

ПОЧЕЦИ ГРАВИТАЦИОНИХ БЕТОНСКИХ БРАНА (први део)

Проф. др Петар С. ПЕТРОВИЋ, дипл. грађ. инж.
Грађевински факултет Универзитета у Београду

РЕЗИМЕ

Мада су, према досадашњим сазнањима, прве бране изграђене од земље, песка и камена пре око пет хиљада година, прва гравитациона брана од бетона саграђена је тек пре 139 година. У свету се сада гради све већи број брана. Претпоставља се да их данас има преко 500 000, од чега је више од 45 000 високих брана.

У деветнаестом веку тек се ствара теорија еластичности и дају упутства за пројектовање и прорачун брана зиданих каменом. Воде се полемике о напонима али не и о деформацијама. Узгон се уводи као оптерећење, али не и сеизмички утицаји.

У овом чланку се, у два наставка, први пут у литератури, дају основни подаци о почечима изградње гравитационих бетонских брана са портланд цементом као везивом.

Чланак обухвата период до 1900. године. Даје се кратак приказ и фотографије за 21 брану, колико је аутор овога чланка пронашао у литератури.

Кључне речи: брана, портланд цемент, камен, гравитациона бетонска брана, Мегрож (Перол), Бојдс Корнер, Лоуер Стони Крик, Абејстед, Апер Таи Там, Брутон Пас, Вирнви, Лоуер Кристал Спринг, Биталу, Гослинг, Викторија, Менли, Бучхолц, Остин, Тирлмир, Бетунгра, Перијар, Думареск, Буратор, Нунобики и Гибсензи Ост.

УВОД

Познато је да су око 300. године пре н. е. Римљани употребљавали земљу из околине места Пуцоли (Pozzuoli, близу Напуља, Италија). То је била земља вулканског порекла састављена углавном од силиката калцијума са примесама оксида гвожђа и алуминијума, која се звала **пуцолан**. Са њом су, као

неком врстом цемента, додајући песак у различитим размерама, добијали малтер (тзв. "римски бетон") Овај цемент је дао добре резултате и под водом.

Џон Смитон (John Smeaton), енглески грађевински инжењер је 1756. године пронашао како се прави хидраулички цемент, тј. пронашао је давно заборављени "римски бетон".

Затим су бројни истраживачи долазили до добрих резултата за малтер од "њиховог" цемента. Тако је, на пример, Џејмс Паркер (James Parker) 1796. године направио хидраулички цемент од кречњака и глине и патентирао га под именом "Паркеров цемент" или Римски цемент. И следећих двадесетак година су патентирани разни патенти за хидраулички цемент направљен од мешавине кречњака и глине.

Најзад је 1824. године Џозеф Еспдин (Joseph Aspdin), енглески грађевински предузимач, патентирао свој проналазак – **портланд цемент**.

ПОРТЛАНД ЦЕМЕНТ

Проналаском **портланд цемента** 1824. године од стране енглеског грађевинског предузимача **Џозефа Еспдина** (Joseph Aspdin) из Лидса, почиње нова ера у справљању правог бетона Он је употребљавао материјал са британског острва Портланд.

Наравно, требало је да прође доста времена, чак више од 45 година, да би бетон са портланд цементом као везивом почео да се користи код масивних хидротехничких конструкција, какве су гравитационе бетонске бране.

Мада је портланд цемент пронађен 1824. године, у периоду до 1900. године мало су се градиле масивне хидротехничке конструкције, односно гравитационе бетонске бране од бетона справљеног са овим цементом. Радије су грађене насуте земљане бране и

по која зидана гравитациона масивна брана од камена.

При крају овог периода почињу да се граде гравитационе бетонске бране са портланд цементом као везивом, било као бране, било као преливи.

Зашто се одмах није кренуло са употребом бетона са портланд цементом као везивом при грађењу гравитационих бетонских брана? Због тога што наука и техника у то време нису још биле на таквом степену развоја који би омогућио да се при пројектовању оваквих конструкција узму у обзир сви фактори који утичу на њихову сигурност. Исто тако, ни извођачи нису били оспособљени да изводе такве конструкције.

Требало је да прође пола века па да наука и струка одреде начин одређивања напона, а читаво столеће да могу при прорачуну сигурности да узму у обзир сва оптерећења и утицаје.

ПОЧЕЦИ ПРОРАЧУНА ГРАВИТАЦИОНИХ БРАНА

Почетком деветнаестог века нагло је дошло до развоја теорије еластичности, која је основа за све тачније прорачуне масивних конструкција, какве су гравитационе бетонске бране.

Тако је, претпостављајући да се идеално еластично тело састоји од молекула између којих се јављају силе при деформисању тела, које су сразмерне променама раздаљина између молекула и делују на правцима који спајају молекуле, три године пре проналаска портланд цемента, **Навије** (Lois Mari Navier, 1785–1836.) у раду [1] 1821. године први извео диференцијалне једначине равнотеже изотропног еластичног тела изражене само преко померања.

У своме раду [2] из 1821. године **Коши** (Augustin Cauchy, 1781–1857.) уводи у теорију еластичности појмове напона и деформација.

У првој књизи о теорији еластичности **Ламе** (G. Lamé, 1795–1870.) је 1852. године [3] извео исте једначине равнотеже као и 1828. године, само што сада те једначине имају две константе еластичности. Зову се **Ламеове једначине** и представљају три основне диференцијалне једначине равнотеже изотропног еластичног тела израженог путем померања.

Помоћу ових (и других) једначина било је могуће да се одреде напони у телу бране у оквиру претпоставки линеарне теорије еластичности. О деформацијама тела бране није се водило рачуна. Како брана има темеље, требало је одредити стање напона и деформација у њима. Због тога је претпостављено да је темељ бране раван и део полупростора, па су даље почела решавања ових једначина за еластичан полупростор.

Претпоставља се да постоји полупростор који је ограничен једном равни, која је хоризонтална и која се зове гранична раван полупростора. Позитиван смер Z осе је управан на ту раван, али је усмерен ка полупростору. У тој равни је узето да делују следеће концентрисане силе: управна (Бусинесково решење) и хоризонтална (Черутијево решење).

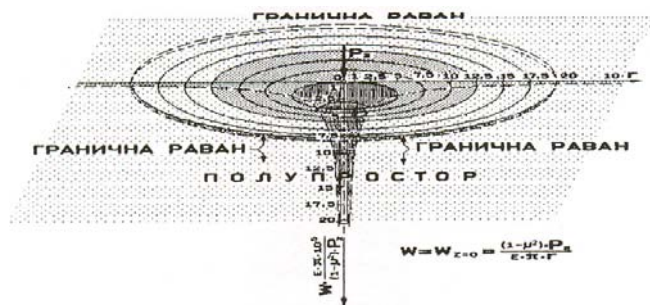
У случају да концентрисана сила делује управно на полупростор, **Бусинеск** (Joseph Valentin Boussinesq, 1842–1929.) је 1885. године, у своме раду [4], дошао до решења помоћу потенцијалне функције и у затвореном облику. Тако је добио решење и за дијаграм напона σ_z испод концентрисане силе $P=1$.

Бусинеск је дао и решење за напоне и деформације услед деловања концентрисане силе на граничну раван полупростора, претпостављајући да полупростор нема тежину. Тако је за дијаграм вертикалних померања W за концентрисану силу $P=1$ у граничној равни добио решење представљено на сл. 1.

Черути (Valentino Cerruti, 1850–1909.) у своме раду [5] из 1882. године даје решење за напоне и деформације када на граничну раван полупростора, делује концентрисана тангенцијална сила. Претпоставио је да полупростор нема тежину. Графички приказ вертикалних померања је на сл. 2.

И док су се у првој половини деветнаестог века углавном градиле земљане бране и по која гравитациона брана зидана каменом, у другој половини деветнаестог века ситуација се постепено мења: доста се граде бране зидане од камена и по која гравитациона бетонска брана. За ове последње бране требало је смислити неки начин прорачуна.

С обзиром на то да су гравитационе бране у Западном и Источном римском царству, затим у муслиманској и хришћанској Шпанији, грађене у далекој прошлости, о њиховим пројектантима или извођачима, цртежима, прорачунима и начину извођења, није остало никаквих записа.

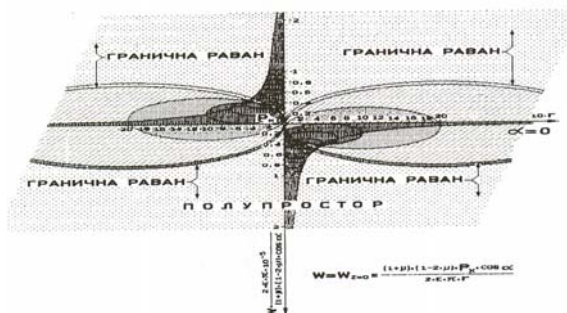


Слика 1. Вертикално померање W у граничној равни Полупростора ($z=0$) услед деловања концентрисане силе P_z управне на граничну равну, према Бусинеску.

Сваки озбиљнији рад о гравитационим бранама морао је да опише како вода, као оптерећење, делује на брану. Први је 1586. године то тачно приказао холандијски грађевински инжењер **Симон Стевин** (Simon Stevin). Он је показао да је притисак воде на вертикалну површину бране троугаоног облика, а њена резултанта да је на трећини висине од најниже тачке. За бране темељене на порозној подлози, које је описао и цртежима, писао је да их треба темељити на дубоком темељу од дрвета. Он је био први писац из теорије и праксе грађења брана.

Дон Педро (Don Pedro Bernardo Villarreal de Berriz) је 1736. године издао књигу о бранама, нарочито о пројектовању и извођењу гравитационих и масивних контрафорних брана (салуцима) зиданих каменом. Он је био зачетник идеје о контрафорним бранама. У својој књизи је описао и дао цртеже свих пет брана које су изграђене по његовим спецификацијама.

Белидор (Bernard Forest de Belidor) је први 1750. године публиковао прорачуне за одређивање стабилности гравитационих брана. Он је проучавао сигурност на претурање зида правоуглог попречног пресека оптерећеног водом са једне стране. За висину зида b и дебљину h исти је притисак воде у свим пресецима на дубини a која је мања од висине зида b . Прорачунавао је колико дебео мора да буде зид да оптерећење водом не преврне зид око темеља (ивице) неоптерећене стране. Узео је мању запреминску тежину зида ($5/3$ воде) и коефицијент сигурности 1,5. Белидорев метод прорачуна за зидове зидане каменом употребљаван је и при пројектовању (ретких) брана зиданих каменом, и у Европи тога времена био је веома познат.



Слика 2. Черутијево решење за вертикална померања у граничној равни ($z=0$) када у тој хоризонталној равни делује концентрисана тангенцијална силе P_x . Приказана су померања $U_{z(z=0)} = W(z=0)$.

Чарлс Босут (Charles Bossut) је у својој књизи издатај 1764. године, дао емпиријске текстове без прорачуна, у којима је највише пажње обраћао употреби брана за стварање малих акумулација за коришћење снаге воде. Упозоравао је на прављење прелива код произвољних типова брана.

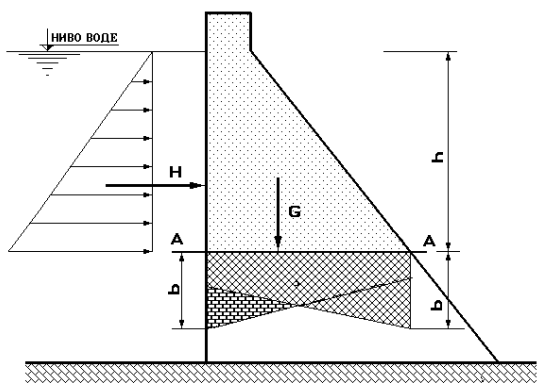
Мада су до средине деветнаестог века многи писали о пројектовању и грађењу брана, само је Белидор имао рационалан математички прилаз.

Француски грађевински инжењер **Сазили** (M de Sazilly) је 1853. године, у своме раду предложио прорачун гравитационих брана. Брана се замењује серијом попречних пресека јединичне ширине. Претпоставио је да се било који такав вертикални исечак понаша као вертикална конзола уклештена у свој темељ, а оптерећена је притиском воде дуж њене узводне стране.

Сазили је своју теорију о гравитационим бранама заснивао на две претпоставке. У било ком хоризонталном пресеку бране тежина бране изнад тог пресека мора да буде таква да:

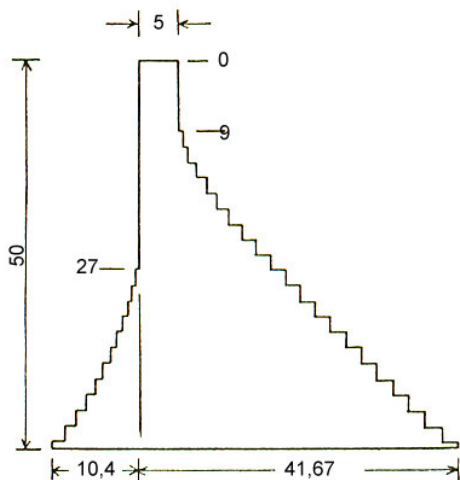
- 1 - брана не може хоризонтално да склизне, и
- 2 - највећи напон притиска у том пресеку не сме да буде већи од унапред одређене границе сигурности.

Сазили сматра да се при одређивању највећег вертикалног дозвољеног напона мора узета у обзир случај када је акумулација празна (тада ће највећи вертикални напон притиска бити на узводној страни) и случај када је акумулација пуна, па хоризонтална сила од притиска воде мења дијаграм вертикалних напона притиска (то ће учинити да највећи вертикални напон притиска буде на низводној страни). То је приказано на слици 3.



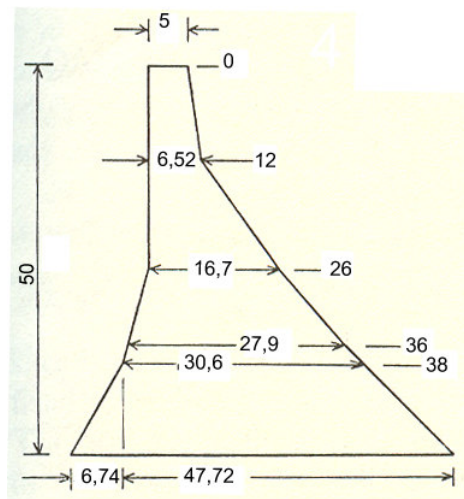
Слика 3. Сазили сматра да највећи напони притиска у пресеку настају када делују: 1 – само сила G (узводно) и 2 – силе G и H (низводно).

Сазили је покушао да нађе формулу на основу које ће моћи да прорачуна “профиле једнаке отпорности”. Мада је добио тачне диференцијалне једначине, није био у стању да их интегрише. Због тога је употребио профиле који су били степенасте на обе површине, и добио је елементе коначне величине који су рачунати истовремено. Видети слику 8. Сазили није поменуо још два услова: први да напони затезања не смеју да се појаве; и други - да брана мора да буде отпорна на претурање око “ножице” било ког пресека.



Слика 4. Сазили је добио тачне диференцијалне једначине, али није био у стању да их интегрише, па је употребио степенасте профиле на обе површине, који су рачунати истовремено.

Делокр (Е.Х.Р. Emile Delocre) је био главни инжењер на пројектовању бране “Фуренс” (Furens), чије је пројектовање француска влада поверила компанији “Греф и Делокр”. Делокр је сматрао да гравитационе бране, тада зидане каменом, имају више камена него што је потребно да би биле сигурне, и да то поскупљује и продужава изградњу. Осим тога, сматрао је да пресек бране, који је предлагао Сазили, може да се смањи тако да се уместо степенасте контуре уведе полигонална контура. На тај начин Делокр је добио за брану “Фуренс” $33,5 \text{ m}^3$ камена мање по дужном метру бране. Он је то објавио 1866 године. Дошао је до закључка да, када је резултанта сила изван средње трећине пресека, тада долази до напона затезања. Поставило се питање: који је највећи вертикални напон притиска који се може дозволити код гравитационих зиданих брана. Да би дошао до одговора, његов колега из компаније, иначе шеф надзора на брани “Фуренс” Греф (М.И. Auguste Graeff) је Сазилијевом методом анализирао шест шпанских и две француске бране. Највећи вертикални напон притиска био је код шпанских брана између 0,65 МПа и 1,4 МПа, а код француских је нашао да је највећи вертикални напон притиска био 0,6 односно 1,0 МПа. Делокр се одлучио за најмањи напон, за напон од 0,6 МПа.



Слика 5. Делокр сматра да грађење степенасте контуре бране може да се замени рационалнијом глатком контуром, којом се брже гради и штеди материјал.

Тек пред крај деветнаестог века појављује се рад француског научника и грађевинског инжењера **Мориса Левија** (Maurice Lévy, 1838-1910), у коме 1895. године предлаже да на узводној контури бране вертикалан напон услед деловања сопствене тежине изнад неког хоризонталног пресека буде увек већи од хидростатичког притиска у том пресеку, тј. $\sigma > \gamma \cdot u$. Овај предлог је настао после рушења бране од камена „Bouzey”, и тада се поставило питање облика и величине дијаграма узгона.

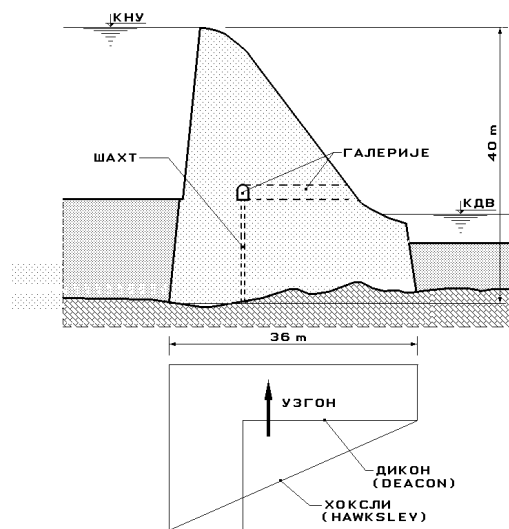
Морис Леви је сматрао да при придржавању тога правила (које је добило назив “правило Мориса Левија”), вода неће ући у пукотине. Ово правило је “владало” педесетак година. Захтевало је прављење масивније бране. У време настанка “правила Мориса Левија” мало се знало о узгону и филтрацији у стеновитим темељима брана. Вода филтрира кроз бетон, како при постојању тако и у одсуству пукотина, практично при произвољном притиску воде у бетону.

У исто време се градила у Великој Британији гравитациона бетонска брана “Вирнви” (Wyrnwy) за водоснабдевање града Ливерпула. Пројектант целог система (резервоара, цевовода од бране до Ливерпула, аквадукта, бране “Вирнви”) био је један од највећих грађевинских инжењера Енглеске тога доба, **Хоксли** (Thomas Hawksley, 1807-1893.) Он је замислио још 1881. године да узгон испод бране “Вирнви” треба узети у прорачун онако како је приказано на слици 10: потисак као правоугаоник доње воде и филтрациони притисак линеаран од горње до доње воде.

Томе се успротивио пројектант саме бране, главни инжењер водовода града Ливерпула, велико име тога доба, грађевински инжењер **Дикон** (George Frederick Deason, 1843-1909.). Брана је грађена од 1881 до 1889. године. Дикон је са низводне стране бране, у темељу испод прелива, ископао попречне дренажне ровове 23·30 см и повезао их са вертикалним дренажним шахтовима, као на слици 10. Шахтови се налазе узводно на трећини попречног пресека бране, и улазе у подужну галерију која се налази неколико метара изнад највишег нивоа доње воде. Из подужне галерије води неколико попречних галерија, које путем гравитације одводе воду из дренажних шахтова у доњу воду.

На тај начин дијаграм узгона је био: потисак као правоугаоник доње воде, а филтрациони део узгона

је правоугаоник узводно од дренажних шахтова, разлика горње и доње воде, као на слици 10. Дренажа је изведена 1885/1886. године. Покушаја са дренажом и са дијаграмом узгона као на слици 10 (Дикон), у деветнаестом веку више није било.



Слика 6. Претпостављени дијаграми узгона за попречни пресек прелива на гравитационој бетонској брани “Вирнви”, саграђеној 1889. године у Великој Британији. Изнад највишег (рачунског) нивоа доње воде, у телу бране, налази се подужна галерија. У њу улази вертикалан дренажни шахт, а из ње излази попречна галерија, којом вода из дренажног шахта отиче низводно гравитацијом. На слици је Хокслијев предлог дијаграма узгона и Диконов, изведен заједно са дренажом [7].

У деветнаестом веку постојао је и проблем узимања утицаја од деловања земљотреса при прорачуну гравитационих бетонских брана. Знало се за катастрофалне и друге земљотресе, као и да брана може да буде “погођена” једним од њих, али како их узети у прорачун, то се није знало. Почело се са прављењем „сеизмичких скала”. После једног земљотреса из 1627. године италијански научник Поарди (Poardi) је први поделио земљотресе по интензитету у четири групе. До 1900. године је било преко 25 сеизмичких скала. Те године је јапански научник Омори (F. Omori) предложио скалу са 7 степени. Али још нешто важније, предложио је да се сеизмички утицаји рачунају тзв. “статичком методом”. Тиме је на самом крају деветнаестог века дато бар нешто (али недовољно тачно) за прорачун сеизмичких утицаја од сопствене тежине. За бране саграђене у том веку то је било касно [6] и [7].

ГРАВИТАЦИОНЕ БЕТОНСКЕ БРАНЕ СА ПОРТЛАНД ЦЕМЕНТОМ

Требало је да прође 48 година од проналаска портланд цемента па да прва гравитациона бетонска брана на свету буде саграђена. То је била брана “Мегрож” или “Перол” (Maigrauge, Péroles), саграђена у Швајцарској 1872. године, висине 21 m. У тој земљи ће, после још 89 година (1961. године), бити саграђена и највиша гравитациона бетонска брана на свету “Гранд Диксанс” (Grande Dixence) висока 285 m.

У другој половини претпрошлог столећа доминирале су, по висини, зидане гравитационе бране од камена са везивом од природног цемента. Велике грађевинске компаније, које су се бавиле грађењем брана, имале су у својини: каменоломе, средства за обраду камена, средства за превоз и уграђивање камена, а радна снага је била јефтина. Једино су морале на тржишту да купују природни цемент, тј. да га добављају из бројних “фабрика”. Имале су уходану технологију грађења, а квалитет је провераван тек на крају грађења. Стена за темељење бране није смела да буде испуцала, распаднута и слично, док појам разделница није ни постојао.

Бетон са портланд цемента као везивом имао је друкчију технологију справљања, транспорта, уграђивања и неговања, и био је бољи и квалитетнији материјал. Бетонска брана је могла да се темељи тамо где није могла да се темељи брана од зиданог камена. Захваљујући томе су прве бране од бетона и биле изграђене. У почетку није било одговарајућих норми и правила о бетону. Портланд цемент је увозен из Енглеске, а у другим земљама цементаре су биле права реткост: у Сједињеним Америчким Државама је прва отпочела са радом 1871. године, а у Аустралији 1882. године.

У чланку су приказане све гравитационе бетонске бране са портланд цемента као везивом изграђене у 19. веку, до чијих имена и података о њима је могао аутор овог чланка да дође. При томе је коришћена сва доступна литература, укључујући Интернет.

1. БРАНА “МЕГРОЖ” (MAIGRAUGE), ШВАЈЦАРСКА, 1872.

Мада је било логично да Енглеска, у којој је 1824. године патентиран портланд цемент, прва отпочне

са његовом применом код грађења брана, до тога није дошло. Педесету годишњицу од проналаска портланд цемента “прославили” су грађењем стоте насуте бране од земље. И док су се Енглези и Јапанци бавили само грађењем земљаних брана (до 1884. године имали су 822 изграђене земљане бране), дотле су друге земље кренуле напред.

У западној Швајцарској, југозападно од главног града Берна и близу град Фрибурга (Fribourg), преградивши реку Сарин (Sarine), саграђена је 1872. године брана “Перол” (Péroles), прва на свету **гравитациона бетонска брана са портланд цемента као везивом**. Брану је пројектовао грађевински инжењер Гијом Ритер (Guillaume Ritter). Касније је брани промењено име у **“Мегрож” (Maigrauge)**.

Са грађењем бране се отпочело 1869. године (слика 7), а сви радови су завршени 1872. године. Када је саграђена, брана је била висока 21 m и имала је дужину у круни 120 m. У попречном пресеку брана је имала облик трапезоида са ширином у круни од 6 m, а у темељу од скоро 26 m. У основи је била залучена. О хидратацији портланд цемента и потреби за вертикалним разделницама није се ништа знало, па ова брана није ни имала вертикалне разделнице. У то време се о узгону врло мало знало, па брана није ни статички рачуната на ово оптерећење. Слично је било и са деловањем земљотреса, па ни овај утицај није узет у обзир при прорачуну бране [8].

У тело бране је било уграђено око 32 000 m³ бетона. Утрошак портланд цемента по кубном метру бетона био је око 250 kg. Првобитна запремина акумулације “Перол” (из 1872. године) била је око 1 000 000 m³ воде. Сливно подручје акумулације је имало површину од око 1250 km².

Чеони прелив са четири преливна поља укупне дужине 30 m и без устава, био је на левој обали. На брани је постојао темељни испуст на коти речног дна, са максималним капацитетом од 100 m³/s. Убрзо по грађењу бране темељни испуст је био зачепљен наносом и пањевима.

На десној обали непосредно до бране налазила се машинска зграда хидроелектране са две турбине, свака снаге 300 HP. Једна турбина је била повезана са пумпом да даје воду под притиском, док је друга давала механичку снагу оближњој индустрији. Већ



Слика 7. Поглед на четири преливна поља (која су касније порушена) и мост преко њих. На левој страни се види део бране која је саграђена 1872. године [9].

су 1895. године машинска зграда и целокупна опрема уклоњене и нова хидроелектрана је отпочела са производњом електричне енергије.

После 15 година акумулација је била запуњена наносом, па је одлучено да се брана надвиси. То је учињено тек 1909. године. Тада је брана надвишена за 2,75 m и имала је висину од 23,75 m и дужину у круни 195 m. У њу је, заједно са првобитним бетоном, уграђено око 34 000 m³ бетона. Површина акумулације је износила 0,35 km², а дужина акумулације је око 2,3 km.

Да би се повећала сигурност на клизање и претурање бране према швајцарским стандардима, 1994. године су са круне бране избушене 52 бушотине и брана је анкерована преднапрегнутим анкерима, са укупном силом преднапрезања од 160 тона.

2. БРАНА “БОЈДС КОРНЕР” (BOYDS CORNER), СЈЕДИЊЕНЕ АМЕРИЧКЕ ДРЖАВЕ, 1873.

Друга на свету, по редоследу грађења гравитационих бетонских брана саграђених са портланд цементом као везивом, изграђена је у Сједињеним Америчким Државама. То је брана “Бојдс Корнер” (Boyds Corner или Boyd’s Corner), саграђена 1873. године у држави Њујорк (New York), близу града Кента (Kent) у области Путнам (Putnam County). Брана преграђује западни рукавац реке Кротон (Croton) и саграђена је ради снабдевања водом града Њујорка (New York City).



Слика 8. Снимак круне прве на свету изграђене гравитационе бетонске бране “Мегрож”. Фотографија је начињена 1994. године [9].

Ископ за брану је отпочео другог јула 1866. године. Извођач радова је до тада градио само мале бране од камена и није имао радну снагу, механизацију и искуство у раду са бетоном. Већ у току припремних радова извођач је закључио да обим и квалитет радова који је захтеван није у стању да изврше без великих губитака, па је раскинуо уговор. Нови извођач радова брану је завршио тек у фебруару 1873. године. [11].

Гравитациона бетонска брана “Бојдс Корнер” је висока 23,75 m и дугачка у круни 204 m. Тело бране има запремину од 191 000 m³ бетона и камена. Са 56,7 km² сливног подручја створена је 2 400 m дуга акумулација са запремином од 6 400 000 m³ воде. Брана није статички рачуната на оптерећење од узгона и сеизмичке утицаје, јер се у то време мало знало о њима. Брана је изведена без разделница.

Узводна и низводна страна бране су од тесаног камена, а између њих је уграђиван бетон са портланд цементом као везивом, у који су убацивани велики комади камена (као код “киклопског” бетона). При оваквом начину уграђивања бетона (a dam has cut-stone faces filled between with concrete), не постоје подаци колико је утрошено килограма портланд цемента по кубном метру бетона. Портланд цемент је увезен из Велике Британије, јер је тек 1871. године почела производња портланд цемента у Сједињеним Америчким Државама.

Када је 1980. године испитивана брана “Бојдс Корнер”, установљено је да је брана у таквом стању

да се не може поправити већ да се мора срушити. И поред противљења многих, брана је срушена и огромна количина муља је потекла реком Кротон. На истом месту је изграђена 1990. године нова брана “Бојдс Корнер”, која је била исте висине као стара брана. Додат је нов прелив ширине 6,1 m.

Прелив на брани и испуст обновљени су 1990. године [11].

За повећање стабилности нове бране употребљени су преднапрегнути анкери и инјектиран је темељ бране. Направљен је и мост преко прелива.



Слика 9. Поглед на стару гравитациону бетонску брану “Бојдс Корнер” из 1873. године [10].



Слика 10. Поглед на нову гравитациону бетонску брану “Бојдс Корнер” изграђену на истом месту 1990. године [11].

3. БРАНА “ЛОУЕР СТОНИ КРИК” (LOWER STONY CREEK), АУСТРАЛИЈА, 1873.

И док се у Великој Британији, земљи у којој је пронађен портланд цемент, граде само земљане бране, у њеним колонијама почиње грађење првих гравитационих бетонских брана са портланд цементом као везивом. У Аустралији је саграђена гравитациона бетонска брана “Лоуер Стони Крик” (Lower Stony Creek), која је крајем 1873. године преградила реку Стони Крик (Stony Creek).

По завршетку припремних радова, са грађењем бране се отпочело 1872. године у близини града Гилонга (Geelong) у држави Викторија (Victoria). Портланд цемент је увезен из Велике Британије, јер је производња портланд цемента у Аустралији отпочела тек 1882. године.

Узводна и низводна страна бране су зидане тесаним каменом, а између њих је уграђиван бетон са

портланд цементом као везивом. У бетон су убацивани велики комади необрађеног камена, тако да су зидане стране бране служиле као оплата бетону.

Пројектант бране је био грађевински инжењер (chief engineer) Џорџ Гордон (George Gordon), а надзорни инжењер (resident engineer) Едвард Добсон (Edward Dobson).

Брана је у основи закривљена и изведена је без разделница. Брана је висока 23,8 m и дугачка у круни 198 m. Ширина бране у круни износи 2,62 m, а ширина у темељу је 16,3 m. Преграђивањем реке Стони Крик створена је акумулација запремине од око 640 00 m³ воде, а капацитет прелива је био око 45 m³/s. У прорачуну бране нису узети у прорачун ни узгон, нити сеизмички утицаји. Акумулација и данас служи сврси ради које је пројектована. Брана, ни после 136 година свога постојања, није претрпела никакве промене [12].



Слика 11. Поглед на гравитациону бетонску брану “Лоуер Стони Крик”, која је изграђена ради снабдевања водом града Гилонга [12].

4. БРАНА “АБЕЈСТЕД” (ABBEYSTEAD), ВЕЛИКА БРИТАНИЈА, 1881.

Брана “Абејстед” (Abbeystead) је саграђена 1881. године у Великој Британији. То је била прва гравитациона бетонска брана изграђена у земљи у којој је више од пола века пре тога пронађен портланд цемент. Грађење бране је отпочело 1878. године, Брана је преградила реку Вајр (Wyre), југозападно од града Абејстеда (Abbeystead) у грофовији Ланкашир (Lancashire).

Као и код раније саграђених брана, и код бране “Абејстед” узводна и низводна страна су сазидане од тесаног камена, између којих је уграђен бетон у који су убачени велики комади камена. Брана је у

основи закривљена слично лучним бетонским бранама, а изведена је без разделница и није прорачуната на оптерећење од узгона и на сеизмичке утицаје.

Брана “Абејстед” је висока 13,7 m и дугачка у круни 133 m. На почетку рада њена акумулација је имала око 841 000 m³ воде. Сада је све до круне прелива цела акумулација испуњена наносом, тако да прелив непрекидно ради.

Брану је пројектовао грађевински инжењер Џејмс Менсерг (James Mansergh), а радове је извео грађевински инжењер Џозеф Е. Ханах (Joseph.E. Hannah) [13].



Слика 12. Поглед на зидану низводну страну гравитационе бетонске бране “Абејстед” саграђену 1881. године [13].

5. БРАНА “АПЕР ТАИ ТАМ” (TAI TAM UPPER) ХОНГ КОНГ (HONG KONG), сада КИНА (CHINA), 1888.

Још једна гравитациона бетонска брана саграђена је у некадашњој британској колонији. То је брана “Апер Таи Там” (Tai Tam Upper, Тутам), саграђена 1888. године на острву Хонг Конг (Hong Kong Island).

Долина речице Таи Там била је погодна за стварање акумулација чисте воде из које би се снабдевало пијаћом водом само острво Хонг Конг. Зато је одлучено да се приступи грађењу гравитационе бетонске бране “Апер Таи Там” тунела избијеног у граниту и дугог 2220 m, и акведукта од цигли и камена дугог 5030 m, који је повезивао излаз тунела и резервоар у Викторији, тј. одводила воду до главног града Викторије.

Грађење бране је отпочело 1872. године, али су сви припремни радови прекинути 1874. године због економске депресије. Радови су настављени тек 1883. године. Брана и остали радови завршени су током наредних пет година, тако да је главни град острва Викторија од 1888. године могао да користи воду из акумулације “Апер Таи Там”.

Сама брана “Апер Таи Там” темељена је у полураспаднутом граниту, тако да је за бетон, као агрегат,

коришћен гранит. Осим тога, уграђиван је бетон у који су убачени велики комади гранита. На тај начин је у гравитациону бетонску брану “Апер Таи Там”, у којој је везиво био портланд цемент увезен из Велике Британије, уграђено 60% бетона и 40% гранита. Брана је преграђивала горњи део долине, на око 2 km од ушћа речице Таи Там у море.

Првобитно, брана је била висока од земље 27,5 m и дугачка у круни 122 m, док је ширина у темељу износила 18,3 m. Запремина акумулација је била око 580 000 m³ воде [15]. Већ у току грађења бране било је јасно да ће количина воде бити недовољна, па је одлучено да се брана надвиси. Са надвишењем, које је завршено 1897. године, нова грађевинска висина бране је 40 m, а дужина у круни 146 m. Акумулација има запремину од 1,645·10⁶ m³ воде [15].

Пошто је примећено велико процуривање воде кроз темељ бране “Апер Таи Там”, а брана је темељена на испуцалом граниту, то је одлучено да се преко испуцалог гранита постави глинени тепих. Како ова антифилтрациона мера није дала жељене резултате, приступило се 1990. године инјектирању темеља са бране. Ни ова мера антифилтрационе заштите није у потпуности успела, па је 2003. године извршено ново инјектирање.



Слика 13. Поглед на прелив и гравитациону бетонску брану “Апер Таи Там” после надвишења бране 1897. године [14].



Слика 14. Поглед на гравитациону бетонску брану “Апер Таи Там” после надвишења бране 1897. године [14].

6. БРАНА “БРУТОН ПАС” (BROUGHTON PASS WEIR), АУСТРАЛИЈА, 1888.

После 15 година паузе, 1888. године саграђена је гравитациона бетонска брана у Аустралији. То је била мала брана (тачније, прелив) “**Брутон Пас**” (Broughton Pass Weir), која је преграђивала реку Катаракт (Cata-ract River) на месту низводно од

њених катаракти, а која се налази недалеко од града Сиднеја (Sydney) у држави Нови Јужни Велс (New South Wales).

Брана је висока само 6 m и дугачка је у круни 100 m. Запремина акумулације је 50 000 m³ воде. Ова вода се одводила 58 km дугим доводом, који се састојао од тунела, канала и акведуката, до града Сиднеја.



Слика 15. Поглед на део акумулације и гравитациону бетонску брану (прелив) “Брутон Пас” на реци Катаракт у Аустралији. Брана је у сенци околних брда па се не види добро [16].

Деведесетих година двадесетог века дошло је до смањеног протицаја реке Катаракт (смањено преливање преко прелива “Брутон Пас”), односно до смањења испоруке воде Сиднеју. Појавиле су се бројне пукотине на обалама и у реци Катаракт узводно од прелива, и на самом преливу (брани). Део воде је понирао.

На дубини од 450 m испод дна реке Катаракт и прелива “Брутон Пас”, експлоатише се угаљ. Бројни ходници (иако је дубина велика) допринели су појави пукотина на површини земље. У току је санација прелива [16].

7. БРАНА “ВИРНВИ” (VYRNWY), ВЕЛИКА БРИТАНИЈА, 1889.

Гравитациона бетонска брана “Вирнви” (Vyrnwy) је преградила истоимену реку Вирнви (Vyrnwy) 1889. године, близу села Љанвдин (Llanwddyn) у Велсу (Wales). Брана је део система за снабдевање пијаћом водом града Ливерпула са околином.

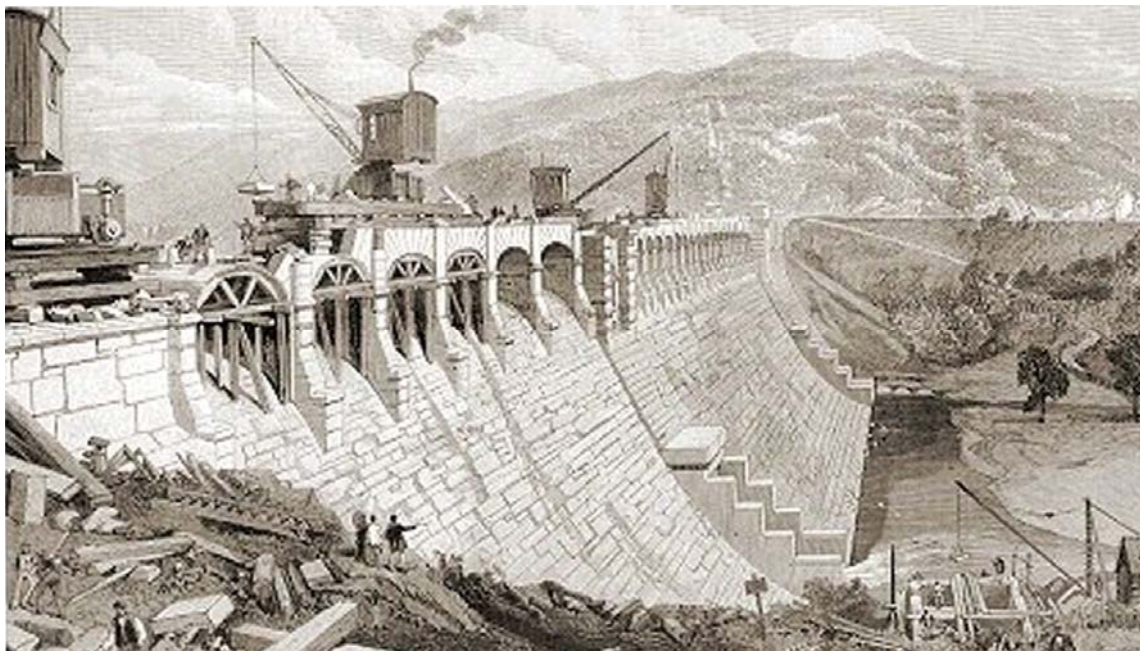
Узводна и низводна контура бране “Вирнви“, као и остале грађевине уз брану, су од тесаног камена са спојницама испуњеним малтером од портланд цемента. Тело бране је справљено од бетона са

портланд цемента у које су убацивани велики комади стена, необрађени, тешки и до 10 тона.

Грађевинска висина бране је 44,2 m. Дужина бране у круни износи 357,5 m, а ширина при дну је 38,7 m. У брану “Вирнви” и припадајуће објекте је уграђено укупно око 263 000 m³ или око 500 000 тона материјала. У ову цифру је укључено и око 27 000 тона портланд цемента. У саму брану је уграђено око 199 000 m³ материјала [17].

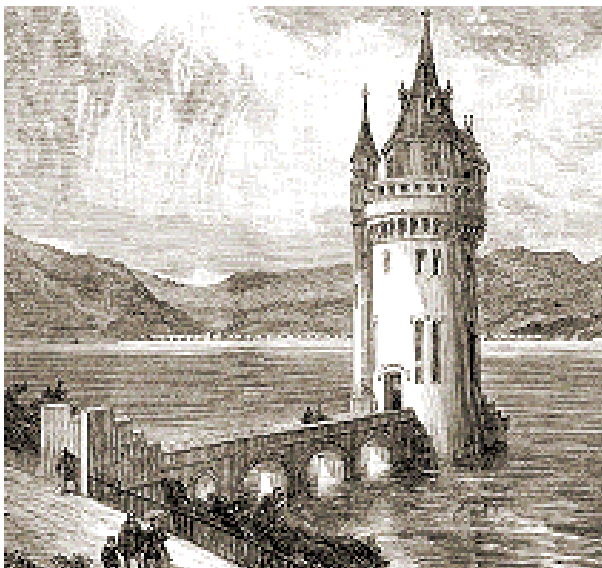
Акумулација “Вирнви” била је тада једна од највећих у Европи тога времена, а свакако највећа у Великој Британији. Имала је запремину од око 59,7·10⁶ m³ воде и површину од 4,53 km². Обим акумулације износи 18 km, а укупна дужина око 7,6 km. Просечна ширина акумулације је око 800 m.

Пројектанти целог система: резервоара, цевовода од бране до Ливерпула, тунела, акведукта и бране “Вирнви”, били су Хоксли (Thomas Hawksley, 1807-1893), један од најбољих грађевинских инжењера Енглеске тога доба, и Дикон (George Frederick Deason, 1843-1909), велико име тога доба и грађевински инжењер - главни инжењер водовода града Ливерпула.



Слика 16. Грађење (1 снимак из 888. године) гравитационе бетонске бране “Вирнви”. На круни бране се види неколико кранова са погоном на пару, којима је дизан камен и до 10 тона тежине [18].

Хоксли је 1881. године у прорачун бране унео узгон, и то: **потисак** као правоугаоник доње воде и **филтрациони притисак** линеаран од горње до доње воде. Томе се успротивио Дикон, па је испод бране “Вирнви” **први пут у свету** код гравитационих бетонских брана, изведена **дренажа** (1885/1886. године) у темељу испод прелива. Дренажа је на низводне две трећине ширине бране, у облику попречних дренажних ровова чистог отвора 23·30 cm. Сваки дренажни ров је повезан са вертикалним дренажним шахтом (сл. б), а ови шахтови су повезани са подужном галеријом. Из те галерије, која је изнад највишег нивоа доње воде, води неколико попречних галерија, које путем гравитације одводе воду из дренажних шахтова у доњу воду. На тај начин дијаграм узгона је био: потисак као правоугаоник доње воде, а филтрациони део узгона као правоугаоник узводно од линије дренажних шахтова, као разлика горње и доње воде (сл. б).



Слика 17. Поглед на водозахватну грађевину саграђену 1889. године. У позадини куле се види брана “Вирнви”. Снимак је начињен 1889. године. [18].

На врху бране изграђена су 33 лука чији су отвори представљали преливна поља. Тако је 1889. године, по први пут у Великој Британији направљена висока брана са **преливом на телу бране**. Вода се слива

низ брану и у подножју бране је улазила у умирујући базен - **слапиште**.



Слика 18. Поглед на водозахватну грађевину бране “Вирнви” при пуној акумулацији. Снимак је начињен 1925. године [19].

На левој и десној страни бране налази се по један “темељни испуст” који је служио за испуштање “биолошког минимума”. Испусти су дужине око 22 m, кружног облика; то су тунели пречника 4,5 m са облогом од бетона са портланд цементом. Њихове затварачнице су се уздизале 4 m изнад круне бране.

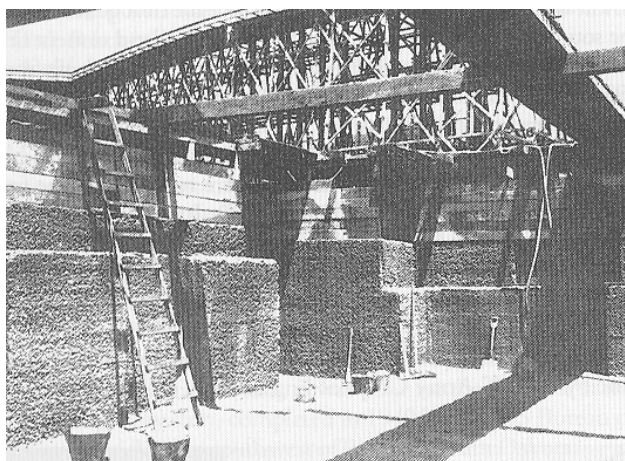
Посебну пажњу привлачи кула затварачнице са акведуктом (The Straining Tower and Aqueduct). Налази се у акумулацији, око 30 m од леве обале, око 1000 m од бране. Вода из акумулације прво пролази кроз фину челичну мрежу где се филтрира од материја које се налазе у води, а затим преко акведукта, тунела и цевовода одлази ка Ливерпулу. Кула затварачнице је изведена у готском стилу. Висока је 63 m од којих је 15 m под водом. Остатак од 48 m је изнад воде. Дневно је за Ливерпул транспортовано 45 000 m³ воде.



Слика 19. Поглед (снимак из 1933. године) гравитационе бетонске бране “Вирнви” када прелив ради.

8. БРАНА “ЛОУЕР КРИСТАЛ СПРИНГС” (LOWER CRYSTAL SPRINGS), СЈЕДИЊЕНЕ АМЕРИЧКЕ ДРЖАВЕ, 1890.

Гравитациона бетонска брана “Лоуер Кристал Спрингс” (Lower Crystal Springs) преградила је реку Сан Матео (San Mateo Creek) 1890. године, која се налази у држави Калифорнија (California), Сједињене Америчке Државе.



Слика 20. Блокови за бетонирање на гравитационој бетонској брани “Лоуер Кристал Спрингс”. Фотографија је из 1888. године [7].

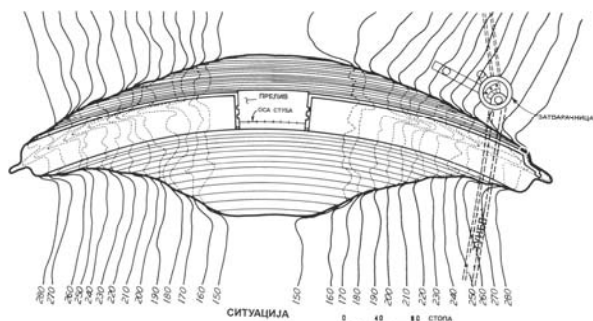
Пошто на реци Сан Матео није било погодне стене за темељење гравитационе зидане бране од камених блокова, пројектант се одлучио за гравитациону бетонску брану са портланд цементом као везивом. Тада у Калифорнији није било ниједне фабрике цемента (у Сједињеним Америчким Државама производња портланд цемента је отпочела у Коплеју (Coplay) у држави Пенсилванија (Pennsylvania), тек 1871. године), па је портланд цемент увозен из Енглеске.



Слика 21. Круна гравитационе бетонске бране “Лоуер Кристал Спрингс” непосредно по завршетку радова 1890. године [20].

Увезени портланд цемент за ову брану није био фино самлевен. Највеће зрно агрегата било је од 75 mm. Први пут је код ове бране садржина воде у бетону стриктно контролисана, тако да је водоцементни фактор од 0,47 био скоро константан. Није узимана у обзир вода коју је имао влажан песак и агрегат. Да би се добиле 22 кубне стопе бетона, било је потребно: 1 барел (170 kg) цемента, 2/3 барела (80 l) воде, 2 барела (340 kg) песка и 22 кубне стопе (900 kg) дробљеног камена.

Свака кубна јарда (0,7645 m³) бетона садржавала је 470 либри (213 kg) цемента, што за 1 m³ бетона даје 278 kg цемента, па је добијен, уз обавезно прање агрегата, бетон одличног квалитета. Најкасније 15



Слика 22. Ситуација гравитационе бетонске бране “Лоуер Кристал Спрингс” [20]

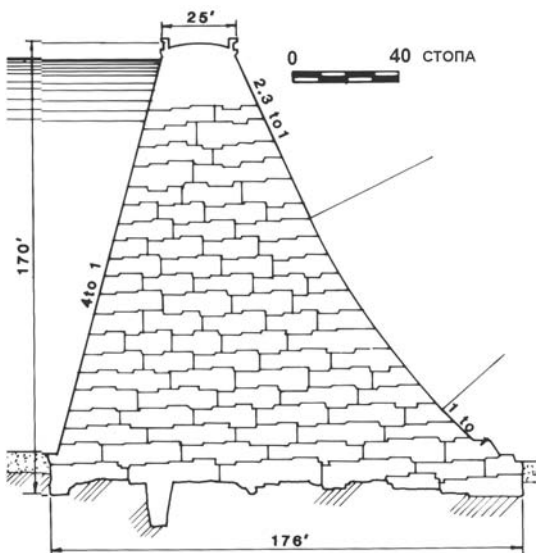
минута по завршетку мешања, бетон је разастран у слојеве дебљине 3 инча (7,5 cm). Сваки слој је добро ручно збијан све док нови слој није потпуно “везао” за претходни. Свеж бетон није био изложен сунцу, већ је покриван даскама и прскан водом све до стврдњавања.

Први пут на свету су блокови урађени слично како се данас раде.

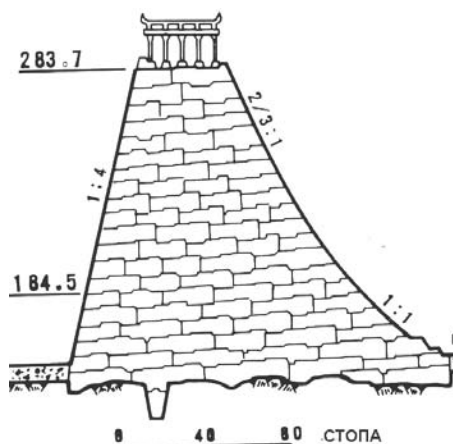
Требало је да буде брана грађевинске висине 51,8 m, види се на слици 24, али се од тога одустало при крају грађења. О томе сведочи и изведена ширина у круни бране од 13,10 m, а не 7,6 m, како је предвиђено пројектом, а види се на слици 24.



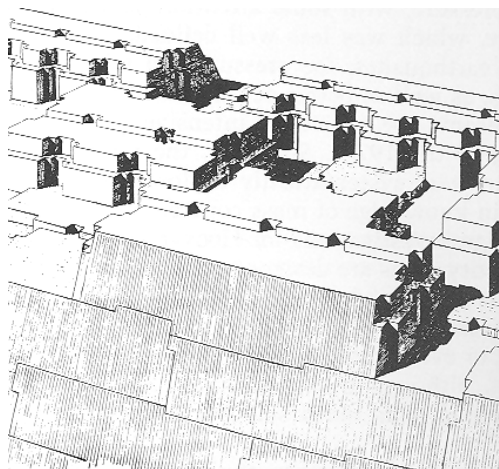
Слика 23. Подужни пресек гравитационе бетонске бране “Лоуер Кристал Спрингс” [20].



Слика 24. Приказује попречни пресек кроз непреливни део гравитационе бетонске бране “Лоуер Кристал Спрингс” [20].

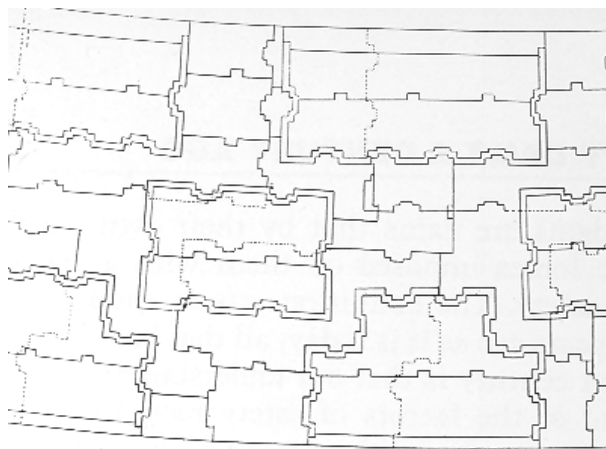


Слика 25. Приказује попречни пресек кроз преливни део гравитационе бетонске бране “Лоуер Кристал Спрингс” [20]. На сликама су уцртани блокови за бетонирање.



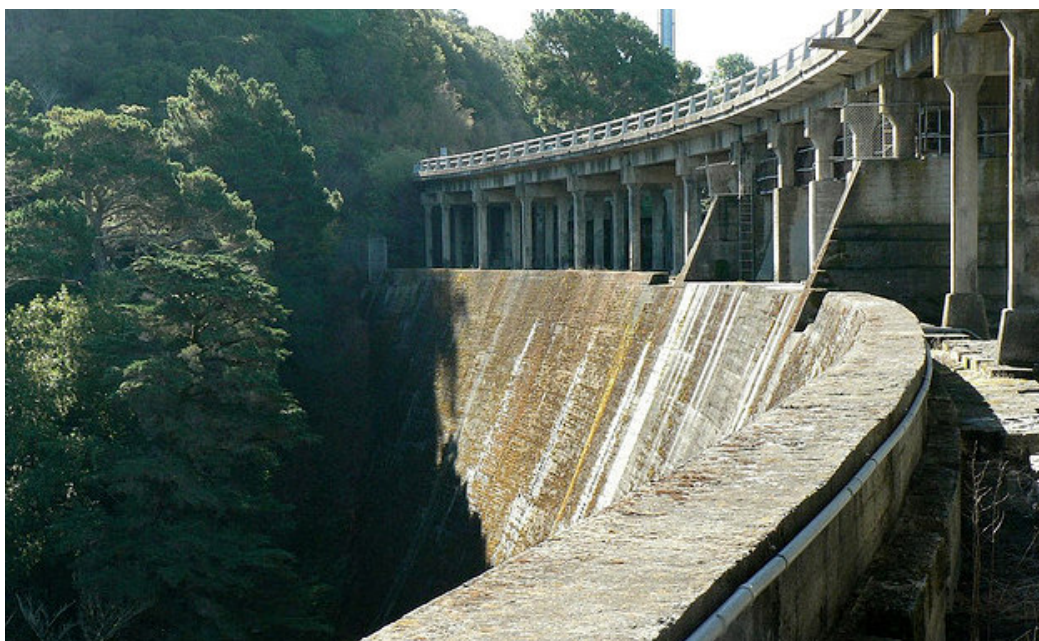
Слика 26. У перспективи блокови за бетонирање [20].

Гравитациона бетонска брана “Лоуер Кристал Спрингс” саграђена је до грађевинске висине од 45 m и била је дуга у круни 183 m. Брана није изведена до краја према пројекту, тако да је ширина њене круне била 13,10 m (по пројекту 7,60 m). Ширина бране у темељу износи 53,6 m. Узводна косина бране је у нагибу 4:1. Пројектант бране и надзорни инжењер у исто време, био је грађевински инжењер Шуслер (Hermann Schussler), Швајцарац по пореклу.



Слика 27. Основа блокова за бетонирање [20].

Већ 1911. године је брана надвишена за два метра, тако да је њена грађевинска висина била 47 m, а дужина у круни на 194 m. Тело бране има запремину од $120\,200\text{ m}^3$ бетона. Са површине слива од $64,5\text{ km}^2$ добијена је запремина воде у акумулацији од $56,2 \cdot 10^6\text{ m}^3$. При највишем нивоу акумулација има запремину од $82,5 \cdot 10^6\text{ m}^3$ воде. Површина акумулације износи око $6,9\text{ km}^2$. Она служи за водоснабдевање града Сан Франциска (San Francisco) [10].



Слика 29. Поглед на гравитациону бетонску брану “Лоуер Кристал Спрингс” и стубове који носе мост преко непреливног дела бране (Paul Carlson, Daily Journal).



Слика 30. Поглед на мост и кулу водозахватне грађевине. У позадини лево је брана (Flickriver Greates Paka Photography's).

Брана је изведена са “двоструким кључ спојницама” (не разделницама). У ламели је било више блокова у правцу узводно-низводно (сл. 24 и 25). Блокови су били висине до 2,75 m и имали су запремину од око 270 m³ бетона.

Шеснаест година по завршетку бране, 18. априла 1906. године, Калифорнију је задесио снажан земљотрес јачине 9-ог и 10-ог степена по скали МКЗ (Меркали-Канкани-Зибег). Овај земљотрес је направио расед “Свети Андреја” (San Andreas) дуг преко 350 km. На појединим деловима раседа смицање терена је износило до 7 m. Брана “Лоуер Кристал Спрингс” је прошла без икаквих оштећења, иако је расед био скоро паралелан попречној оси бране и пролазио око 350 m од бране!

9. БРАНА “БИТАЛУ” (BEETALOO), АУСТРАЛИЈА, 1890.

Гравитациона бетонска брана “Биталу” (Beetaloo) саграђена је 1890. године у Аустралији. Брана је преградила реку Кристал Брук (Crystal Brook) око 15 km узводно од града Кристал Брук (Crystal Brook) у држави Јужна Аустралија (South Australia). Била је највиша бетонска брана јужно од полутара.

Геодетско снимање терена на месту будуће бране и одговарајућа гео-лошка истраживања завршена су до маја 1885. године, указивала су на могућност

грађења гравитационе бране. Хидролошка истраживања, заснована на мерењу протицаја реке у кратком временском периоду, показивала су да протицај реке Кристал Брук није довољан да напуни акумулацију ни једанпут годишње (висина бране је већ била одређена). Преостало је да се вода доводи и из суседних сливова.

Током 1886. године уклањано је растиње са места будуће акумулације. У тим радовима је протекла и 1887. година, па је бетонирање отпочело фебруара 1888. године. Непрекидно се бетонирало до маја 1889. године, када је понестало портланд цемента. Бетонирање је настављено августа исте године и трајало је до завршетка радова октобра 1890. године.

Брана “Биталу” је имала висину над тереном од 32,8 m и дужину у круни 140 m (без прелива). У њу је уграђено 43 400 m³ бетона. Акумулација има запремину од 3,2·10⁶ m³ воде. Површина слива износи 48 km² [21].

Висина од 33,5 m и дужина у круни од 210,3 m. Површина акумулације је 0,33 km² даје се у [22].

Према лит. [17] грађевинска висина бране “Биталу” је 37 m, а дужина у круни 179 m. Акумулација има запремину од 3,680·10⁶ m³ воде. Максималан капацитет линијског слободног прелива на десној обали у продужетку бране износи 80 m³/s.



Слика 31. је начињена 1893. године и представља поглед на акумулацију и гравитациону бетонску брану “Биталу” [21].

Пројектант бране “Биталу” је грађевински инжењер Местајер (Mestayer), а надзор је вршио грађевински инжењер Џобсон (Christopher Jobson).

Да би се повећала запремина акумулације, прелив је 1927. године издигнут за 74 cm. До 1975. године све је било у реду. Али је тада, при пуној акумулацији, наишао поплавни талас и вода је преливала целом дужином бране - око 75 cm изнад круне бране. То је захтевало да се израде нови хидраулички прорачуни и прорачун стабилности.

Али ту није крај приче о преливу гравитационе бетонске бране “Биталу”, јер су каснији хидролошки прорачуни указали на могуће нове поплаве, па је 1986. године део прелива спуштен за још 100 cm, тако да је, део садашњег прелива нижи за 56 cm од



Слика 33. Садашњи прелив саграђен 1986. г. Први прелив из 1890. г. издигнут је 1927. г. за 74 cm. Прелив из 1979. г. је спуштен за 30 cm, да би 1986. г. део прелива био спуштен за још 100 cm [21].



Слика 32. Поглед са десне низводне стране на гравитациону бетонску брану “Биталу” и њен прелив. Снимак је начињен после 1986. године. Према лит. [21].

прелива из 1890. године. То се лепо види на слици 33. На њој је виши део прелива на левој страни слике.

У основи гравитациона бетонска брана “Биталу” је залучена. Изведена је без разделница. У статичким и динамичким прорачунима нису обухваћени сви утицаји и оптерећења, посебно нису узети сеизмички утицаји, нити постојање узгона као код бране „Вирнви“.

У току сто двадесет година постојања, бетон бране је испуцао и кроз прскотине и пукотине је пролазила вода из акумулације. Због тога је 1986. године извршено инјектирање цементом дуж круне бране и прелива.



Слика 34. Поглед на гравитациону бетонску брану “Биталу”, саграђену 1890. године у Аустралији. Фотографија је начињена скоро сто година после завршетка бране [22].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L.M.H.Navier: "Mémoire sur les lois de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques", Mémoires Inst. Natl., Paris (1824); приказ. у Франц. Ак. Наука 1821.
- [2] A.Cauchy: "Exercice de mathématique", Paris, 1827. (у тому из 1827. г. су два чланка: "De la pression ou tension dans un corps solide" и "Sur la condensation et la dilatation des corps solides"; а у тому из 1828. г. је један "Sur des équations qui experiment les conditions d'équilibre ou les lois de mouvement interieur d'un corps solide"; приказани су 1821. г. у Франц. Ак. Наука).
- [3] G. Lamé: "Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides", Paris, 1852.
- [4] J.V.Boussinesq: "Applications des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques", Paris, 1885.
- [5] V.Cerruti: Чланак у Acc. Incei. Mem. Fis. Mat. M., Roma, 1882. .
- [6] N. Smith: "A History of Dams", The Citadel Press, 1972
- [7] Nicholas J. Schnitter: A History of Dams, The useful pyramids, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1994
- [8] Nicholas J. Schnitter: The Development of Dam Engineering in Switzerland, чланак у књизи Swiss Dams – Monitoring and Maintenance, Swiss National Committee on Large Dams: Zurich, 1985.
- [9] Интернет: Upgrading due to Additional Loads
- [10] Интернет: History of Putnam County, Chapter XXVII, Town of Kent, Wikipedia, the free encyclopedia.
- [11] Интернет: Boyd's Corner Dam
- [12] Интернет: Lower Stony Creek Dam, Structurae.
- [13] Интернет: Trip to Abbeystead
- [14] Интернет: Water supplies department – education and community
- [15] Интернет: WSD History photo 04, Dam of Tai Tam at Completion
- [16] Интернет: Weir leak that threatens water supply linked to BHP coalmining
- [17] ICOLD: World Register of Dams 1973, Paris 1973.
- [18] Интернет: Building the Dam, Tower and Tunnels
- [19] Интернет: Casglur Tlysau Gathering the Jewels
- [20] Jerome M. Raphael: Concrete Gravity Dams у књизи Development of Dam Engineering in the United State, бз Pergamon press, New York, 1988.
- [21] E&WS Report: Beetaloo Dam, Historical Account of Construction and Operation, Library Ref. No. 81/32.
- [22] Интернет: SA Water Homepage, Education. Water Storage (Reservoirs in Australia)..

Чланак се наставља у следећем броју

Редиговано 03.10.2011.