

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Юбилейна приложна научно-техническа конференция
„65 години Хидротехнически факултет и 15 години немскоезиково обучение”

6–7 ноември 2014
6–7 November 2014

International Jubilee Conference
„65th Anniversary Faculty of Hydraulic Engineering and 15th Anniversary Hydraulic Engineering in German”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

XLVII ^{ТОМ}
vol.

2014

св.
fasc. I-A

ВЛИЯНИЕ НА БРЕГОВЕТЕ ВЪРХУ НАПРЕГНАТОТО И ДЕФОРМИРАНО СЪСТОЯНИЕ НА КАМЕННО-НАСИПНИ ЯЗОВИРНИ СТЕНИ

Т. Чолаков¹

Ключови думи: язовирни стени, числено моделиране, анализ, изследване

Научна област: хидротехнически съоръжения

РЕЗЮМЕ

В хидротехническата инженерна практика при определяне на напрегнатото и деформирано състояние на насипни стени често се прилага двумерната задача за най-високия профил на стената, като по този начин не се отчитат действителните условия (пространственият ефект) на работа на материалите в тялото ѝ.

В настоящата статия се разглеждат факторите, които влияят върху напрегнатото и деформирано състояние на насипни язовирни стени, като се акцентира доколко и какво влияние оказват формата и видът на бреговете на речната долина. За целта е направена съпоставка между напреженията и деформациите, получени при двумерно и тримерно числено моделиране на каменно-насипни стени с различно очертание на бреговете на речната долина.

1. Въведение

Според ICOLD [1] до настоящия момент в Света има изградени повече от 35000 високи язовирни стени (с височина над 15 m). Според BUNCOLD [2] в България има изградени 216 такива стени. В това число не влизат ниските язовирни стени (с височина под 15 m), които само у нас са около 2000.

¹ Тоньо Чолаков, гл. ас. инж., кат. „Хидротехника”, УАСГ, бул. “Хр. Смирненски” № 1, 1046 София, e-mail: tonyomc_fhe@uacg.bg

До преди няколко десетилетия от миналия век в тесни речни долини са се изграждали предимно дъгови язовирни стени. Това, разбира се, е било обяснимо с факта, че обемите на стените били минимални, благодарение на сводестия ефект, който притежават те и предават по-голяма част от натоварването в скалните брегове и основата. Нерядко обаче били налице и геоложки „изненади”, които налагали по-дълбоки изкопи, значителни укрепителни мероприятия, анкери и т.н. Това често оскъпявало строителството и понякога изисквало преразглеждане на предимствата на дъговите стени. Очевидно е, че представените по-горе причини и част от предимствата на насипните язовирни стени са допринесли за факта, те също да се прилагат в тесни речни долини. Основното предимство на този тип стени, в сравнение с дъговите, е приблизително 10 пъти по-голямата маса, която позволява по-равномерното преразпределяне на натоварването от водата към основата на по-големи площи, както и стабилизирането на скатовете.

Освен че са средство за регулирането на речния отток с цел по-пълноценното му използване, язовирните стени са и потенциално опасни съоръжения, чието евентуално разрушение може да доведе до значителни материални и човешки загуби. За да се предотвратят такива ситуации, човек се стреми непрестанно да усъвършенства методите за тяхното проектиране, технологията им на изграждане и мониторинга по време на експлоатация, като анализира внимателно случващите се процеси и явления и техния принос за общото поведение на конкретната стена.

Оценката на напрегнатото и деформирано състояние (НДС) на насипни язовирни стени е необходимо да бъде направена на фона на процесите и явленията, които влияят на това.

2. Фактори, влияещи върху напрегнатото и деформирано състояние на насипни язовирни стени

Началното напрегнато и деформирано състояние на масива, в който ще се изгражда бъдеща язовирна стена, е първият от факторите, който трябва да се вземе под внимание при изследването на една насипна стена. Винаги преди изграждането на дадено съоръжение обикновено се налага изкопаване и подравняване на основата, което води до разтоварване на част от масива и преразпределяне на напреженията в него.

Аналогичен е случаят с темповете на строителството. Първоначално се е разглеждала стената в пълната ѝ височина, т.е. тя е изградена мигновено. От няколко десетилетия насам благодарение на безпрецедентната компютърна мощ, са на разположение напреднали софтуерни продукти за инженерен и научен анализ. Вече могат да бъдат симулирани различни темпове (етапи) на строителство, като бъдат отчитани както дебелината на полаганите пластове, така и изменението им във времето.

Геоложката основа е следващият фактор, влияещ на НДС на системата стена-основа. Освен по своя вид (скална, полускална или нескална) обуславящ и различна деформируемост, тя може да се характеризира и с различна едро или дребно-блокова напуканост, напастявания или наличие на тектонски разломи, които водят до анизотропия на тази основа.

От съществено значение за НДС е и геометрията на напречния профил на стената. Откосните отношения и наличието на берми по откосите формират площта, върху която ще се преразпредели натоварването в основата. Зонирането на материалите в напречния профил на стената, отношението на техните физико-механични характеристики, наличието на противифилтрационен елемент и неговото местоположение в

тялото, са част от факторите, които могат да доведат до поява на пукнатини, на пластични зони, до преразпределяне на напреженията в системата стена-основа, до суфозия, която от своя страна може да провокира значителни деформации или дори разрушение на стената. Появата на такива неблагоприятни процеси и явления често може да се елиминира с подходящо подбрани по вид и характеристики материали и тяхното правилно поддръждане в профила на стената.

Влиянието на динамиката (изменението) на водното ниво в язовира може да се раздели условно на два етапа. Първият етап е при първоначалното завиряване на язовира. През този етап се наблюдават значителни деформации на насипа, дължащи се на сравнително бързото повишение на водното ниво, което води до увеличаване на натоварването, промяна на теглото и водното съдържание на материалите според пропускливостта им. Вторият етап се характеризира с относително по-малки и циклични колебания на деформациите на насипа, които са във взаимна връзка с колебанията на водните нива в язовира.

До колко и какво влияние върху НДС на насипни стени оказва речната долина със своята форма и вид, и грапавината на бреговете, е сравнително малко и ненапълно изучен фактор, който е обект на настоящото изследване.

3. Методика на изследванията

За реализирането на поставените задачи са извършени последователно следните стъпки: избор на напречен профил на изследваната стена, дефиниране на геометрия и вариации на речната долина, приемане на материални характеристики и модели на деформиране на пластове в стената и основата и създаване на числени 3D модели за приетите варианти, като за целта са използвани възможностите на софтуерния пакет ANSYS.

3.1. Дефиниране на геометрията на стената и формата на речната долина

Напречният профил на стената е приет симетричен, което е нещо обичайно за този тип стени. Височината на стената е избрана 100 m, с цел по-големи натоварвания и оттам по-големи напрежения, за да могат и евентуалните разлики в получените резултати да са по-отчетливи, а не в рамките на допустимите грешки и точност. Откосите са приети без берми, със средно откосно отношение 1:2. Разбира се, при един действителен обект тези и други подробности по профила на стената е добре да бъдат отчетени.

Ядрото е прието тънко и стройно с ширина горе 6,0 m и откоси 1:0,2. При някои стени с тънки ядра са наблюдавани смачквания в горната третина от ядрото, което е причина за избора на такъв противифилтрационен елемент в настоящата работа.

От двете страни на ядрото са разположени обичайните при спрягането между глината и каменния насип минимум два филтърни пласта. Тук те са приети от пясък и чакъл по 3,0 m всеки от тях, като в последните 9,0 m от горния си край се скосяват до ширина 1,30 m.

Други приемания по изследваните напречни профили:

- Липсват нескални почви (алувиални и делувиялни) в основата на стената;
- Не са взети под внимание изкопни работи в скалната основа, а стената е фундирана директно върху нея;

- Стената е изградена мигновено. Не се отчитат отделните етапи на строителството;
- Водното ниво в язовира е прието на кота 195,00, т.е. максимален напор 95 m.

Както бе споменато по-горе, каменно-насипните язовирни стени намират широко приложение както в широки, така и в тесни речни долини. Разбира се, понятията „тесни“ и „широки“ са относителни, но като цяло долините, в които се изграждат този тип стени, могат да се разделят на такива с U и V-образна форма.

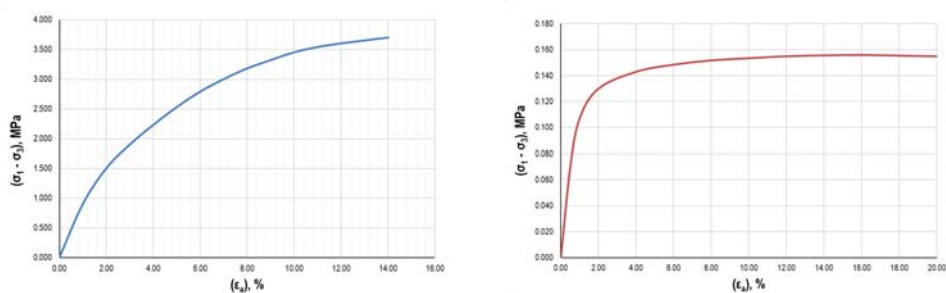
Формообразуващите фактори в природата са основната причина, породила уникалността на всеки един створ, в който съществува или ще бъде изградена нова язовирна стена. Не всеки от тях е със симетрична форма на бреговете или с постоянни наклони по цялата височина на стената. Невинаги геоложките условия по протежението им са еднакви.

Поради практическата невъзможност да се обхванат всички възможни в природата видове речни долини, но за да се установи евентуална връзка между тях и напрегнатото и деформирано състояние на насипни стени, в настоящата разработка са приети следните предпоставки:

- долините са със симетрични брегове;
- широчината им в дъното на реката е приета на 20 m и 40 m;
- широчината им в горния край варира според дължината на короната на стената, която е приета за: 100, 200, 400, 600, 800 и 1000 m;
- дълбочината на скалната основа под стената е приета 100 m;
- дължината на скалния масив е 800 m (в посока вода-въздух), което обуславя по минимум 200 m речна долина в горен и долен участък;
- широчината на скалния масив варира между 400 m и 1200 m в зависимост от широчината на речната долина.

3.2. Материални характеристики

Данните, използвани при нелинейния анализ на разглежданите случаи, представляват обобщени резултати от различни литературни източници. Взети са под внимание триаксиални изпитвания на материалите на язовирна стена El Infiernillo Мексико, използвани в [5], организирана от ICOLD и физико-механичните характеристики на материалите вложени в яз. ст. Камчия. Използвани са нелинейните връзки между напрежения и деформации на скалния насип и на ядрото, представени на фиг. 1.



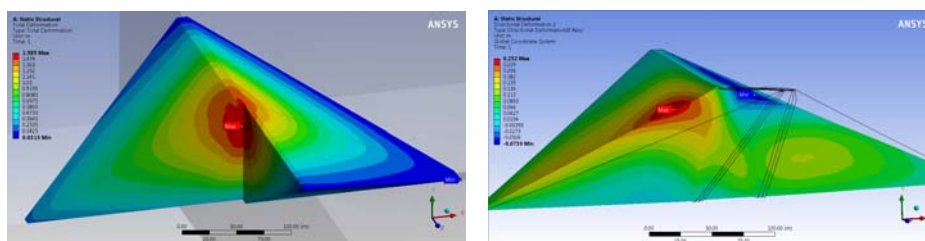
Фиг. 1. Зависимости между напрежения и деформации на скалния насип и на ядрото

4. Резултати от изследванията

Резултатите от проведените изследвания на 12-числени 3D и един 2D модела на каменно-насипни стени с вертикално глинено ядро, са обобщени и анализирани. За целта е направена съпоставка между получените стойности на преместванията, напреженията и деформациите на равнинния модел и тримерните модели при различна ширина на речната долина. Представени са взаимовръзки между получените величини и формата на долината, изразена с отношението между дължината по короната на стената L [m] и широчината на долината в основата на стената l [m] (L/l).

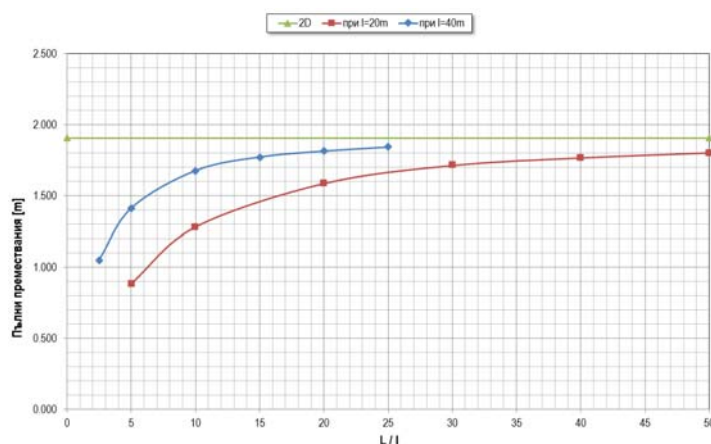
- Премествания в тялото на стената и основата

Получените са стойности на преместванията по трите направления на глобалната координатна система X , Y , Z и пълни (сумарни) премествания. При всички изследвани модели максималните стойности се получават в горната третина от стената, като пълните премествания се намират в ядрото, където в тази му част то е тънко и податливо на смачкване. Съвсем понятно, максималните хоризонтални премествания в направление нормално на оста на стената се получават в скалния насип от водния откос, където той се деформира заедно с ядрото вследствие на значителния хидростатичен натиск от водата (фиг. 2).



Фиг. 2. Пълни премествания и премествания по ос X

Абсолютните стойности обаче на тези премествания се повлияват значително от широчината на речната долина и това е видно от графиката на фиг. 3.

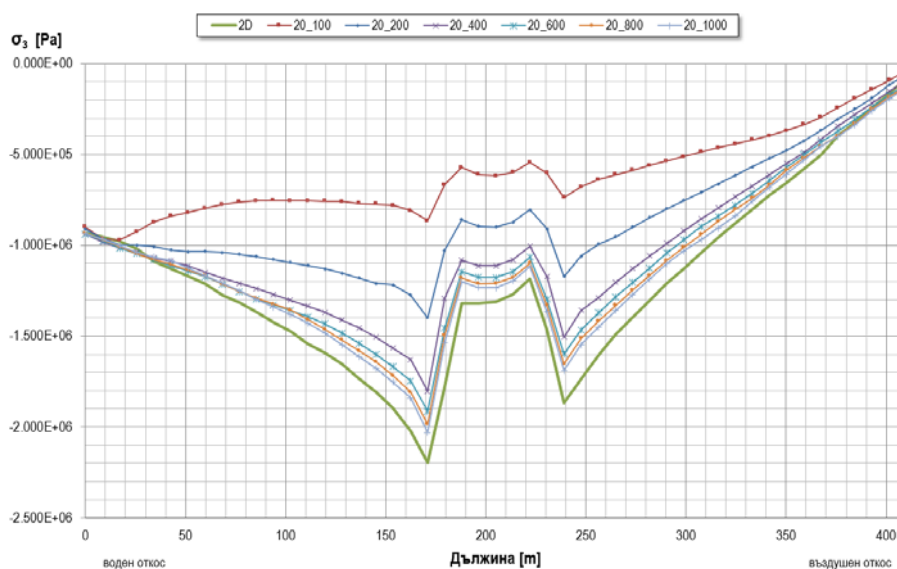


Фиг. 3. Връзка между максималните пълни премествания и широчината на речната долина

Колкото е по-тясна речната долина и са по-стръмни нейните брегове, толкова по-ясно е изразено засводяването от тях, като разликата в стойностите на пълните премествания може да достигне до 55–50% от тези, получени при двумерно изследване (червена крива при $L = 20$ m). Вижда се, че нарастването на преместванията расте нелинейно и с отваряне на долината в горния ѝ край, то се стреми да тангира към получената стойност при двумерно НДС (зелена линия). Същият характер има и кривата при по-широка речна долина ($L = 40$ m – синя крива), като колкото е по-широка тя, толкова по-бързо се стреми да достигне стойността, получена при равнинната задача.

- **Напрежения в тялото на стената**

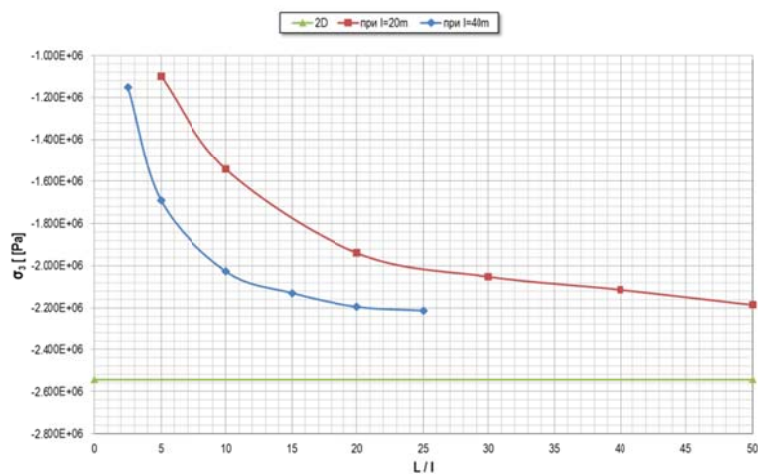
Аналогична картина се получава и с напреженията, като съществен интерес за нас в случая представляват стойностите им в тялото на стената. Тук също ясно е изразен сводестият ефект при тесните долини. Поради пространствената работа на насипа и различната деформируемост на материалите в тялото на стената, се наблюдава известно преразпределяне на напреженията.



Фиг. 4. Главни максимални (натискови) напрежения σ_3 в основата на стената при долина 20 m

На фиг. 4 са представени главните максимални натискови напрежения (в случая означени със σ_3 и знак “-“) в равнината на фундиране при долина с $L = 20$ m, които търпят значително редуциране, за сметка на лекото им завишение в по-горните нива в стената, незначителни пластични деформации и нарастване на срязващите напрежения в насипа по бреговете особено при по-стръмните такива. Видно е, че разликата в стойностите на напреженията в централния най-висок профил може да достигне до 50% в ядрото и до 60% в скалния насип от водна страна спрямо резултатите от равнинното изследване, показани със зелената крива.

Връзките на максималните натискови напрежения с формата на долината, показани на фиг. 5, също имат нелинеен характер, но за разлика от пълните премествания, те обаче достигат до стойности около 2,20 МРа, които представляват около 87% от получената при равнинната задача стойност 2,54 МРа.



Фиг. 5. Връзка между главни нормални максимални (натискови) напрежения и широчина на речната долина

5. Заключение

От проведените редица изследвания и обобщаване на получените резултати могат да се направят следните изводи и заключения:

- Формата на речната долина влияе върху напрегнатото и деформирано състояние на каменно-насипни стени с вертикално глинено ядро;
- Колкото е по-тясна долината и по-стръмни са скатите, толкова по-силно се изразява засводяващият ефект вследствие на което някои напрежения и деформации могат да се редуцират с до 50% от получените при равнинно изследване;
- При двумерното напрегнато и деформирано състояние се получават като цяло по-големи стойности на напреженията и деформациите от тези, получени при 3D изследване, поради неотчитане на пространствената работа на материалите; Полегатите брегове и при тесни долини от своя страна могат да намалят влиянието на този пространствен ефект, като стойностите на получените напрежения могат да се различават от тези при равнинната задача с около 15%.
- В зависимост от физико-механичните показатели на вложените материали и конфигурацията им в напречния профил, засводяването от своя страна може да доведе до поява на пукнатини по върхната част на конструкцията (короната), което трудно може да бъде отчетено при равнинно изследване;
- За всеки конкретен случай обаче, трябва да се подхожда индивидуално. При възможност е необходимо да се отчитат повече фактори, за които е доказано, че влияят по един или друг начин върху поведението на язовирните стени. Взаимодействията на тези фактори могат в значителна степен да изменят действителната или предполагаема (при проектиране) картина на напрегнатото и деформирано състояние на язовирната стена.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ICOLD* (International Commission on Large Dams). <http://www.icold-cigb.net/>.
2. *BUNCOLD* (Bulgarian Committee on Large Dams). <http://buncold.bg/>
3. *ICOLD – Bulletin 53*. Static Analysis of embankment dams, 1986.
4. *David M. Potts, Lidija Zdravkovic*. Finite element analysis in geotechnical engineering – Theory, 1999.
5. *ICOLD*. Third Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dam, Paris, 1994
6. *Toshev D., T. Cholakov*. On the Long Term Behaviour of Rockfill Dams. Proc. of 2nd International Conference LONG TERM BEHAVIOUS OF DAMS, 12–13 October 2009, Graz, Austria, p.5.
7. *Тошев, Д., Германовя Т., колектив от кат. „Хидротехника” при УАСГ*. Числено моделиране на филтрационни и стабилитетни проблеми при язовирни стени от местни материали с отчитане на нелинейното поведение на насипа, Проект № ТН-560/95г.

INFLUENCE OF THE RIVER BANKS ON THE STRESS AND STRAIN STATE OF ROCKFILL DAMS

T. Cholakov¹

Keywords: *dams, numerical modeling, analysis, research*

Research area: *hydraulic structures*

ABSTRACT

In the hydraulic engineering practice in determining the stress and strain state of embankment dams, the two-dimensional task for the highest cross-section of the dam is often used thus not taking into account the actual conditions (spatial effect) of work of the materials in the dam body.

This paper examines the factors that affect the stress and strain state of embankment dams, focusing on how and what influence the form and type of the banks of the river valley exert. For this purpose, a comparison is made between the stresses and deformations obtained in two-dimensional and three-dimensional numerical modeling of rockfill dams with different outline of the river valley banks.

¹ Tonyo Cholakov, Chief Assist. Prof. Eng., Dpt. “Hydraulic Engineering”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tonyomc_fhe@uacg.bg