

Postęp w zastosowaniu betonu wałowanego do budowy zapór wodnych

Advancement of roller-compacted concrete in building dams

Słowa kluczowe: beton wałowany, zapory wodne

Key words: roller-compacted concrete, dams.

1. Wprowadzenie

Rozwój technologii betonu wałowanego [BW] uważa się za przełomowe osiągnięcie w budowie zapór wodnych (1). Zastosowanie tej technologii do budowy zapór wodnych i związanych z nimi konstrukcji zdobyło w niedługim czasie akceptację na całym świecie ze względu na dużą wydajność, co pociągnęło za sobą skrócenie czasu budowy nowych zapór. BW zaczęto także stosować w projektach związanych z odnawianiem zapór, zabezpieczeniami nabrzeży zapór, nowymi kanałami przelewowymi do modyfikacji tych kanałów i stabilizacji fundamentów zapór.

Technologia betonu wałowanego została po raz pierwszy zastosowana z początkiem lat osiemdziesiątych do budowy zapór Shimajigawa w Japonii i Willow Creek w USA. Zapora Upper Stillwater w Stanach Zjednoczonych, której budowę zakończono w 1987 roku była pierwszą dużą konstrukcją z betonu wałowanego [rysunek 1]. Od tej pory do roku 1991 technologia ta objęła 60 zakończonych konstrukcji i około 750 projektów zakończonych lub w trakcie realizacji w 58 krajach. Większość zapór z betonu wałowanego – prawie 50% – znajduje się w Azji, a Chiny są liderem w tej dziedzinie. Brazylia, Stany Zjednoczone i Japonia, w każdym z tych krajów znajduje się po około 50 zapór z betonu

1. Introduction

The development of roller-compacted concrete (RCC) technology is considered to be a significant breakthrough in the construction of dams (1). The use of RCC has gained widespread acceptance worldwide in a short period of time in applications for dams and dam-associated structures because of its high efficiency and because its use leads to a shorter time of construction of new dams. RCC has also been used for dam rehabilitation projects, overtopping protection for embankment dams, new spillways, spillway modifications, and foundation stabilization for buttress dams.

RCC technology originated in the early 1980s with the construction of Shimajigawa Dam in Japan and Willow Creek Dam in the United States. Completed in 1987, Upper Stillwater Dam in the United States was the first large-volume RCC construction project (Figure 1). Since then, the technology has spread from 60 completed RCC dams in 1991 to about 750 RCC dam projects completed or currently under construction in 58 countries. The majority of RCC dams (nearly 50 percent) are located in Asia, with China being the world leader. Brazil, the United States, and Japan each have about 50 RCC dams (2). In Europe, Spain leads the way with 27 RCC completed dams (3), followed by Greece with 8, and lesser



Rys. 1. Widok z powietrza i czoło zapory z odpływem w przypadku zapory Upper Stillwater

Fig. 1. Aerial view and downstream face of Upper Stillwater Dam

wałowanego (2). W Europie przoduje Hiszpania z 27 zaporami z BW oraz Grecja, gdzie zapór takich wzniesiono 8. Technologię BW zastosowano także do budowy zapór we Francji, Rumunii, Rosji, Kazachstanie, Portugalii i Serbii.

Postęp w technologii betonu wałowanego obrazuje zaporą Gibe III w Etiopii – najwyższą na świecie o wysokości 243 metry, a uzupełnia ją zaporą łukowa Wanjiakouzi w Chinach o wysokości 160 m. Większość zapór z betonu wałowanego stanowią masywne zapory z osią biegnącą prostoliniowo w poprzek doliny. Jednak coraz częściej są budowane łukowe zapory z zastosowaniem betonu wałowanego. Zapory łukowe rozpoczęto budować w Południowej Afryce, a były nimi zapory Wolwedans i Knellpoort zbudowane w latach 1989-1990, natomiast ostatnio powstały: zaporą łukową Changuinola w Panamie o wysokości 105 metrów oraz Shapai o wysokości 130 m w Chinach.

W artykule przedstawiono historię rozwoju technologii betonu wałowanego w zastosowaniu do budowy zapór, a także przegląd korzyści związanych z jej stosowaniem.

2. Technologia betonu wałowanego

Ogólnie technologia betonu wałowanego polega na stosowaniu mieszanki betonowej o bardzo gęstej konsystencji (spoza zakresu dla mieszanek zwykłych), którą po ułożeniu we wcześniej przygotowanym wykopie zagęszcza się za pomocą samojezdnego walca wibracyjnego. Według terminologii stosowanej przez Amerykański Instytut Betonu (ACI) beton wałowany to „beton zagęszczany przy użyciu walca; beton, który przed stwardnieniem będzie wytrzymał nacisk ciężaru walca w trakcie zagęszczania”.

BW stanowi nowe materiałowe rozwiązanie stosowane przy budowie zapór. Technologia ta pozwala na układanie kolejnych warstw betonu bezpośrednio po zagęszczeniu poprzedzającej warstwy, zapewniając tym samym ciągłość procesu budowlanego. Główną różnicę pomiędzy konwencjonalnym betonem a wałowanym stanowi jego konsystencja i metoda zagęszczania. Wewnętrzne zagęszczanie za pomocą wibratorów pogrążanych stosowanych do zagęszczania konwencjonalnych betonów różni się zasadniczo od zewnętrznego zagęszczania przy stosowaniu urządzeń do układania warstw BW i walców wibracyjnych do jego zagęszczania. Ze względu na technikę zagęszczania, mieszanka betonu wałowanego ma znacznie bardziej gęstą konsystencję niż mieszanki konwencjonalne.

3. Historia rozwoju zapór wodnych z betonu wałowanego

Wizjonerskie podejście

Wracając do historii trzeba przypomnieć, że Homer M. Hadley ze Stowarzyszenia „Portland Cement Association” w artykule z 1941 roku, opublikowanym w Materiałach Konferencji ASCE (5) zdefiniował ideę betonu wałowanego. W dyskusji z 1939 roku,

numbers in France, Romania, Russia, Kazakhstan, Portugal and in Serbia.

The advancements made in RCC technology can be illustrated by the 243-meter-high Gibe III Dam in Ethiopia (the highest dam in the world) and completion of the 160-meter-high RCC arch dam (Wanjiakouzi Dam) in China. The majority of RCC dams are gravity dams with a straight axis across the valley. However, more and more curved dams are being constructed using the RCC technique. RCC arch dams were initiated in South Africa with construction of Wolwedans Dam and Knellpoort Dam in 1989/90s but recently has gained considerable attention with completion of the 105-meter-high thick arch dam (Changuinola 1 Dam) in Panama and the 130-meter-high Shapai Dam in China.

In this paper, a historical development of RCC technology for dams is presented together with an overview of the benefits of using RCC during construction of dams.

2. Definition of RCC

In general, RCC can be described as a concrete material of no-slump consistency that is placed by earthfill methods and compacted by a vibratory roller in horizontal lifts. In American Concrete Institute terminology, RCC is defined as “concrete compacted by roller compaction; concrete that, in its unhardened state, will support a roller while being compacted.”

RCC for dams is more than just a new material. It is also a new construction method where subsequent lifts can be placed immediately after compaction of the previous lift, maintaining continuity of the construction process. The principal difference between conventional mass concrete and RCC is the mixture consistency and the method of compaction. Internal compaction using immersion-type vibrators is used for conventional concrete, while external compaction with spreading equipment and vibratory rollers is used for RCC. RCC has a drier consistency than conventional slump concrete.

3. Historical Developments of RCC Dams

Visionary Concept

Going back in history, an article by Homer M. Hadley (a Portland Cement Association engineer) in the 1941 ASCE Proceedings (5) had the RCC concept pretty well identified. In his discussion to a 1939 Masonry Dams Symposium, he presented an idea of a “concrete fill” dam, which today could be called an original concept of a RCC dam. The “concrete fill” dam was portrayed as “... a heavy gravity section constructed of lean concrete to be built from the bottom up in a single mass, layer upon layer, in the same manner that rolled-fill dams are built, with impermeability and durability provided at the surfaces of exposure.”

Hadley described the dam material: “For the main body of the dam a lean, damp, almost dry concrete would be used – 0.50

w czasie Sympozjum dotyczącym zapór betonowych, wysunął koncepcję zapory betonowej, którą dzisiaj można nazwać oryginalną technologią budowy zapory z betonu wałowanego. Wykonaną w ten sposób zapórę opisał następująco: „masywny ciężki przekrój z chudego betonu zbudowany na całej wysokości jako monolit, warstwa na warstwie, w taki sam sposób, w jaki buduje się układane warstwowo zapory zapewniające nieprzepuszczalność i trwałość zewnętrznej powierzchni narażonej na oddziaływania zewnętrzne”.

Hadley zdefiniował tworzywo, z którego zbudowana jest zapora następująco: „Główny trzon zapory jest złożony z chudego, wilgotnego, prawie suchego betonu zawierającego 112 do 134 kg/m³ cementu, z dodatkiem pyłów. Powinno ono być układane cienkimi warstwami i wibrowane buldożerem, pracującym na górnej powierzchni zapory, która została już ułożona oraz pielęgnowana przez zraszanie, a następnie polewanie wodą, w miarę jak postępuje betonowanie. W związku z małą zawartością cementu beton ten osiąga wytrzymałość od około 14 do około 17 MPa po kilku miesiącach. Dzięki małej zawartości cementu ilość wydzielanego ciepła hydratacji jest znacznie mniejsza i stanowi od połowy do dwóch trzecich ciepła hydratacji zwykłego betonu. Z tego samego powodu beton podlegał będzie znacznie mniejszym zmianom objętości. Jego moduł sprężystości będzie także mniejszy, w związku z czym beton taki będzie lepiej przystosowywał się do nieznacznego osiadania fundamentów”(5).

Nieprzepuszczalność i trwałość betonu wałowanego Hadley opisywał następująco (5): „na dolnej ścianie odpływowej strefa lub warstwa bardziej odporna na wpływy otoczenia i integralnie połączona z główną masą betonu będzie zabezpieczona ...Na górnej ścianie odpływowej będzie znajdować się tama zatrzymująca wodę dla całej zapory. ...będzie zabezpieczona zbrojoną płytą z odpowiednio bogatego i nieprzepuszczalnego betonu...”

Wizja oryginalnej koncepcji BW przedstawiona przez Hadleya znacznie wyprzedzała poglądy z tamtych czasów i musiał czekać kilka dekad aby zobaczyć jej zastosowanie. Materiały z Sympozjum w roku 1939 nie wywołały żadnych komentarzy. Wydaje się, że nikt nie zareagował na poglądy z tamtych czasów, w których zapory betonowe traciły na popularności w stosunku do ziemnych i skalnych, które można było wznosić znacznie szybciej.

Wczesne stadium rozwoju betonu wałowanego

Przygotowana przez Malcolma Dunstana (2) lista zapór zbudowanych na świecie pokazuje, że w Kazachstanie w roku 1963 wzniesiono zapórę z betonu wałowanego. Oczywiście, nie wzbudziło to żadnego zainteresowania prasy technicznej w tym czasie. Natomiast, najbardziej znany przykład wcześniej zbudowanej zapory, w której wykorzystano większość rozwiązań zapory z betonu wałowanego, była zbudowana we Włoszech w roku 1964 zapora Alpe Gera o wysokości 172 m. Została ona zaprojektowana przez inżyniera Giulio Gentile, a największy postęp stanowiło zastosowanie chudego betonu, o małej zawartości cementu, układanego w wykopach ziemnych. Zamiast budować zapórę w pionowych deskowaniach, zastosowano układanie betonu poziomymi warstwami

to 0.60 bbl [Note: 112 to 134 kg/m³] cement supplemented with fines. This would be spread in thin layers and vibrated by bulldozers operating over the top surface of the dam as it was built up, sprinkling and watering curing following as the work advanced over successive areas. By its low cement content such concrete, developing 2,000 lb to 2,500 lb [Note: 13.8 MPa to 17.2 MPa] strength in a few months, would automatically generate but one half to two thirds the heat of ordinary dam concrete and would have a corresponding reduced tendency to volume change from that cause. Its modulus of elasticity likewise would be low, and therefore such concrete would better accommodate itself to slight settlements and adjustment of foundations” (5).

Impermeability and durability were addressed by Hadley: “for the downstream face a zone or layer of richer weather-resistant concrete integral with the main mass would be provided. ... At the upstream face would be located the water stopping for the entire dam. ...there would be provided a reinforced facing slab of suitably rich, impermeable concrete...” (5).

The great vision of the original concept of RCC presented by Hadley was ahead of its time, and he had to wait several decades to see it implemented. There were no written closing comments to his discussion to the 1939 symposium proceedings. It seems that no one reacted to the idea at the time that concrete dams were losing in popularity to earth and rock-fill dams because the latter could be built so much faster.

Early Stage of RCC Development

The 2017 list of RCC dams built worldwide prepared by Malcolm Dunstan (2) shows that Kazakhstan had an “RCC dam” built in 1963. Obviously, this project did not receive any attention in the engineering press at the time. However, the most notable example of an early major dam built using most of the RCC dam concept was the 172-meter-high Alpe Gera Dam in Italy, constructed in 1964. Designed by structural engineer Giulio Gentile, the greatest step forward was placing the lean (low-cementitious) concrete using earthfill construction methods. Rather than building the dam in vertical lifts, horizontal placement in of 0.7-meter-thick layers was introduced from one abutment to another at time intervals of several hours. Dump trucks delivered the concrete to the dam, and consolidation was by internal vibration. Side forms were eliminated, as were coils for cooling the concrete. Vertical joints were cut while the concrete had not yet hardened. Considering the type of concrete and the great number of horizontal joints, a steel facing at the upstream side was provided to maintain water impermeability of the structure. The only thing that kept Alpe Gera Dam from being called the first real RCC dam was the lack of vibratory roller compaction (1).

Evolution of RCC

Starting in the 1970s, the design of RCC dams was evolving in three different directions. First, the U.S. Army Corps of Engineers developed a lean-concrete approach for RCC dams. Second, the concept of a high-cementitious RCC mix with a low portland-

o grubości 0,7 metra w odstępach kilku godzin. Samochody wywrotki dostarczały beton do zapory, a jego zagęszczanie odbywało się za pomocą wewnętrznej wibracji (wibratorami pograżalnymi). Nie stosowano bocznych szalunków. Nie stosowano także chłodzenia betonu. Dylatacje pionowe nacinano kiedy jeszcze beton nie stwardniał. Biorąc pod uwagę rodzaj betonu i dużą liczbę dylatacji poziomych zastosowano stalowe okładziny od strony wypływu wody w celu zapewnienia szczelności konstrukcji. Jedyną różnicą, która nie pozwalała nazwać zapory Alpe Gera pierwszą prawdziwą zaporą z betonu wałowanego był brak zagęszczania betonu walcami wibracyjnymi (1).

Rozwój betonu wałowanego

Poczynając od lat siedemdziesiątych projektowanie zapór z betonu wałowanego rozwijało się w trzech różnych kierunkach. Najpierw, Wojskowy Korpus Inżynierów w Stanach Zjednoczonych opracował koncepcję zastosowania chudego betonu do budowy zapór z BW. Następnie władze Doliny Tennessee wysunęły koncepcję mieszanki betonu wałowanego o dużej zawartości spoiwa uboższego w cement portlandzki, a o dużej zawartości popiołu lotnego. Koncepcję tę rozwinięto później w Zjednoczonym Królestwie. Równolegle, trzecie rozwiązanie, w postaci tak zwanej „zapory zagęszczanej walcem” było rozwijane w Japonii (1).

Nowa, szybka metoda budowy zapór nie wywołała dużego zainteresowania aż do roku 1980, w którym Japońskie Ministerstwo Budownictwa zastosowało tę metodę do budowy wysokiej na 89 metrów zapory Shimajigawa. Zapora ta była pierwszą zaporą na świecie, w której BW był układany z wykorzystaniem buldożerów, a następnie zagęszczany walcami wibracyjnymi. Zapory zagęszczane walcem są odróżniane od zapór z betonu wałowanego gdyż występują pewne różnice w filozofii projektowania i samej budowy.

Zapora Willow Creek zbudowana w roku 1982 przez Wojskowy Korpus Inżynierów w Stanach Zjednoczonych była pierwszą zaporą o konstrukcji wyłącznie z BW i w pełni wykorzystującej metodę układania betonu w wykopach ziemnych. Całkowitą objętość chudego betonu wynoszącą 331000 m³ rozścielano za pomocą przenośnika zgrzeblowego, a następnie zagęszczano walcami wibracyjnymi. Całość prac wykonano w okresie krótszym od 5 miesięcy.

Intensywne badania laboratoryjne i próby polowe w Anglii spowodowały rozwój betonu o dużej zawartości spoiwa [mało cementu a dużo pucolany], a także sterowanej laserowo ślizgowej metody poziomego formowania elementów nawierzchni czołowych (licowych). Zostało to wdrożone po raz pierwszy przez Bureau of Reclamation w projekcie zapory Upper Stillwater w Utah, w roku 1987 (1, 4). Zapora, na którą zużyto 1040000 m³ BW i 116000 m³ konwencjonalnego betonu, została zbudowana w ciągu 10 miesięcy, jednak budowa ciągnęła się przez trzy lata z powodu trudnego klimatu.

Obecne kierunki

Zdobyte doświadczenie w zakresie technologii BW i rosnące do

-cement and high fly-ash content was initiated by the Tennessee Valley Authority and then advanced in the United Kingdom. Parallel, a third approach, a so-called roller-compacted dam (RCD), was developed in Japan (1).

The new rapid method of dam construction did not receive much attention until 1980, when the Japanese Ministry of Construction completed 89-meter-high Shimajigawa Dam using RCD technology. Shimajigawa Dam was the world's first dam in which RCC was spread using bulldozers and then compacted by vibratory rollers. RCDs are distinguished from RCC dams because of some differences in the design and construction philosophy.

Willow Creek, completed in 1982 by the U.S. Army Corps of Engineers, was the first dam constructed entirely of RCC fully utilizing earthfill methods of construction. A total of 331,000 m³ of lean concrete was spread at the dam site by scrapers and then compacted by vibratory rollers, all in less than 5 months.

Extensive laboratory research and field testing in England resulted in the development of a high-cementitious (low cement, high pozzolan) content concrete as well as a laser-guided, horizontal slip-forming system for facing elements. This was first implemented at the Bureau of Reclamation project, Upper Stillwater Dam in Utah, in 1987 (1, 4). The dam, with 1,040,000 m³ of RCC and 116,000 m³ of conventional concrete, was completed in 10 months spread over a 3-year period because of the harsh climate.

Current Trends

Confidence and experience with RCC technology allows designers to build large dams. In 1990, there was only one 100-meter-high RCC dam, but in 2017, the number increased to 131, including 4 dams over 200 meters high. Although the history of modern RCC dam construction has already spanned over 30 years, the technology continues to dynamically develop. A better understanding of RCC dam behaviors, laboratory testing results, and in-field observations lead to conclusions that improved performance can be obtained by using high-cementitious contents in the RCC (3, 6).

4. RCC Mixes

The materials used for RCC mixes are much the same as those used in conventional mass concrete: fine and coarse aggregates, water, cementitious materials (cement and pozzolan), and admixtures. The grading and quantity components in RCC mixtures may vary from those in conventional concrete. The water content of RCC mixtures is about 10 to 20 percent less than for most conventional mass concrete mixtures. The maximum size aggregate has evolved toward 50 to 60 mm for crushed aggregate and about 40 to 50 mm for natural gravel to reduce potential segregation of the fresh concrete. The use of retarders allows for extended time between placements of consecutive RCC lifts, which is especially beneficial in hot climates.

In general, RCC mixes are classified based on their cementitious material content: low-cementitious, medium-cementitious, and

niej zaufanie umożliwiły budowę dużych zapór. W 1990 zbudowano tylko jedną zapórę w technologii BW o wysokości 100 m, jednak w 2017 ta liczba wzrosła do 131, w tym 4 zapory o wysokości przekraczającej 200 m. Pomimo, że historia nowoczesnych zapór z BW obejmuje już okres ponad 30 lat, technologia ta rozwija się w dalszym ciągu żywiołowo. Lepsze zrozumienie właściwości zapór z betonu wałowanego, wyniki badań laboratoryjnych i doświadczenia polowe prowadzą do wniosku, że lepsze wyniki można uzyskać stosując beton wałowany o większej zawartości spoiwa (3, 6).

4. Mieszanki BW

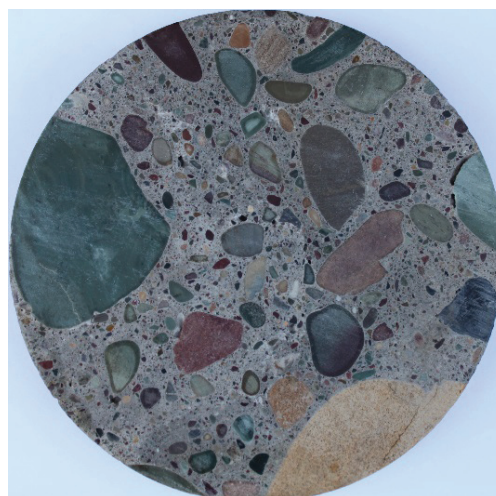
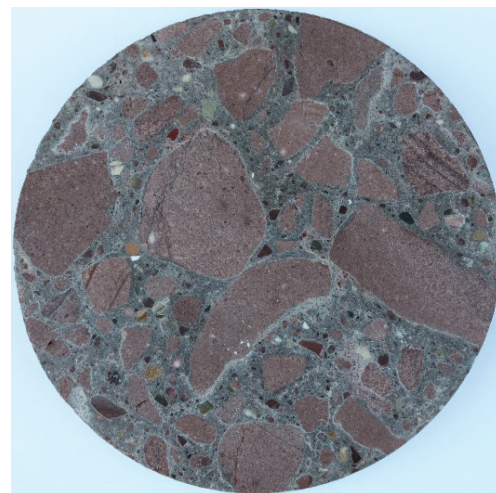
Materiały stosowane w mieszankach BW są przeważnie takie same jak w konwencjonalnym betonie: drobne i grube kruszywo, woda, spoiwo [cement i pucolana] oraz domieszki. Uziarnienie i zawartość składników w mieszankach BW mogą być różne niż w konwencjonalnych betonach. Zawartość wody jest w mieszankach BW mniejsza od ok. 10% do około 20% niż w większości betonów konwencjonalnych. Ze względu na konieczność ograniczenia tendencji do segregacji, maksymalny wymiar kruszywa ewoluuje do około 50 do 60 mm w przypadku kruszyw łamanych i od 40 do 50 mm dla żwirów. Stosowanie domieszek opóźniających wiązanie pozwala na zwiększenie czasu między układaniem kolejnych warstw, co jest szczególnie korzystne w ciepłym klimacie.

W zasadzie, mieszanki BW klasyfikuje się w oparciu o zawartość spoiwa: o małej, średniej i dużej jego zawartości, które w tych mieszankach wynoszą odpowiednio: mniej niż 100 kg/m^3 , od 100 do 150 kg/m^3 oraz więcej od 150 kg/m^3 (4). Jednak, nowoczesne mieszanki betonowe, o bardzo dużym opóźnieniu wiązania, w celu uzyskania wystarczająco długiego okresu poprawnej urabialności, wymagają dużej zawartości spoiwa, przekraczającej 190 kg/m^3 (6).

Pojawiły się dwie niezależne koncepcje metod projektowania mieszanki BW: [1] podejście „gruntowe” i [2] podejście „betonowe” (1). W podejściu „gruntowym”, beton wałowany rozważa się jako grunt wzbogacony cementem, z łamanym kruszywem, w którym projektowanie mieszanki opiera się na zależnościach wilgotność – gęstość. W układzie tym zaczyn cementowy tylko częściowo wypełnia pustki w stosie okruszowym kruszywa. Podejście „betonowe” opiera się na koncepcji, że w mieszance BW jest dosyć zaczynu do wypełnienia wszystkich pustek w stosie okruszowym, czyniąc mieszankę w pełni nasyconą zaczynem cementowym. Jednak obie koncepcje spowodują otrzymanie betonu o bardzo gęstej konsystencji.

Właściwości betonu wałowanego

Typowy zakres stopni konsystencji określanych metodą VeBe dla mieszanek BW przypada w zakresie od około 8 do 40 sekund, przy czym większość mieszanek BW ma konsystencję VeBe, badaną według ASTM C1170, mniejszą od 25 s. Mieszanki z BW o konsystencji VeBe zawartej pomiędzy 15 a 20 s mają wystarczającą urabialność pozwalającą na zagęszczanie w warstwach 300 mm,



Rys. 2. Odwierty o średnicy 150 mm betonu wałowanego z zapory Upper Stillwater Dam [na górze] i konwencjonalnego betonu z zapory Hoovera [na dole]

Fig. 2. 150-mm-diameter cores – RCC at Upper Stillwater Dam [upper] and conventional mass concrete at Hoover Dam [lower]

high-cementitious RCC mixes with the cementitious material content less than 100 kg/m^3 , between 100 and 150 kg/m^3 , and exceeding 150 kg/m^3 , respectively (4). However, modern super-retarded, high-cementitious RCC requires a cementitious content exceeding 190 kg/m^3 in order to produce sufficient paste for high workability (6).

Two separate philosophies emerged with respect to RCC mix design methods: (1) the soil approach and (2) the concrete approach (1). In the soil approach, RCC is considered as cement enriched, with processed aggregates having a mix design based on moisture-density relationships in which the paste only partially fills the voids in the aggregate. The concrete approach is based on the concept that there is sufficient paste in the RCC mix to fill all the voids in the aggregate, making the mixture fully cemented. However, both philosophies will produce a no-slump concrete.

Properties of RCC

A typical range of Vebe consistency times for RCC mixtures is from about 8 to 40 seconds, with most RCC mixtures having

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY MIESZANEK BW ZASTOSOWANYCH W DWÓCH ZAPORACH W USA (1)

MIXTURE PROPORTIONS OF SOME RCC DAMS (1)

Zapora Dam	NMRK* NMSA (mm)	Zawartość powietrza Air,%	Quantities (kg/m ³)					Gęstość Density, kg/m ³	Plastyfikator Water reducing admixture, cm ³ /m ³
			Woda Water	Cement	Pucolana Pozzolan	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate		
Upper Stillwater	50	1.5	99	79	173	682	1316	2349	9
	50	1.5	100	93	206	682	1264	2345	12
Willow Creek	75	1.2	110	104	0	657	1958	2529	-
	75	1.2	110	104	47	645	1625	2531	-
	75	1.2	107	47	19	666	1681	1438	-
	37.5	1.2	109	187	80	825	1238	1438	-

*Nominalny Maksymalny Rozmiar Kruszywa / Nominal Maximum Size of Aggregates

po około czterech do ośmiu przejść 10 tonowego podwójnego walca wibracyjnego.

Jedną z największych trudności napotykaną przy układaniu mieszanki BW jest tendencja grubego kruszywa do segregacji. Segregacja powoduje słabe powiązanie kolejnych warstw BW, wprowadza pustki między ziarnami kruszywa i może prowadzić do nadmiernych przecieków pomiędzy warstwami betonu. Segregacja występuje najczęściej w mieszankach które są zbyt suche, zawierają kruszywa grube, lub są źle transportowane i układane.

Zawartość materiału wiążącego wpływa na końcowy przyrost wytrzymałości betonu wałowanego oraz wytrzymałość połączeń pomiędzy jego warstwami. Mieszanki z większą zawartością materiału wiążącego, w przypadku stałych innych składników w tym wody, mają większą wytrzymałość. Chude mieszanki BW, nawet jeśli spełniają wymagania odnośnie do wytrzymałości na ściskanie, to wykazują małą albo nawet zerową wytrzymałość połączeń pomiędzy warstwami, zarówno na ścinanie jak i na rozciąganie.

Właściwości cieplne betonu wałowanego są związane przede wszystkim z właściwościami termicznymi kruszywa oraz z całkowitą zawartością materiału wiążącego. Większa zawartość materiału wiążącego powoduje zwiększenie ilości ciepła wydzielanego w betonowanym masywie, a co za tym idzie możliwość wystąpienia potencjalnych zmian liniowych.

5. Konstrukcja zapór z betonu wałowanego

Planowanie i organizacja budowy zapory z BW różni się od planowania i organizacji budowy zapory z betonu tradycyjnego. Wznoszenie zapory z betonu wałowanego wiąże się z układaniem poziomych, cienkich warstw mieszanki betonowej z zastosowaniem maszyn do rozkładania mieszanki i jej zagęszczania. Jest to technologia pozwalająca na zmniejszenie robocizny w porównaniu do tradycyjnego pionowego szalowania elementów, wykonywania złączy i ich zagęszczania przez wibrację. W procesie realizacji zapory wykonywanej z BW można rozróżnić następujące etapy:

a Vebe consistency ASTM C1170 test of less than 25 seconds. RCC mixtures with a Vebe time in the range of 15 to 20 seconds will have sufficient workability to be consolidated in 300-mm lifts with approximately four to eight passes of a 10-ton, dual-drum, vibrating roller.

One of the largest difficulties faced when placing fresh RCC is the potential for coarse aggregate segregation. Segregation leads to a poor bond between subsequent lifts of RCC, introduces voids between aggregates, and may result in excessive seepage between lifts. Segregation is most often observed in mixtures that are too dry, contain large aggregates, or are poorly handled and placed.

The cementitious materials content influences the ultimate strength gain of RCC and the bond (cohesion) strength between lifts of RCC. Mixtures with a higher total cementitious materials content have higher strengths for a given material and water content. Lean RCC mixtures may meet minimum compressive strength requirements but exhibit low or no bond strength in either shear or tension at the lift lines.

Thermal properties of RCC are primarily associated with the thermal properties of the aggregates and the total cementitious materials content. A higher total cementitious materials content increases the heat of hydration generated within the mass, resulting in higher volumetric change potential of the mass concrete.

5. Construction of RCC Dams

Planning and logistics for construction of RCC dams are different from those of conventional concrete dams. RCC construction involves placing thin horizontal layers using mechanized equipment for spreading and compacting. It is less labor intensive when compared to traditional vertical block construction for raising formwork, joint preparation, and consolidating conventional concrete with immersion vibration. The overall construction process could be defined in the following phases:

- Przygotowanie kruszywa i produkcja mieszanki betonu wałowanego. Jednym z najważniejszych warunków udanej realizacji inwestycji jest zapewnienie dostaw kruszyw o stałej wilgotności, potrzebnych do ciągłej produkcji mieszanki betonowej. Odpowiednie zapasy kruszywa na składowiskach i odpowiednia lokalizacja węzła betoniarskiego mają większe znaczenie dla budowy zapory z betonu wałowanego, niż w przypadku betonu zwykłego.
- Transport i układanie mieszanki. Najczęściej stosowaną metodą transportu mieszanki BW z betoniarni na plac budowy jest transport samochodami ciężarowymi – taką metodę stosowano podczas budowy ponad 50% istniejących zapór. Drugim najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest transport mieszanki za pomocą przenośników taśmowych lub kombinacji przenośników taśmowych i samochodów ciężarowych.
- Rozścielanie mieszanki. Powszechną metodą rozścielania mieszanki BW jest zastosowanie spychaczy. Stosuje się również z powodzeniem rozścielanie za pomocą układów monitorowanych lub sterowanych laserowo. Powszechną praktyką jest układanie warstwy mieszanki o małej zwartości, która zapewnia uzyskanie końcowej zagęszczonej warstwy o grubości 0,3 m.
- Zagęszczanie mieszanki BW jest najważniejszą operacją niezbędną do uzyskania odpowiedniej wytrzymałości i gęstości betonu. W przypadku typowej mieszanki BW odpowiednie zagęszczenie uzyskuje się zwykle po czterech do sześciu przejazdach 10-tonowego walca wibracyjnego z gładkimi walcami. W miejscach niedostępnych dla dużego walca stosuje się walce mniejsze.

Proces produkcji mieszanki, jej transportu, rozścielania, zagęszczania w przypadku betonu wałowanego powinno się prowadzić możliwie szybko. Dla mieszanek z betonu wałowanego bez dodatków pucolanowych cały proces powinien mieścić się w czasie 30 minut, licząc od zmieszania spoiwa z wodą zarobową. Czas ten powinien być określony przed betonowaniem, z uwzględnieniem temperatury, wilgotności, siły wiatru i nasłonecznienia panujących w czasie betonowania. Czas ten może być wydłużony dla mieszanek z dużą zawartością pucolan, lub gdy stosuje się domieszki opóźniające wiązanie. Ogólnie można wyróżnić trzy rodzaje zapewnienia dobrych połączeń kolejnych warstw betonu:

Łączenie warstw typu „Hot joint” polega na układaniu nowej warstwy BW zanim spoiwo w poprzedniej warstwie osiągnie początek wiązania. W tym przypadku przed ułożeniem nowej warstwy zaleca się oczyszczanie powierzchni z luźnych kawałków betonu oraz wody wolnej za pomocą urządzenia typu odkurzacz.

W przypadku łączenia typu „Cold joint” kolejna warstwa betonu jest układana na poprzedniej w czasie pomiędzy początkiem a końcem wiązania spoiwa w pierwszej z nich. Wykonywanie łączenia typu „Cold joint” powinno być poprzedzone czyszczeniem za pomocą nadmuchu powietrza lub natrysku mieszaniny wody z powietrzem w celu usunięcia resztek wody oraz luźnych lub uszkodzonych okruchów betonu. W przypadku stosowania zaprawy mającej

- Aggregate preparation and RCC mix production – One of the most important requirements for successful RCC dam construction is to maintain a supply of aggregates with consistent moisture content for continuous production. Sufficient aggregate stockpiling and the location of a concrete plant is more important for an RCC dam than for a conventional concrete dam.
- Transportation and placing – The most popular method of transporting RCC from the concrete plant to the point of placement is using trucks (at over 50 percent of completed dam projects), and the second most popular method is using conveyors or combinations of trucks and conveyor systems.
- Spreading – The common method of spreading RCC is by dozer. Laser-monitored and/or laser-controlled systems for grade control have been used successfully on many projects. A common practice is spreading the loose lift thickness required to produce a desired final lift thickness (usually 0.3 meter) after compaction.
- Compaction – Compaction of RCC is crucial to obtaining the required strength and density. When a mix design based on the concrete approach is used, adequate compaction can generally be obtained in four to six passes with a 10-ton, smooth drum, vibratory roller. In areas inaccessible to the primary compaction roller, smaller equipment is used.
- Lift lines – The process of mixing, transporting, placing, spreading and compacting RCC should be accomplished as rapidly as possible. For RCC mixes with no pozzolan, the entire process should be accomplished within 30 minutes after the mix water contacts the cementitious material or as determined prior to construction based on the anticipated temperature, humidity, and wind and sun exposure. The time can be extended for mixes with large contents of pozzolan or when retarders are used. In general, there are three types of joint treatments associated with the time between RCC placement of subsequent lifts:

Hot joint (or fresh joint) – A hot joint occurs when a new RCC lift is placed before the concrete of the previously placed lift has reached its initial set. For hot joints, a standard cleanup treatment is specified, which generally consists of removing loose materials and free water using approved vacuum equipment.

Cold joint – A cold joint occurs after the initial set and before the final set of the concrete in the previous lift. For cold joints, the treatment consists of cleaning, by air jetting or airwater jetting, to completely remove laitance and loose or defective concrete, followed by air jetting and vacuuming to remove any water or remaining loose materials. Bonding mortar may be specified based on design requirements.

Construction joint – occurs after the final set occurs of the concrete in the previous lift. Treatment of the construction joints is necessary, which includes high-pressure water jetting or wet sandblasting to expose aggregate, followed by mechanical broom and vacuuming of the entire surface to remove laitance, standing water or loose materials, and applying bonding mortar.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE POŁĄCZEŃ POMIĘDZY WARSTWAMI BW ZBADANE NA 6-CALOWYCH RDZENIACH POBRANYCH Z ZAPORY UPPER STILLWATER [USA], W KTÓREJ NIE STOSOWANO ZAPRAWY ŁĄCZĄCEJ (4)

LIFT LINE BOND STRENGTH PROPERTIES OF 6-INCH RCC CORES FOR UPPER STILLWATER DAM, WITH NO BOND MORTAR PLACED ON JOINT (4).

Mieszanka RCC Mix	Udział złącza Percent joint bond, %	CzasVeBe Vebe time, s	W/(C+P) stosunek / ratio	Wiek, dni Age, days	Wytrzymałość na ściskanie, funt/cal ² Compressive strength (lb/in ²)	Wytrzymałość na rozciąganie, funt/cal ² Tensile strength (lb/in ²)	Wytrzymałość łączenia / Break bond		Kohezja eszkowa, funt/cal ² Residual cohesion, lb/in ²	Tarcie ślizgowe Sliding friction, tang Ø ^a
							Kohezja funt/cal ² Cohesion, lb/in ²	Tarcie wewnętrzne Internal friction, tan Ø		
A-85	80	29	0.37	545	5,590	225	445	1.01	20	1.07
A	95	17	0.39	365	5,220	200	450	1.33	30	1.15
B-85	60	33	0.30	120	3,790	165	305	1.07	35	0.90
B	95	15	0.34	365	5,130	190	370	0.81	30	1.28

zwiększyć wzajemną przyczepność obydwu warstw, musi ona posiadać przewidywane projektem właściwości.

„Połączenie konstrukcyjne” jest wykonywane w przypadku, gdy poprzednia warstwa betonu uległa związaniu. W takim przypadku konieczna jest obróbka powierzchni związanego betonu. Obejmuje ona natrysk wodą pod wysokim ciśnieniem lub piaskowanie w celu odsłonięcia kruszywa. Następnie powierzchnię oczyszcza się, po czym układa zaprawę zwiększającą przyczepność między warstwami.

W przypadku zastosowania połączenia typu „Cold joint” stosuje się zwykle warstwę 6 – 12 mm zaprawy łączącej, układanej przed wykonaniem kolejnej warstwy betonu wałowanego. Zaprawa taka składa się zwykle z jednej części cementu i dwóch i pół części piasku. Stosunek w/c nie powinien przekraczać 0,45.

Połączenia warstw są zwykle najsłabszymi miejscami w zaporach betonowych, w związku z tym poprawne zaprojektowanie i wykonanie połączeń ma podstawowe znaczenie dla procesu budowlanego. Wytrzymałość połączeń pomiędzy warstwami, a także ilość poziomych warstw to podstawowe parametry, które kontroluje się za pomocą odwiertów rdzeniowych.

– Kształtowanie zapory. Podstawowymi właściwościami decydującymi o doborze ściany zapory od strony dopływu wody są wodoszczelność, kontrola przecieków, trwałość oraz stopień trudności wykonawczych. Stosowane były różne rozwiązania: konwencjonalny beton wibrowany w szalunkach lub formowany w szalunkach ślizgowych [górną część zapory Upper Stillwater], zapory z betonu wałowanego ze zwiększoną ilością zaczynu, [zapora Jiangaya], wibrowany BW ze zwiększoną ilością zaczynu [WZW] oraz syntetyczne membrany z PVC [zapora Olivenhain]. Bardzo popularną metodą wznoszenia czoła zapory, zarówno od strony dopływu wody jak i odpowietrznej jest WZW, która polega na rozścieleniu warstwy zaczynu cementowego na poprzednią warstwę i wibrowaniu jej razem z nową nałożoną kolejną warstwą BW. Równie popularną technologią jest BW wzbogacony w zaczyn cementowy.

At cold and construction joints, bonding mortar is usually placed in a 6- to 12-mm-thick layer just prior to the placement of the next RCC lift. The bonding mortar usually consists of one part cement to two and half parts sand. The maximum water/cement ratio for bonding mortar should generally be 0.45, by weight.

Lift lines between concrete placements are normally the weakest planes in concrete dams; therefore, proper development of the bond is critical in the construction process. Strength properties of bonded lifts and the percentage of any horizontal lift surface bonded are the primary parameters determined by coring testing.

- Forming dam facing – Watertightness, seepage control, durability, and constructability are the primary considerations for selection of the upstream face of the dam. Various types of facing have been implemented, including: conventional vibratable concrete against framework, slip-form conventional concrete (Upper Stillwater Dam), grout-enriched RCC (GERCC) (Jiangya Dam), grout-enriched vibratable RCC (GEVR), and synthetic PVC membranes (Olivenhain Dam). Very popular facing methods for both upstream and downstream faces are GEVR, in which the grout is spread on the top of the previous layer and vibrated upward through the new layer, and GERCC in which grout is added on top of the new layer and vibrated downward through the layer.
- Leveling concrete – Leveling conventional concrete is placed on the foundation-RCC contact surface when the irregularity and roughness of the rock surface make it difficult to properly compact RCC.
- Developing transverse contraction joints – The primary function of contraction joints to control cracking in a dam due to volumetric changes of concrete. A common practice used on several RCC construction projects is to install galvanized steel sheet metal into the compacted RCC lifts (Figure 3 – right). The galvanized steel sheets act as a bond breaker or crack inducer.

Managing concrete temperature – Minimizing heat rise, due to the heat of hydration, is an important consideration in the concrete mix design. In the RCC mix design, usually low-heat hydration



Rys. 3. Góra – układanie BW: procesy rozścielania i zagęszczania; dół - umieszczanie blach ze stali ocynkowanej wpływającej na rozmieszczenie rys skurczowych

Fig. 3. RCC placement – upper: spreading and compaction process, lower: installation of crack inducer at contraction joints

- Beton wyrównawczy to beton konwencjonalny układany na powierzchni fundamentu z BW w przypadku, gdy nierówna i chropowata powierzchnia podłoża skalnego uniemożliwia poprawne ułożenie i zagęszczenie betonu wałowanego.
- Wykonanie poprzecznych szczelin skurczowych – Podstawową funkcją szczelin skurczowych jest kontrolowanie pękania betonu w zaporze, związanego ze zmianami objętościowymi betonu. W licznych konstrukcjach z betonu wałowanego powszechnie stosuje w tym celu listwy z cienkiej ocynkowanej blachy stalowej [rysunek 3]. Listwy te przerywają ciągłość elementu betonowego i determinują lokalizację rysy skurczowej.

Temperatura betonu w maszywie betonowym i jej kontrola – Zmniejszenie ilości ciepła spowodowanego hydratacją jest ważnym zagadnieniem przy projektowaniu mieszanki betonowej. W mieszankach BW stosuje się zwykle cementy o małym ciepłe hydratacji, a dodatkowo, dużą część cementu [do 70%] zastępuje się dodatkami pucolanowymi w celu zmniejszenia początkowego ciepła hydratacji. Inną powszechnie stosowaną metodą zmniejszania wzrostu temperatury betonu jest obniżenie temperatury w trakcie układania mieszanki dzięki wykonywaniu prac w chłodnych okresach roku, lub dnia. Niekiedy konieczne jest



Rys. 4. Widok ścian zapory Upper Stillwater [USA] od strony dolnego [górze] i górnego [dół] biegu rzeki

Fig. 4. Downstream [upper] and upstream [lower] face of Upper Stillwater Dam during construction



cements are used, and cement is replaced with a large percentage of pozzolan (up to 70 percent) to reduce the initial heat rise. Other common methods to minimize the heat rise of concrete is to reduce placement temperature by scheduling the construction during cooler times of the year and day. The use of more aggressive measures, or combinations of measures (such as coarse aggregate cooling using chilled water, flake ice, or liquid nitrogen) may sometimes be necessary. Some measures require special modifications to the batch plant and include a significant additional capital or operating expense. Cooling coil systems, commonly used in cooling of conventional mass concrete dams, have been implemented on very few RCC dams. Technical difficulties that could occur while installing a cooling tube system in compacted RCC layers can delay construction and increase project costs, making the cooling coil system less attractive for RCC dams.

6. Summary

The main reason for the widespread acceptance of RCC dams is the rapid rate at which construction can be completed using concrete placing methods usually associated with earth dam construction, which leads to lower overall project costs. The cost advantage is

zastosowanie bardziej radykalnych metod, na przykład chłodzenia grubego kruszywa, wody zarobowej, stosowanie dodatku mocno rozdrobnionego lodu jako części wody zarobowej lub chłodzenie mieszanki ciekłym azotem. Niektóre z tych metod wymagają odpowiedniego dostosowania węzłów betoniarских, co wiąże się z dodatkowymi wydatkami i kosztami. Układanie systemu rur chłodzących, stosowane zwykle w budowie zapór z betonu konwencjonalnego, zastosowano w niewielu przypadkach zapór wznoszonych z BW. Trudności technologiczne związane z umieszczeniem rur chłodzących w warstwach z betonu wałowanego mogą powodować opóźnienia w postępie prac oraz zwiększać koszty inwestycji. Z tych powodów ten rodzaj chłodzenia jest uznawany za mniej efektywny w konstrukcjach zapór z betonu wałowanego.

6. Podsumowanie

Głównym powodem szerokiego stosowania betonu wałowanego jako materiału konstrukcyjnego do budowy zapór jest możliwość jego układania i zagęszczania metodami powszechnie znanymi w technologii wznoszenia zapór ziemnych, co prowadzi do zmniejszenia kosztów inwestycji. Przewaga ekonomiczna widoczna jest szczególnie w przypadku zapór stosowanych w hydroelektrowniach, w których przyspieszenie budowy powoduje wcześniejsze dostawy prądu i zmniejszenie kosztów inwestycji.

W porównaniu z zaporami ziemnymi, zapory z betonu wałowanego mają zalety, mają bowiem właściwości podobne do zapór z betonu konwencjonalnego, a przede wszystkim większe bezpieczeństwo konstrukcji, w przypadku powodzi lub trzęsienia ziemi. W przypadku zapór z BW także rozwiązania przelewów spływowych oraz otworów wylotowych mogą być zintegrowane z konstrukcją zapory. Innymi zaletami zapór z betonu wałowanego jest ich mniejsza powierzchnia, monolityczność konstrukcji w porównaniu do strefowej budowy zapór ziemnych, lub zapór z narzutowym kruszywem z betonowymi powierzchniami czołowymi. Wszystko to pozwala na zabezpieczenie przed erozją wewnętrzną oraz ogranicza problemy z wymywaniem gruntu.

Podobnie jak zapory z betonu konwencjonalnego, zapory z betonu wałowanego posadowione są zwykle na zwartym podłożu skalnym, w związku z czym są rzadziej stosowane w przypadku słabego podłoża skalnego lub, gdy jest ono pokryte grubym nadkładem ziemnym.

Betony wałowane nie są napowietrzane, jednak konstrukcja tamy może być chroniona przed szkodliwym wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania za pomocą osłony z betonu konwencjonalnego, lub z elementów prefabrykowanych. Konstrukcja i organizacja wznoszenia osłon powinny być tak zaplanowane by nie zakłócać podstawowego procesu betonowania betonem wałowanym.

7. Wnioski

30-letnie doświadczenia budowy zapór z BW pozwoliły na sformułowanie wytycznych projektowych oraz wykonawczych. Te wy-

especially apparent in the construction of hydroelectric dams; if electricity generation comes online quicker, costs decrease.

When compared to embankment dams, RCC dams offer advantages that are similar to those of conventional concrete dams, such as safety when subjected to flood and earthquake events. Also, the spillways and outlet works can be integrated into a concrete dam. Other potential advantages of RCC dams compared to embankment dams include a smaller footprint, singular material construction versus zoned embankments or concreterefaced rockfill dams, and elimination of potential internal erosion and piping problems.

As with conventional concrete dams, RCC dams are normally founded on firm bedrock and are, therefore, less likely to be selected for dam sites where the bedrock is weak or is overlain by thick deposits of soil.

RCC mixes are not air entrained, but a dam may be protected from freezethaw action with different facing schemes using conventional or precast concrete. The construction of the facing system should be designed so as to not interfere with the planned rate of RCC placement.

7. Conclusions

The last 30 years of experience with RCC dams has established a current best practice in the design and construction of RCC dams. This practice and the evolving trends in technology will be reflected in ICLD Bulletin No. 126 on RCC dams being prepared by the ICOLD Committee on Concrete Dams (6). The primary developments of the practice are:

- The design and construction process should be as simple as possible. It is more advantageous, in terms of the speed of construction and minimal costs, to make the entire dam with only one RCC rich paste content mix – this is called an “all RCC dam” (3).
- An increasing number of dam projects in the last 20 years with high-cementitious RCC mixes appear to confirm the trend in the practice that the very workable mixtures of consistency of 8 to 12 seconds Vebe time make the construction process more efficient (3, 6). The RCC mix compressive strength above 35 MPa in one year allows building RCC structures that are equivalent in strength and safety to conventional mass concrete dams.
- Understanding the early behavior of different types of RCC mixes and implementing actual shrinkage and creep/relaxation properties of RCC mixes (which vary significantly from properties of the conventional mass concrete) in the design and construction process has led to the successful expansion of RCC technology into arch dams.

The requirements and solutions for building RCC dams are “site specific”; therefore, no single approach best serves all situations. Each project should be evaluated individually to determine the best option, and the latest developments in RCC technology, which still continues to advance, should be adopted.

tyczne i opis najnowszych tendencji w technologii zostały opisane w aktualizacji Biuletynu Międzynarodowego Komitetu Wielkich Zapór - ICLOD (6). Główne ustalenia i wytyczne są następujące:

- Proces projektowania i budowy powinien być tak prosty jak to tylko możliwe. Korzystniejsze z punktu widzenia szybkości wznoszenia konstrukcji zapory jest wykonanie jej w całości z betonu wałowanego o dużej zawartości zaczynu. Zaporę taką określa się jako „zaporę z betonu wałowanego” (3).
- Rosnąca ilość zapór z betonu wałowanego o dużej zawartości cementu wykonanych w ostatnich 20 latach wydaje się potwierdzać tendencję występującą w praktyce budowlanej, że zastosowanie mieszanek betonów wałowanych o konsystencji według metody VeBe w zakresie 8 do 12 sekund pozwala na zwiększenie efektywności procesu wznoszenia konstrukcji (3, 6). Betony wałowane o wytrzymałości na ściskanie wynoszącej po jednym roku więcej niż 35 MPa pozwalają na wznoszenie konstrukcji równoważnych co do wytrzymałości i bezpieczeństwa zaporom z konwencjonalnego betonu masywnego.
- Poznanie wczesnych właściwości różnych rodzajów mieszanek betonu wałowanego, jak również wykorzystanie znajomości zagadnień związanych ze skurczem i właściwościami reologicznymi [pełzanie/relaksacja] tych betonów [różniących się zasadniczo pod tym względem od konwencjonalnych betonów masywnych] w procesach projektowania i wznoszenia konstrukcji, doprowadziło do rozszerzenia stosowania technologii betonu wałowanego, także do budowy zapór łukowych.

Zarówno wymagania jak i rozwiązania związane ze wznoszeniem zapór z betonu wałowanego są szczególne w różnych warunkach, stąd brak jednolitych wytycznych uwzględniających wszystkie możliwe przypadki. Każdy projekt powinien być oceniany indywidualnie w celu doboru najkorzystniejszej metody uwzględniającej najnowsze osiągnięcia w technologii betonu wałowanego, która wciąż się rozwija.

Literatura / References

1. K. D. Hansen, W. G. Reinhardt, Roller-Compacted Concrete Dams, McGraw-Hill, (1991).
2. M. R. H Dunstan, New Developments in RCC Dams, The 7th International Symposium on RCC Dams, China, (2015).
3. J. C. De Cea, R. Ibanez de Aldecoa, J. Polimon, L. BergaCasafont, J. Yague Cordova, 30 Years Constructing RCC Dams in Spain, 6th International Symposium on RCC Dams, Zaragoza, 2012.
4. Bureau of Reclamation, Roller-Compacted Concrete – Design and Constructions for Hydraulic Structures Guide 2nd Ed., (2016).
5. H. M. Hadley, Masonry Dams – A Symposium Proceeding, ASCE Transaction, **106** 1320 - 1326, (1941).
6. Q. H. W. Shaw, Update of ICOLD Bulletin 126 on RCC Dams, The 7th International Symposium on RCC Dams, China, (2015).