

Ewolucja 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) uważany jest za przełomowe osiągnięcie w budowie zapór wodnych (1). Technologia ta w krótkim czasie zyskała akceptację na całym świecie dzięki dużej wydajności i skróconemu czasowi budowy zapór i obiektów towarzyszących. BW stosowany jest również przy przebudowach i podwyższaniu istniejących zapór betonowych, zabezpieczeniu przelewów zapór ziemnych, budowie nowych kanałów przelewowych, oraz stabilizacji fundamentów zapór z przyporami.

Beton wałowany został po raz pierwszy użyty na początku lat osiemdziesiątych przy budowie zapór Shimajigawa w Japonii i Willow Creek w USA. Zapora Upper Stillwater w Stanach Zjednoczonych, której budowę zakończono w 1987 roku, była pierwszą wielką konstrukcją, wykonaną z betonu wałowanego o wysokiej wytrzymałości [rysunek 1]. O ile w roku 1991 istniało jedynie 60 zapór wykonanych z BW, to obecnie jest ich ponad 750 w 58 krajach. Większość z nich znajduje się w Azji, a Chiny są światowym liderem w tej dziedzinie. Po około 50 zapór z betonu wałowanego znajduje się w Brazylii, Stanach Zjednoczonych oraz w Japonii (2)

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 over 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



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

Rys. 1. Widok z lotu ptaka i czoło zapory Upper Stillwater

a w Europie, prym wiedzie Hiszpania z 27 zaporami oraz Grecja, gdzie zapór takich wzniesiono 8. Pojedyncze zapory z BW można spotkać również we Francji, Rumunii, Rosji, Kazachstanie, Portugalii i Serbii.

Osiągnięcia technologii betonu wałowanego obrazuje, najwyższa na świecie, 243-metrowa zaporą Gibe III zbudowana w Etiopii oraz 160-metrowa łukowa zaporą Wanjiakouzi w Chinach. Większość zapór z betonu wałowanego stanowią obecnie zapory ciężkie o prostej osi. Jednakże coraz częściej wznoszone są zapory o kształcie zakrzywionym w planie. Zapory Wolwedans i Knellpoort, ukończone w latach 1989-1990 w Południowej Afryce, były pierwszymi zaporami łukowymi wykonanymi w technologii betonu wałowanego. Natomiast w ostatnim czasie znaczącą uwagę zwracają: zaporą łukową Changuinola w Panamie o wysokości 105 metrów oraz 130-metrowa zaporą Shapai w Chinach.

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

2. Definicja betonu wałowanego

Beton wałowany można opisać jako mieszankę betonową o konsystencji wilgotnej układaną poziomymi warstwami i zagęszczaną za pomocą walca wibracyjnego. Według terminologii Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI), BW to „beton zagęszczany przez wałowanie; beton, który w stanie niezwiązanym uniesie ciężar walca w trakcie zagęszczania”.

Beton wałowany to nie tylko nowe materiałowe rozwiązanie. Jest to też nowy sposób układania kolejnych warstw betonu bezpośrednio po zagęszczeniu poprzedzającej warstwy, zapewniając tym samym ciągłość procesu budowy. Zasadniczą różnicą pomiędzy betonem konwencjonalnym a wałowanym jest konsystencja mieszanki betonowej oraz sposób zagęszczania. Beton konwencjonalny zagęszczany jest przy użyciu wibratorów wgłębnych a beton wałowany przy użyciu walców wibracyjnych. Mieszanki BW mają suchszą konsystencję aniżeli mieszanki konwencjonalne.

3. Historia rozwoju zapór wodnych z betonu wałowanego

Wizjonerski pomysł

Historycznie rzecz ujmując, wizję betonu wałowanego po raz pierwszy przedstawił już w 1941 roku Homer M. Hadley ze Stowarzyszenia „Portland Cement Association” w materiałach konferencyjnych ASCE (5). W artykule dyskusyjnym odnoszącym się do sympozjum Masonary Dams (zapory murowane) z 1939 roku opisał ideę zapory wypełnionej betonem, którą współcześnie można nazwać koncepcją zapory z betonu wałowanego. Opisał ją następująco: „masywny przekrój z chudego betonu zbudowany na całej wysokości jako monolit, warstwa na warstwie, w taki sam sposób, w jaki buduje się układane warstwowo zapory ziemne,

about 50 RCC dams (2). In Europe, Spain leads the way with 27 RCC completed dams (3), followed by Greece with 8, and lesser 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 arch 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 arch dams have gained considerable attention with completion of the 105-meter-high 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 the 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.”

gdzie wymagana wodoszczelność i trwałość są zapewnione przez zastosowanie ekranów uszczelniających na powierzchniach narażonych na oddziaływania zewnętrzne”.

Hadley zdefiniował materiał, z którego zbudowana jest zapora następująco: „Główny trzon zapory jest zrobiony z chudego, wilgotnego, prawie suchego betonu zawierającego 112 do 134 kg/m³ cementu uzupełnionego dodatkami. Powinien on być układany cienkimi warstwami i zagęszczany buldożerem, pracującym na powierzchni uprzednio ułożonej warstwy, a następnie pielęgnowany przez zraszanie wodą, w miarę postępu prac. W związku z małą zawartością cementu i użyciu dodatków, po kilku miesiącach, beton ten osiąga wytrzymałość pomiędzy 14 a 17 MPa ale ilość wydzielanego ciepła wiązania jest znacznie mniejsza i stanowi od połowy do dwóch trzecich ciepła betonu zwykle używanego do budowy zapór wodnych. Z tej przyczyny beton podlegał będzie odpowiednio znacznie mniejszym zmianom objętości. Jego moduł sprężystości będzie także mniejszy, w związku z czym beton taki będzie znacznie lepiej dostosowywał się do nieznacznego osiadania fundamentów” (5).

Wodoszczelność i trwałość Hadley rozumiał następująco (5): „na ścianie odpływowej zapory, wykonana będzie warstwa bardziej odporna na wpływy otoczenia, integralnie połączona z betonem wypełniającym ... Na ścianie odwodnej będzie znajdować się bariera zatrzymująca wnikanie wody do wnętrza zapory ... może być ona wykonana jako przypowierzchniowa wzmocniona warstwa z odpowiednio ubogaconego cementem wodoszczelnego betonu...”

Wizja oryginalnej koncepcji betonu wałowanego przedstawiona przez Hadleya znacznie wyprzedzała tamte czasy i musiano odczekać kilka dekad, aby zobaczyć jej wdrożenie. Dyskusja Hadleya w materiałach z Sympozjum z 1939 roku nie wywołała żadnych odnośnych komentarzy. Wydaje się dziwnym brak reakcji na nową ideę w czasie, kiedy zapory betonowe traciły na popularności na rzecz zapór ziemnych, które można było wznosić znacznie szybciej.

Wczesne stadium rozwoju betonu wałowanego

Opublikowana przez Malcolma Dunstana w 2017 roku światowa lista zapór z betonu wałowanego (2) wskazuje, że Kazachstan posiadał zaporę z BW już w roku 1963. Oczywiście w tamtym czasie nie wzbudziło to wielkiego zainteresowania prasy technicznej. Natomiast najbardziej znanym przykładem wielkiej zapory z wykorzystaniem większości rozwiązań technologii betonu wałowanego była zbudowana we Włoszech w roku 1964 zapora Alpe Gera o wysokości 172 m. Została ona zaprojektowana przez inżyniera Giulio Gentile, a innowacją było układanie chudego betonu metodami stosowanymi przy budowie zapór ziemnych. Zamiast budować zaporę w pionowych blokach, zastosowano układanie betonu poziomymi warstwami o grubości 0,7 metra, od przyczółka do przyczółka, w odstępach kilku godzin. Samochody wywrotki dostarczały beton na plac budowy, a jego zagęszczanie odbywało się przy użyciu wibratorów wgłębnych. Nie stosowano bocznych szalunków ani chłodzenia betonu a pionowe szczeliny

Hadley described the dam material: “For the main body of the dam a lean, damp, almost dry concrete would be used – 0.50 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 it had to wait several decades to be 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 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 done 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

skurczowe nacinano zanim beton stwardniał. Mając na uwadze rodzaj betonu oraz znaczną liczbę poziomych połączeń międzywarstwowych, zastosowano od strony odwodnej stalową okładzinę w celu zapewnienia wodoszczelności konstrukcji. Jedyną rzeczą, która nie pozwalała nazwać zapory Alpe Gera pierwszą zaporą wykonaną całkowicie w technologii betonu wałowanego był brak zagęszczania betonu walcami wibracyjnymi (1).

Ewolucja technologii betonu wałowanego

Poczynając od lat siedemdziesiątych, projektowanie zapór z betonu wałowanego rozwijało się w trzech różnych kierunkach. Najpierw, United States Army Corps of Engineers (USACE) opracował koncept zastosowania chudego betonu w budowie zapór wodnych. Z kolei Tennessee Valley Authority rozwinęło ideę mieszanki BW o dużej zawartości spoiwa uboższego w cement portlandzki z dużą zawartością popiołów lotnych, którą później rozwinęto w Wielkiej Brytanii. Równoległe, trzecie podejście, w postaci technologii zwanej Roller Compacted Dam (RCD) było rozwijane w Japonii (1).

Nowa, szybka metoda budowy zapór nie wywołała dużego zainteresowania aż do roku 1980, kiedy to Japońskie Ministerstwo Budownictwa ukończyło, z zastosowaniem technologii RCD, budowę 89 metrowej zapory Shimajigawa. Zapora ta była pierwszą zaporą na świecie, w której BW był układany z wykorzystaniem buldożerów, a następnie zagęszczany walcami wibracyjnymi. Metodę RCD odróżnia się od technologii RCC, gdyż występują pewne różnice w filozofii projektowania i samej budowy zapór.

Zapora Willow Creek ukończona w roku 1982 przez USACE była pierwszą zaporą wykonaną wyłącznie z BW, z pełnym wykorzystaniem sprzętu stosowanego zwykle przy budowie zapór ziemnych. Chudy beton o całkowitej objętości 331 000 m³ rozścielano za pomocą zgarniarek, a następnie zagęszczano walcami wibracyjnymi. Całość prac wykonano w czasie krótszym niż 5 miesięcy.

Intensywne badania laboratoryjne i próby polowe w Wielkiej Brytanii wpłynęły na rozwój BW o dużej zawartości spoiwa z małą zawartością cementu, który częściowo został zastąpiony popiołem lotnym. Efektem tych badań była także sterowana laserowo ślizgowa metoda poziomego formowania elementów licowych zapory. Zostało to wdrożone po raz pierwszy przez Bureau of Reclamation w projekcie zapory Upper Stillwater w Utah, w roku 1987 (1, 4). Czas układania betonu zapory, na którą zużyto 1 040 000 m³ BW i 116 000 m³ konwencjonalnego betonu, wynosił zaledwie 10 miesięcy, jednak budowa ciągnęła się przez trzy lata z powodu surowych warunków klimatycznych.

Współczesne trendy

Zdobyte przez lata doświadczenie w zakresie stosowania technologii BW i rosnące do niej zaufanie umożliwiły budowę wielkich zapór. O ile do 1990 roku istniała jedynie jedna zapora ukończona w technologii BW o wysokości ponad 100 m, to w 2017 liczba ta wzrosła już do 131, w tym 4 zapory miały wysokości przekraczające 200 metrów. Pomimo, że historia nowoczesnych zapór z BW obejmuje okres nieco ponad 30 lat, technologia ta w dalszym ciągu

developed a lean-concrete approach for RCC dams. Second, the concept of a high-cementitious RCC mix with a low portland-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 the 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, only one 100-meter-high RCC dam had been completed, but by 2017, the number had 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 behavior, 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 (Figure 2). 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

żywiółowo się rozwija. Lepsze rozpoznanie pracy konstrukcji, wyniki badań laboratoryjnych oraz obserwacje i pomiary polowe prowadzą do wniosku, że znakomite wyniki daje stosowanie betonu wałowanego o wysokiej zawartości spoiwa (3, 6).

4. Mieszanki BW

Materiały stosowane w mieszankach BW są podobne do tych używanych w betonie konwencjonalnym: drobne i grube kruszywo, woda, cement, dodatki (najczęściej popioły lotne Klasy F według ASTM C 682) oraz domieszki. Różnice występują w uziarnieniu i zawartości poszczególnych składników betonu (rysunek 2). Zawartość wody w mieszankach BW jest mniejsza ok. 10% do 20% w porównaniu z większością betonów konwencjonalnych stosowanych w masywnych konstrukcjach. Ze względu na konieczność ograniczenia segregacji kruszywa w mieszance betonowej, maksymalny wymiar ziarna w betonach wałowanych ewoluuje w zakresie 50 do 60 mm w przypadku kruszyw łamanych i 40 do 50 mm dla żwirów. Stosowanie domieszek opóźniających wiązanie pozwala na zwiększenie czasu między układaniem kolejnych warstw, co jest szczególnie korzystne w klimacie gorącym.

Mieszanki betonu wałowanego klasyfikuje się w zależności od zawartości spoiwa na te o małej, średniej i dużej zawartości, w których zawartość cementu wraz z dodatkami i frakcją pyłową wynosi odpowiednio: mniej niż 100 kg/m^3 , od 100 do 150 kg/m^3 oraz powyżej 150 kg/m^3 (4). Jednakże nowoczesne, wolnowiążące mieszanki betonowe, w celu uzyskania wystarczająco długiego okresu właściwej urabialności, wymagają większej zawartości spoiwa przekraczającej 190 kg/m^3 (6).

Generalnie, istnieją dwa niezależne podejścia projektowania mieszanek betonu wałowanego. Są to podejście „gruntowe” i podejście „betonowe” (1). W podejściu „gruntowym”, beton wałowany rozważa się jako wzbogacony cementem właściwie dobrany stos okruszowy, gdzie projektowanie mieszanki oparte jest na zależności 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 wystarczająco zaczynu do wypełnienia wszystkich pustek w stosie okruszowym, czyniąc mieszankę w pełni nasyconą zaczynem cementowym. Oba podejścia jednakowo prowadzą do otrzymania betonu o konsystencji wilgotnej.

Właściwości betonu wałowanego

Zasadniczo klasy konsystencji BW określane są metodą VeBe według ASTM C1170. Dla mieszanek BW czas VeBe przypada w zakresie od około 8 do 40 sekund, przy czym większość mieszanek ma czas VeBe mniejszy niż 25 s. Mieszanki o czasie VeBe pomiędzy 15 a 20 s mają wystarczającą urabialność pozwalającą na zagęszczanie w warstwach 300 mm, podczas czterech do ośmiu przejeżdż 10 tonowego walca wibracyjnego.

Jedną z największych trudności spotykanych przy układaniu mieszanki BW jest tendencja do segregacji kruszywa grubego.

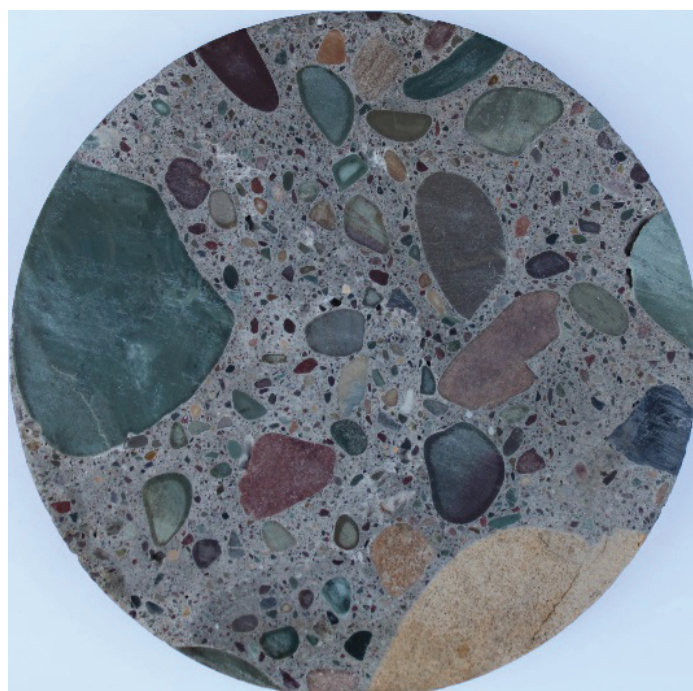
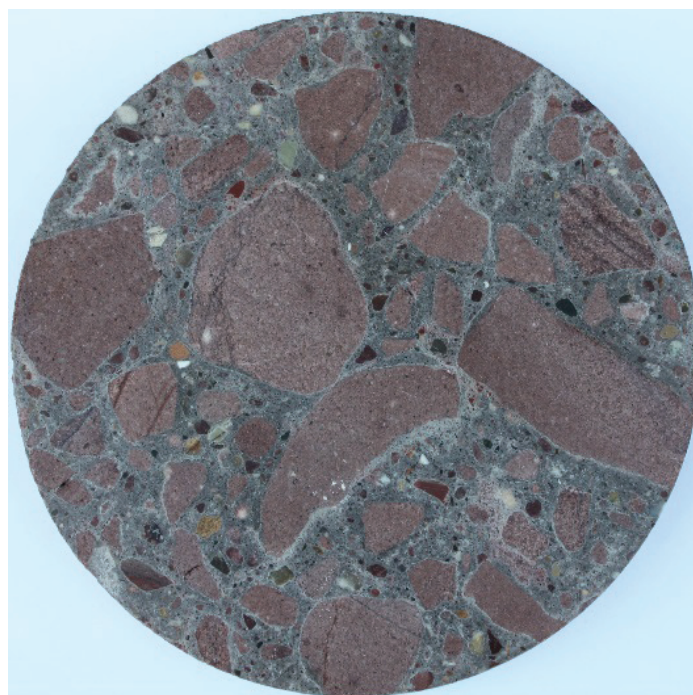


Fig. 2. 150-mm-diameter cores – RCC at Upper Stillwater Dam (upper) and conventional mass concrete at Hoover Dam (lower)

Rys. 2. Odwierty o średnicy 150 mm betonu wałowanego z zapory Upper Stillwater Dam (u góry) i konwencjonalnego betonu z zapory Hoovera (u dołu)

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 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

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BW ZASTOSOWANYCH W WYBRANYCH ZAPORACH (1)

MIXTURE PROPORTIONS OF SOME RCC DAMS (1)

Zapora Dam	NMRK* NMSA (mm)	Zawartość powietrza Air (%)	Skład / Quantities (kg/m ³)					Gęstość Density, (kg/m ³)	Plastyfikator Water reducing admixture, (cm ³ /m ³)
			Woda Water	Cement	Dodatki Admixtures	Kruszywo dobne 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

Segregacja powoduje słabe powiązanie kolejnych warstw, wprowadza pustki między ziarnami kruszywa i może prowadzić do nadmiernego przenikania wody pomiędzy warstwami betonu w głąb konstrukcji. Segregacja występuje najczęściej w mieszankach zbyt suchych, zawierających kruszywa grube albo niewłaściwie transportowanych i układanych.

Zawartość materiału wiążącego wpływa na końcowy przyrost wytrzymałości betonu wałowanego oraz wytrzymałość międzywarstwową (spójność). Mieszanki z większą zawartością materiału wiążącego, przy stałej zawartości innych składników w tym wody, mają wyższą wytrzymałość. Mieszanki z chudego BW, nawet jeśli spełniają wymagania wytrzymałości na ściskanie, to wykazują niską wytrzymałość 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, skutkując większymi zmianami objętościowymi masywu betonowego.

5. Budowa zapór z betonu wałowanego

Planowanie i organizacja budowy zapór z BW różni się od procesów związanych z użyciem betonu tradycyjnego. Wznoszenie zapory z betonu wałowanego wiąże się z układaniem poziomych, cienkich warstw betonu przy użyciu maszyn do rozkładania mieszanki i jej zagęszczania. Technologia ta jest mniej pracochłonna w porównaniu z tradycyjną metodą pionowych bloków, gdyż nie wymaga przemieszczania szalunków, przygotowania styków roboczych ani też zagęszczania betonu wibratorami wgłębnymi. W procesie realizacji zapory wykonywanej z BW można rozróżnić generalnie następujące etapy:

- Przygotowanie kruszywa i produkcja mieszanki betonu wałowanego.

exceeding 190 kg/m³ 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, and 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 ASTM C1170 Vebe consistency times for RCC mixtures is from about 8 to 40 seconds, with most RCC mixtures having a Vebe consistency time 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 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

Jednym z najważniejszych warunków udanej realizacji budowy zapory z BW jest zapewnienie dostaw kruszyw o stałej wilgotności, aby zapewnić ciągłość procesu budowy. Odpowiednie zapasy kruszywa na składowiskach i odpowiednia lokalizacja węzła betoniarskiego mają większe znaczenie przy budowie zapory z betonu wałowanego, niż to ma miejsce w przypadku tradycyjnych metod wznoszenia zapór betonowych.

- 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 połowy istniejących zapór. Drugim najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest transport mieszanki za pomocą przenośników taśmowych lub kombinacji przenośników taśmowych i ciężarówek.
- Rozścielanie mieszanki. – Powszechnie przy rozścielaniu mieszanki BW stosuje się spychacze. W wielu realizacjach używano laserowych systemów monitorowania i sterowania procesu rozścielania BW dla osiągnięcia równości powierzchni. Powszechną praktyką jest rozścielanie warstwy mieszanki o takiej grubości, by jej końcowa wartość po zagęszczeniu wynosiła 300 mm (rysunek 3).

Zagęszczanie mieszanki BW jest ważną czynnością, aby uzyskać odpowiednią wytrzymałość i gęstość betonu. Właściwe zagęszczenie uzyskuje się zwykle po czterech do sześciu przejazdach 10-tonowego gładkiego walca wibracyjnego. W miejscach trudnodostępnych stosuje się walce mniejsze.

- Połączenia międzywarstwowe. – Proces produkcji mieszanki, jej transportu, rozścielania i zagęszczania w przypadku betonu wałowanego powinno się prowadzić możliwie szybko. Dla mieszanek z betonu wałowanego bazującym wyłącznie na cemencie, cały ten proces powinien mieścić się w czasie 30 minut, od momentu zmieszania spoiwa z wodą zarobową. Alternatywnie czas wbudowania można określić mając na uwadze przewidywaną temperaturę, wilgotność, siłę wiatru i nasłonecznienie w czasie betonowania. Czas ten może być wydłużony dla mieszanek betonowych z dużą zawartością dodatków lub gdy stosuje się domieszki opóźniające wiązanie. Ogólnie wyróżnia się trzy rodzaje połączeń między warstwami w betonie wałowanym:

„**Gorący styk**” występuje, kiedy nowa warstwa BW jest ułożona zanim spoiwo w poprzedniej warstwie osiągnie początek wiązania. W tym przypadku przed ułożeniem nowej warstwy zaleca się jedynie oczyszczenie powierzchni z materiału niezwiązanego oraz wody wolnej za pomocą odkurzacza.

„**Ciepły styk**” występuje, kiedy kolejna warstwa betonu jest układana w czasie pomiędzy początkiem a końcem wiązania spoiwa w poprzedniej warstwie. Wykonywanie tego typu łączenia powinno być poprzedzone czyszczeniem za pomocą nadmuchu powietrza lub natrysku wody z powietrzem pod wysokim ciśnieniem w celu usunięcia luźnego lub uszkodzonego betonu. Następnie za pomocą sprężonego powietrza lub odkurzacza należy usunąć wodę

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:

- 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 (Figure 3).
- 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

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE POŁĄCZEŃ MIĘDZYWARSTWYCH BW ZBADANE NA 150-MM RDZENIACH POBRANYCH Z ZAPORY UPPER STILLWATER, W KTÓREJ NIE STOSOWANO ZAPRAWY SZCZEPNEJ (4)

LIFT LINE BOND STRENGTH PROPERTIES OF 150-MM RCC CORES FOR UPPER STILLWATER DAM, WITH NO BOND MORTAL PLACED ON JOINT (4).

Mieszanka BW RCC Mix	Skuteczność złącza Percent joint bond (%)	Czas VeBe Vebe time (s)	W/(C+P) wskaźnik ratio	Wiek (dni) Age (days)	Wytrzymałość na ściskanie, Compressive strength (MPa)	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength (MPa)	Połączenie międzywarstwowe Break bond	
							Kohezja Cohesion, (MPa)	Tarcie wewnętrzne Internal friction, tan Ø
A-85	80	29	0.37	545	38.6	1.6	3.1	1.01
A	95	17	0.39	365	36.0	1.4	3.1	1.33
B-85	60	33	0.30	120	26.1	1.1	2.1	1.07
B	95	15	0.34	365	35.4	1.3	2.6	0.81



Fig. 3. RCC placement - spreading and compaction process

Rys. 3. Układanie BW - procesy rozścielania i zagęszczania



Fig. 4. Upstream face of Upper Stillwater Dam during construction

Rys. 4. Widok czola zapory Upper Stillwater od strony odwodnej

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.

Warm joint – A warm joint occurs after the initial set and before the final set of the concrete in the previous lift. For warm joints, the treatment consists of cleaning, by air jetting or airwater jetting, to completely remove 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.

Cold joint – A cold joint occurs after the final set 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.

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, Figure 4),

i luźny materiał. W zależności od wymogów projektowania, stosuje się również warstwę szczepną.

„Zimny styk” występuje w przypadku, gdy beton poprzedniej warstwy uległ całkowitemu związaniu. W takim przypadku konieczne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni związanego betonu. Obejmuje ono oczyszczenie powierzchni betonu silnym strumieniem wody lub hydro-piaskowanie w celu odstonięcia kruszywa. Następnie, po mechanicznym oczyszczeniu i odkurzeniu powierzchni z luźnego materiału i wody, układa się zaprawę szczepną. W „zimnym styku” zaprawę szczepną układa się zazwyczaj o grubości 6-12 mm bezpośrednio przed rozścieleniem mieszanki kolejnej warstwy BW. Zaprawa taka składa się zwykle z jednej części cementu oraz dwóch i pół części piasku. Stosunek w/c nie powinien przekraczać 0,45.

Połączenia międzywarstwowe są zwykle najslabszymi miejscami w zaporach betonowych, w związku z tym poprawne zaprojektowanie i wykonanie tych połączeń ma decydujące znaczenie w procesie budowy. Za pomocą badań na próbkach z odwiertów rdzeniowych testuje się wytrzymałość tych połączeń a także określa się procentowo powierzchnię występowania słabych styków.

- Kształtowanie lica zapory. – Najważniejszymi kryteriami decydującymi o doborze rodzaju lica zapory od strony odwodnej są wodoszczelność, trwałość oraz wykonalność. Stosowane są różne rozwiązania jak: warstwa konwencjonalnego betonu wibrowanego z szalunkiem zewnętrznym; beton konwencjonalny formowany w szalunkach ślizgowych (zapora Upper Stillwater - rysunek 4), beton wałowany ze zwiększoną ilością zaczynu (GERCC) (zapora Jiangaya), wibrowany BW ze zwiększoną ilością zaczynu (GEVR) oraz syntetyczne membrany z PVC (zapora Olivenhain). Bardzo popularną metodą wznoszenia czoła zapory, zarówno od strony odwodnej jak i odpowietrznej jest GEVR, w której zaczyn jest rozścielany na wcześniejszą warstwę BW a przez wibrowanie wnika w nowo-nałożoną warstwę BW. Równie popularną technologią jest GERCC, w której zaczyn nanoszony jest na warstwę mieszanki BW a przez wibrowanie wnika w głąb warstwy.
- Beton wyrównawczy. – Jest to beton konwencjonalny układany na podłożu w przypadku, gdy nierówności i chropowatość powierzchni podłoża skalnego utrudnia poprawne ułożenie i zagęszczenie betonu wałowanego.
- Wykonanie poprzecznych szczelin skurczowych. – Podstawową funkcją szczelin skurczowych jest kontrola pęknięć, związanych ze zmianami objętościowymi betonu. Zwykle stosuje się w tym celu ocynkowane arkusze blachy stalowej osadzone wibracyjnie w głąb warstwy BW, jak to miało miejsce w wielu projektach (rysunek 5). Blachy te przerywają ciągłość elementu betonowego i determinują lokalizację rysy skurczowej.
- Kontrolowanie temperatury betonu – ograniczenie wzrostu temperatury wywołanej hydratacją cementu jest ważnym za-



Fig. 5. Installation of crack inducer at contraction joints

Rys. 5. Instalowanie elementów szczelin skurczowych

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 5). The galvanized steel sheets act as a bond breaker or crack inducer.
- Managing concrete temperature – Minimizing temperature rise, due to the heat of hydration, is an important consideration in the concrete mix design. In the RCC mix design, usually lower-heat hydration cements are used, and cement is replaced with a large percentage of pozzolan (up to 70 percent). Other common methods to minimize the temperature 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

gadnieniem w projektowaniu mieszanki betonowej w maszynowych konstrukcjach inżynierskich. W projektowaniu mieszanek BW stosuje się zwykle cementy o niskim ciepłe hydratacji, a dodatkowo, dużą część cementu (do 70%) zastępuje się dodatkami (głównie popiołami lotnymi Klasy F według ASTM C 618) aby zredukować początkowy wzrost temperatury. Inną powszechnie stosowaną metodą ograniczenia maksymalnej temperatury betonu jest planowanie prac betoniarskich w chłodniejszych porach roku czy dnia. Niekiedy konieczne jest zastosowanie bardziej radykalnych metod lub ich kombinacji jak obniżenie temperatury kruszywa grubego przy użyciu schłodzonej wody, płatków lodu lub ciekłego azotu. Niektóre z tych metod wymagają odpowiedniego dostosowania węzłów betoniarskich, co wiąże się z dodatkowymi wydatkami kapitałowymi lub kosztami operacyjnymi. Systemy rur chłodzących, stosowane zwykle przy budowie zapór z betonu konwencjonalnego, zastosowano jedynie w nielicznych przypadkach zapór wznoszonych z BW. Trudności technologiczne związane z umieszczeniem systemu rur w warstwach z betonu wałowanego mogą powodować opóźnienia w postępie prac oraz zwiększenie kosztów inwestycji. Z tych też powodów, ten rodzaj chłodzenia jest uznawany za mniej efektywny w konstrukcjach zapór z betonu wałowanego.

6. Podsumowanie

Głównym powodem szerokiego rozpowszechnienia zapór BW jest szybkie tempo budowy, stosując metodę nieodłącznie kojarzoną z budową zapór ziemnych. Prowadzi to do zmniejszenia całkowitych kosztów inwestycji. Korzyści widoczne są szczególnie w przypadku budowy zapór dla hydroelektrowni, gdyż wcześniejsze dostawy prądu do sieci dodatkowo obniżają koszty całkowite.

W porównaniu z zaporami ziemnymi, zapory z betonu wałowanego wykazują zalety jakie posiadają zapory z betonu konwencjonalnego, czyli większe bezpieczeństwo w przypadku powodzi lub trzęsienia ziemi. W zaporach betonowych, przelewy spływowe oraz upusty mogą być zintegrowane z konstrukcją zapory. Innymi zaletami zapór z betonu wałowanego jest mniejsza powierzchnia fundamentów i monolityczność konstrukcji w porównaniu do zapór ziemnych, gdzie występuje ryzyko penetracji wody i erozji wewnętrznej materiału.

Podobnie jak zapory z betonu konwencjonalnego, zapory z betonu wałowanego posadowione są zwykle na zwartym podłożu skalistym. Nie są stosowane w miejscach, gdzie występuje słabe podłoże lub gdy jest ono pokryte grubym nadkładem gruntu.

Betony wałowane nie są napowietrzane, jednak konstrukcja zapory może być chroniona przed szkodliwym wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania za pomocą odpowiedniego wykończenia lica zapory przy użyciu betonu konwencjonalnego lub betonowych elementów prefabrykowanych. Lico zapory powinno być tak zaprojektowane by nie zakłócać planowanego tempa układania betonu wałowanego.

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

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 ICOLD Bulletin No. 175 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.

7. Wnioski

Ponad 30 letnie doświadczenie budowy zapór z BW pozwoliły na sformułowanie wytycznych projektowych oraz wykonawczych. Wytyczne te oraz najnowsze tendencje w technologii będą opisane w Biuletynie nr 175 Międzynarodowego Komitetu Wielkich Zapór - ICOLD (6). Główne ustalenia wytycznych są następujące:

- Proces projektowania i budowy powinien być tak prosty jak to tylko możliwe. Korzystniejsze z punktu widzenia szybkości wznoszenia konstrukcji zapory i minimalizacji kosztów jest wykonanie jej w całości z betonu wałowanego o dużej zawartości zaczynu (3).
- Rosnąca w ostatnich 20 latach ilość zapór z betonu wałowanego o dużej zawartości spoiwa (ponad 190 kg/m³) wydaje się potwierdzać tendencję występującą w praktyce budowlanej, że zastosowanie wysokourabialnych mieszanek o konsystencji VeBe w zakresie 8 do 12 sekund zwiększa efektywność procesu wznoszenia konstrukcji (3, 6). Betony wałowane o wytrzymałości na ściskanie po jednym roku powyżej 35 MPa pozwalają na wznoszenie konstrukcji równoważnych co do wytrzymałości i bezpieczeństwa zaporom z betonu konwencjonalnego.
- 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 używanych w konstrukcjach masywnych) w procesach projektowania i budowy doprowadziło do udanego wdrożenia technologii betonu wałowanego w budowie zapór łukowych.

Wymagania i rozwiązania stosowane w budowie zapór z betonu wałowanego są specyficznie zależne od lokalizacji projektu, stąd brak jednoznacznego podejścia uwzględniającego wszystkie możliwe przypadki. Każdy projekt powinien być rozwijany indywidualnie celem wyboru najkorzystniejszej opcji i uwzględniać najnowsze osiągnięcia coraz bardziej zaawansowanej technologii betonu wałowanego.

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. ICOLD Committee on Concrete Dams, Bulletin 175, Roller Compacted Concrete Dams, Draft, March 1, 2018.

- 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.