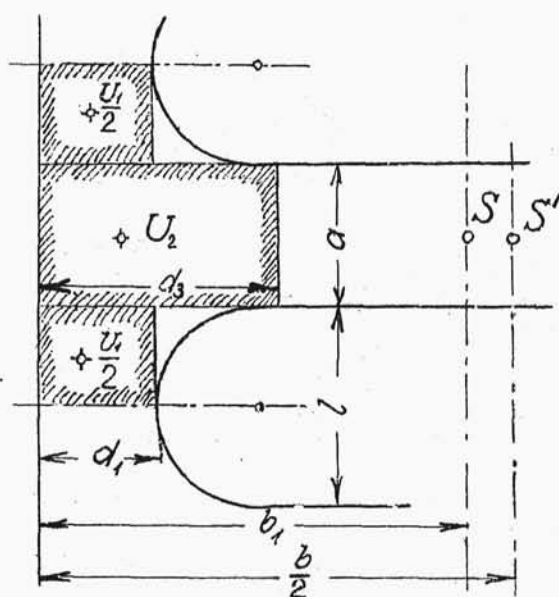
Dodatkowe naprężenia, wywołane działaniem wyporu, wyniosą na krawędziach:

$$\Delta\sigma_1 = - \left/ \frac{U_1 + U_2}{A} + \frac{U_1 \cdot u_1 + U_2 \cdot u_2}{W_1} \right/;$$

$$\Delta\sigma_2 = + \left/ \frac{U_1 + U_2}{A} - \frac{U_1 \cdot u_1 + U_2 \cdot u_2}{W_2} \right/;$$

W porównaniu z naprężeniami normalnymi - $\Delta\sigma_1$ jest zaopatrzone znakiem „-” zaś $\Delta\sigma_2$ znakiem „+”, co wynika z kierunków działania tych dodatkowych naprężeń: $\Delta\sigma_1$ jest rozciąganiem /odrywaniem zapory od podłoża/, a $\Delta\sigma_2$ przyciskaniem /porów.rys.94 i odpow.objaśn. do niego/.

Tak więc, uwzględniając wypór, naprężenia normalne wyniosą:



wypór na odcinku „l”

$$U_1 = \frac{d_1 \cdot l \cdot \gamma H}{2} ;$$

$u_1 = b_1 - \frac{d_1}{3}$

oś obojętna

wypór na odcinku „a”

$$U_2 = \frac{d_3 \cdot a \cdot \gamma H}{2}$$

$u_2 = b_1 - \frac{d_3}{3}$

rys. 122.

od strony wody: $\sigma_1 + (-\Delta\sigma_1)$; poprostu: $\sigma_1 - \Delta\sigma_1$;

od strony powietrza: $\sigma_2 + (+\Delta\sigma_2)$; poprostu: $\sigma_2 + \Delta\sigma_2$;

Wpływ wyporu na wielkość naprężeń tnących określa przyrost

$$\Delta\tau = \Delta\sigma_2' \cdot \operatorname{tg} \beta = m \cdot \Delta\sigma_2' ;$$

odniesiony tylko do pola A' ; zatem

$$\Delta\sigma_2' = \left/ \frac{U_1 + U_2}{A'} - \frac{U_1 \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d_1}{3}\right) + U_2 \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d_3}{3}\right)}{W'} \right/ ;$$

Ostatecznie, uwzględniając wypór, naprężenia tnące wyniosą $\tau + \Delta\tau$.

P r z y k ł a d l i c z b o w y .

Jako przykład obliczenia zapory ciężkiej wewnątrz pustej podane są niektóre rezultaty rachunku statyczno-wytrzymałościowego zapory na Gelmersee /Szwajcaria/, projektowanej przez ś.p. Prezydenta Rzposp. Polskiej Gabryela Narutowicza /rys.116/.

Ciężar zapory 50 m wysokiej określony został z równania równowagi /bez uwzględniania wyporu i ciężaru korony/, /rys.123/:

$$\frac{P'}{G + P''} = \operatorname{tg} \varphi$$

$\operatorname{tg} \varphi$ przyjęto = 0,7 ;