

Получена: 15.10.2017 г.

Приета: 20.11.2017 г.

ОТНОСНО ДИНАМИЧНОТО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЧВА-КОНСТРУКЦИЯ

С. Тасев¹

Ключови думи: язовирни стени, динамика, коефициенти на затихване

РЕЗЮМЕ

Динамичното взаимодействие между инженерните конструкции и техните основи е обект на внимание на редица изследователи от дълги години. Една от целите е определянето на пълното и на геометричното затихване на трептенията при сеизмични въздействия.

В настоящия доклад е разгледано едно от ранните изследвания по темата, докладвано от японския учен Хироши Тажими през 1969 г. Представена е връзката между това изследване и сегашното разбиране на проблема.

Даден е пример с добре позната конструкция, изградена върху слаба основа. Изводите от приложението на предлагания подход са обобщени с цел да се обърне внимание на проблемите с динамичното взаимодействие при високи сгради.

Описани са критериите, използвани за определяне на динамичното взаимодействие почва-конструкция. Първият критерий доказва съответствието между честотите на измерените затихващи и изчислените незатихващи трептения. Вторият критерий определя момента на възникване на геометрично затихване. Третият критерий определя способността на основата да притежава свойството геометрично затихване.

Използвани са данни от пълномащабни динамични тестове на язовирната стена Чаира. По идеята на Тажими са направени графични построения за две бетонни язовирни стени – Пайн Флет и Чаира. Въз основа на сравнението между тях е избран вертикален сеизмичен профил на основата на изследваната стена, който е използван за изчисляването на честотно зависими коефициенти на геометричното затихване при пълно и при празно язовирно езеро.

Направеният анализ и получените резултати показват, че основните положения в предложението за определяне на геометричното затихване са целесъобразни и могат

¹ Стефан Тасев, доц. д-р, e-mail: stefan.g.tasev@gmail.com

да осигурят получаването на честотно зависими коефициенти на пълното и на геометричното затихване на трептенията.

1. Увод

Ако приемем за отправна точка края на 19 век, когато Рейли предлага формула за определяне на пропорционално на коравината и на масата затихване, намерила много голямо приложение в динамиката на съоръженията, то към настоящия момент може да се твърди, че темата за затихването отдавна е надхвърлила 100 години. Този дълъг период от време предполага наличие на огромен обем литературни източници по темата. За начало на систематичното изучаване на проблемите с взаимодействието почва-конструкция може да се разглеждат работите на Suyehiro, Sesawa и Kanai, Biot и др. от ранните 1932 – 1936 г. [1]. Според Kausel теорията за динамичното взаимодействие между почва и конструкция е била предложена от Reissner през 1936 г. [2]. Това са много стари и практически недостъпни материали, до които можем да се докоснем благодарение на цитираните обширни литературни прегледи. Трябва да се отбележат и работите на Crouse [3], Jennings и Bielak [4] и много други. Проучване на честотата на появяване на публикации по темата в докладите, изнесени на Световните конференции по сеизмично инженерство (WCEE), сочи, че от 40 доклада на първата конференция (1956 г.), броят им достига до 1440 на дванадесетата конференция (2000 г.) [1]. Броят на публикациите по темата вероятно се е удвоил, като се има предвид, че през 2016 г. в Чили бе проведена 16-та конференция. Очевидно е, че такъв голям обем информация е непосилно да бъде обхваната и оценена в пълнота.

На 4 WCEE, проведена през 1969 г. в Чили, Hiroshi Tajimi докладва теоретични и експериментални изследвания на динамичното поведение на пилот и на обвивка на ядрен реактор, извършени от него на база на 3-D теория за вълново разпространение в еластичен пласт, покриваш твърд слой [5].

През 1974 г. Raul Flores-Berrones защитава дисертация по темата, а през 1977 г. докладва изследванията си [6], които се основават на работата на Tajimi, наречена от Flores-Berrones теория на гъвкавите пилоти, вградени в еластичен слой.

Интересно е да се отбележи, че на тези два доклада не е обърнато внимание както в [1] и в [2], така и в много други работи. В работите, в които са цитирани, не се акцентира върху използването на 3-D теория за вълново разпространение [7 – 11]. Например в [7] акцентът е върху използваните модели на основите, които са съпоставени с едноплатовия модел на Tajimi, а за използваната 3-D теория е посочено, че тя е в нейната ранна детска възраст, като по този начин се отричат резултатите, получени от Tajimi. В работите на няколко японски автори [8, 9, 10] е разгледано регистрирано взаимодействие на система почва-фундамент по време на тест с принудени трептения и при земетресение. От тях се разбира, че Tajimi още през 1959 г. е предложил тази теория, в която се приема, че затихването в материала на конструкциите е пренебрежимо малко. В [11] се споменава, че това са приблизителни аналитични формулировки без да се навлиза в дълбочина на проблема.

В настоящия доклад е представен и оценен посоченият по-горе ранен опит за определяне на геометричното затихване. Направени са графични построения по подобие на получените от Tajimi, въз основа на което е направена съответната оценка.

Цел на настоящата работа, освен оценката на подхода на Тажими за определяне на динамичното взаимодействие почва-конструкция и нейното усъвършенстване чрез

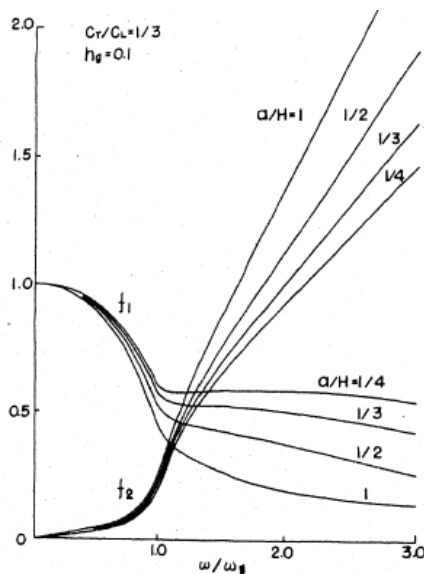
допълване и прилагането на съвременни резултати и схващания за явлението, е да се представи практически пример за определянето на геометричното затихване.

Представените резултати се основават на проведени по-рано теоретични изследвания [12, 13] и оценка на резултати от експериментални изследвания публикувани в специализираната литература.

2. Описание и критика на някои резултати на Тајімі

Hirosi Tajimi предлага опростен подход, представяйки „Приблизителен метод за инженерни цели”, резултатът от който е илюстриран с показаната оригинална фиг. 1. На нея по ординатната ос са показани обозначенията C_L и C_T – скорости на разпространение на надлъжната (L) и на напречната (T) сеизмични вълни, а h_g е коефициент на затихване. По абсцисната ос е нанесено отношението между текущата честота ω и най-ниската кръгова честота на повърхностния слой ω_g . Пилотът е моделиран като цилиндрично твърдо тяло, вградено в пласт на дълбочина H , имащо радиус на напречното сечение a . Въведена е функцията $G_i(f_1 + if_2)$, зависи от отношението a/H и от коефициента на Поасон на почвата. Чрез тази функция се отчитат динамичните ефекти при промяна на параметрите ω/ω_g и a/H . Прави впечатление, че два от основните параметъра – h_g и отношението C_T/C_L са обозначени като константи, като приемането $h_g=0$ е в съответствие с теорията на Тајімі, докато обозначението $C_T/C_L=1/3$ може да се разглежда като техническа грешка, както ще бъде показано по-долу.

Интерес представлява видът на кривите f_1 – реалната част от комплексната функция ($f_1 + if_2$). Кривите f_1 започват от $C_T/C_L=1$ при липса на сеизмично въздействие ($\omega=0$), а при $\omega/\omega_g=1$ те променят своя ход, т.е. налице са пресечни точки между двете части на кривите. Като основна тенденция може да се каже, че реалната част f_1 , която дава пружинната коравина, намалява с нарастването на ω в обхвата $\omega/\omega_g < 1$ и се стреми към константа в зависимост от a/H при $\omega/\omega_g > 1$.



Фиг. 1. Графики на функциите f_1 и f_2 по Тајіми [5]

Имагинерната част f_2 , която описва геометричното затихване, не е значителна в обхвата $\omega/\omega_g < 1$, но нараства силно с нарастването на ω след $\omega/\omega_g > 1$. Важно е да се отбележи, че от показаната графика не е ясно каква е дименсията по ординатната ос, а показаните на нея стойности са в противоречие със съвременното схващане за явлението.

Flores-Berrones потвърждава резултатите на Tajimi, а именно, че при честоти под основната честота на почвата няма геометрично затихване, чието физическото тълкуване е, че при ниски честоти системата не генерира вълни, разсейващи енергия. В допълнение към посочения по-горе резултат, получен от двамата, Flores-Berrones прави извода, че значително хоризонтално геометрично затихване съществува, когато принудените честоти са по-големи от основната честота на почвения пласт, но е много малко (теоретично нула), когато са по-малки. Най-важният извод се отнася до коравината на изследваните системи, който според Tajimi е, че коравината намалява с нарастването на ω в обхвата от $\omega/\omega_g = 0$ до $\omega/\omega_g < 1$, а след определена стойност на това отношение коравината се стреми към константа. В подкрепа на своите изводи двамата автори представят различни графични илюстрации, които не са подкрепени със съответните числени резултати. За съжаление и двамата автори не са успели да получат честотно-зависими коефициенти на затихване, въпреки че изрично са посочили това като своя цел. Flores-Berrones е изчислил само една стойност, която се оказва, че е грешна – в предложената формула без каквото и да е обяснение е пренебрегната определената от него ефективна маса (виж дискусията в края на доклада [6]).

При по-подробно разглеждане на фиг. 1 възникват въпроси, за да се отговори на които е необходимо да се анализира начина на получаване на някои специфични точки – единиците и нулите по абсцисната и по ординатната оси.

Очевидно, при $\omega/\omega_g = 0$ системата е в покой – няма сеизмично въздействие, няма възбудени трептения, няма и затихване, откъдето следва, че единицата по ординатната ос е нереална. Тя може да бъде изчислена по някакъв приблизителен начин, но не и да бъде получена чрез измерване.

Единицата по абсцисната ос ($\omega/\omega_g = 1$) е по-лесна за получаване, като обяснението е свързано с тълкуването на понятието най-ниска собствена честота на повърхностния слой (ω_g). Други автори са използвали израза преобладаваща честота на почвата. В съвременните изследвания тези изрази се използват рядко. По-често се използва израза движение на свободното поле, свързан с получаването на кръстосано-корелирани спектри [1]. Тези спектри потвърждават предположението за момента на възникване на геометрично затихване, който е пряко свързан с наличието на пресечна точка и в графиките на Tajimi. Интересното в случая е, че Tajimi не дава обяснение за промяната в хода на получените от него криви, докато в [1] този момент е отбелязан, но е пренебрегнат, поради по-ранни твърдения на авторите, че геометрично затихване може да съществува и при нисшите честоти на трептене, т.е. при $\omega/\omega_g < 1$.

В съвременната литература могат да бъдат намерени потвърждения на най-важния извод на Tajimi. През 1999 г. Lestuzzi докладва изследвания, въз основа на които е определена долната граница на загуба на коравина при натоварване до разрушение [14], при което кривата, която илюстрира явлението, е подобна на втората част от кривата на функцията f_1 при $\alpha/H=1$, показана на фиг. 1.

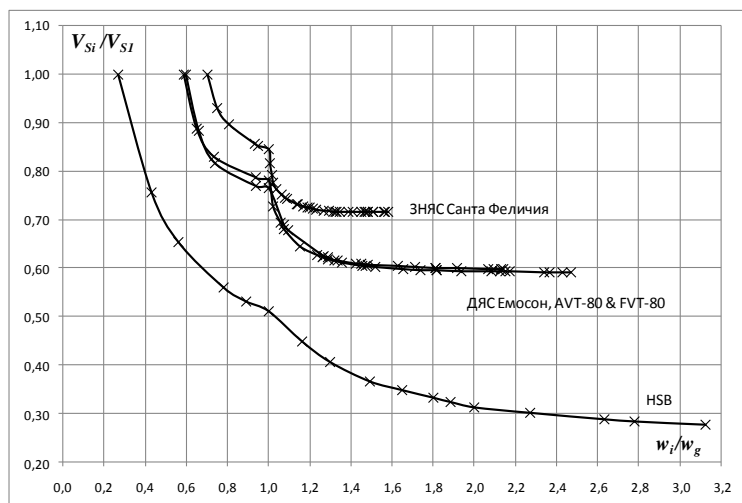
Въз основа на направения преглед може да се каже, че Tajimi е поставил основите на теорията на динамичното взаимодействие почва-конструкция, акцентирайки върху вълновите свойства на основата. За съжаление, не бяха намерени други негови публикации по темата.

За да бъдат проверени описаните по-горе елементи от построението на Тајімі, бе направен опит за получаване на подобни графики въз основа на получени по-рано резултати от приложението на авторския Метод за идентифициране и прогнозиране на динамичните характеристики (МИП) [12, 13] при изследване на динамиката на язовирни стени. Те дават отговор на някои от въпросите и позволяват да се направят съответните изводи относно динамичното взаимодействие почва-конструкция.

3. Някои резултати от съвременни изследвания по Тајімі

Описаната идея на Тајімі бе приложена за земно-насипната язовирна стена Санта Феличия, за два теста на дъговата язовирна стена Емосон и за една сграда в Калифорния (HSB – Hollywood storage building) и др., показани на фиг. 2. В резултатите от числените изследвания на тези съоръжения се съдържа информация за ефективните модули на еластичност и на срязване, както и за изчислените чрез тях скорости на вторичната сеизмична вълна [15 – 17], които, поради големия им обем, не са показани тук.

На фиг. 2 са дадени четири криви, имащи характерния за МИП вид с обща пресечна точка между двете части на всяка крива, като с \times са показани местата на използваните в изследванията честоти на трептене. За да се получи единицата по абсцисната ос скоростта на вторичната сеизмична вълна за всяка честота е разделена на скоростта на първата честота на трептене. По този начин на практика се получава отношението V_{Si}/V_{S1} , представляващо нормиране на скоростите. Това нормиране позволява лесно да се сравнят получените криви за избраните конструкции, които се различават много една от друга и трудно могат да бъдат сравнени по друг начин. Това е нов за МИП начин за представяне на динамичните характеристики, който ще бъде използван по-късно. От сравнението между фиг. 1 и фиг. 2 се виждат голямата близост между двете фигури и някои особености в динамичното поведение на изследваните обекти, но преди това трябва да се отбележи, че в тези криви не се съдържа информация за затихващите способности на конструкциите, обаче, както е посочено в [5], може да се съди за влиянието на основите върху тяхното динамично поведение.



Фиг. 2. Обща графика на зависимостта между нормираната скорост на сеизмичната вълна V_{Si}/V_{S1} във функция на нормираната честота ω_i/ω_g

Интересно е да се отбележат разликите във вида на първата част на кривите от фиг. 2 (при $\omega_i/\omega_g < 1$) в сравнение с тази от фиг. 1, а те са, че кривите от фиг. 2 са вдлъбнати, докато във фиг. 1 те са изпъкнали и по вид се доближават до част от окръжност (т.е. за построяването им не са използвани достатъчен брой данни), а началото на всяка крива от фиг. 2 е различно, поради това, че $\omega_1 \neq 0$.

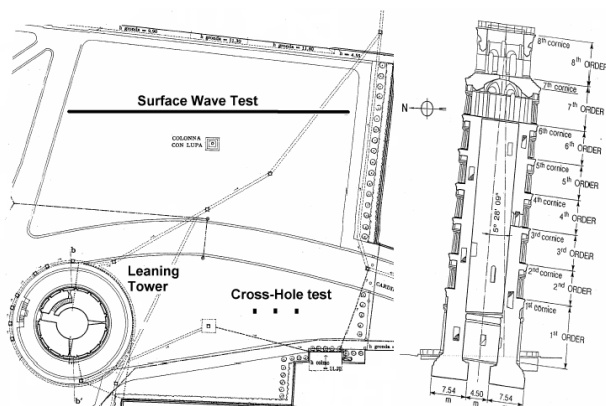
Основната разлика е във вида на използваните за построенията честоти на затихващите трептения. Очевидно Tajimi е разполагал с ограничен брой измерени честоти, поради което е използвал аналитична функция, с която се е опитал да прогнозира липсващите честоти – тази липса е очевидна в обхвата от нула до $\omega_i/\omega_g = 1$, в който видът на кривите е близък до част от окръжност. Във фиг. 2 за построяването на кривите са използвани по-голям брой честоти, поради което видът им е друг.

От вида и разположението на кривите, показани на фиг. 2, може да бъде направен следният основен извод: с нарастването на масата на конструкциите кривите се разполагат по-високо, докато с нарастването на коравината им те се разполагат по-ниско. От този извод става ясно защо Tajimi не е получил подобна графика за изследвания от него ядрен реактор – тези конструкции имат сравнително малка маса и твърде толяма коравина, от което следва, че кривата в участъка след $\omega/\omega_g = 1$ вероятно ще се разположи в тесната зона на отношението V_{Si}/V_{S1} от 0,1 до 0,3 – с други думи близо до долната граница, посочена от Lestuzzi [14].

4. Пример за конструкция върху компрометирана основа

Проблемите с наклонената кула в Пиза, Италия, са световно известни. Само като илюстрация за важността на познаването на параметрите на основата тук са показани две фигури, взети от дисертацията на Foti [18]. На фиг. 3 е показана скица с разположението на кулата, нейния напречен разрез и местата, в които са били проведени някои от сондажните проучвания на терена и измерванията на скоростта на сеизмичните вълни.

На фиг. 4 са показани три профила, третият от които е много показателен по отношение на т.нар. компетентност на основата – това е вертикалният сеизмичен профил на почвата в основата на наклонената кула в Пиза [18]. При него се вижда много ясно, в сравнение с първите два, че скоростта на вторичната сеизмична вълна започва да намалява още при дълбочина около 8 m (по-слаба носещата способност на долулежащите почвени пластове).

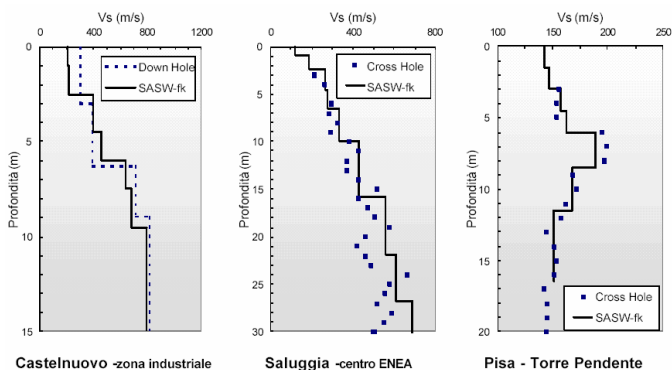


Фиг. 3. Скицанатерена и вертикален разрез на кулата в Пиза [18]

Както може да се прецени от показания на фиг. 3 разрез, основите на кулата достигат приблизително до тази критична дълбочина. В цитирания източник липсват данни за построяване на графиките за изменението на плътността и на модула на срязване, поради което не може да бъде изчислен критерия на Wolf и Song [19], но за показания профил той най-вероятно няма да бъде изпълнен.

Ако за наклонената кула в Пиза имаше данни за плътността на почвата в основата и за честоти и форми на трептене, каквито могат да бъдат намерени за някои други исторически паметници, би било много интересно да се изследва нейното динамично поведение. За съжаление, въпреки наличието на няколко добре регистрирани европейски земетресения, както и на добре развитите техники за регистрация на околни смущения, за този интересен обект не са известни никакви данни.

Показаният пример илюстрира важноста на оценката на носимоспособността, в частност на способността на строителните почви да отвеждат сеизмичните вълни.



Фиг. 4. Пример за слаба основа на наклонената кула в Пиза [18]

Предвид появилите се напоследък у нас желаниа за строителство на високи сгради е необходимо да бъде обърнато сериозно внимание на строежа на земната основа, за да не се получат нежелателни последици. Друг важен елемент, имащ отношение към строителството на високи сгради, е създаването на нормативна база, задължаваща да бъдат инсталирани и поддържани автоматични станции за регистрация на околни и сеизмични смущения.

5. Описание на използваните критерия

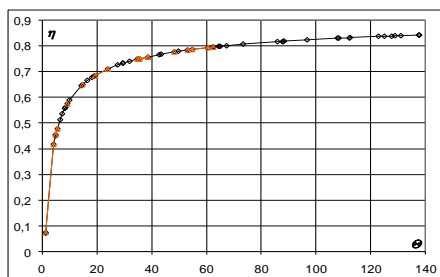
Подходът, използван за определянето на геометричното затихване на трептенията на строителните конструкции, се основава на Метод за идентифициране и прогнозиране на динамичните характеристики (МИП) [12] и неговото по-късно разширение [13]. В основата на метода стои идеята за построяването на графика, описваща хода на изменение на оскъдните [20] регистрираните периоди на трептене и тяхното уплътняване с изчислени по МКЕ периоди. Тази графика е наречена резонансна ходова крива (РХК). Тя се състои от две криви с обща пресечна точка, разделяща периодите на нисши и висши [21]. Графиката позволява с лекота да се определят периодите на незатихващите трептения като основен параметър за определяне на пълното (тоталното) затихване на трептенията. В разширението на МИП [13] се анализират основните елементи, характеризирани динамичното взаимодействие почва-конструкция: удължаване на периодите на

трептене, деградация на коравината [15], нарастване на обема на разтрептеяната маса от основата [16, 17] до достигането до идеята за определянето на честотнозависимо геометрично затихване, при което се използват елементи от линейната теория на вълновото разпространение – вълнови числа, скорости на сръзващата вълната и др.

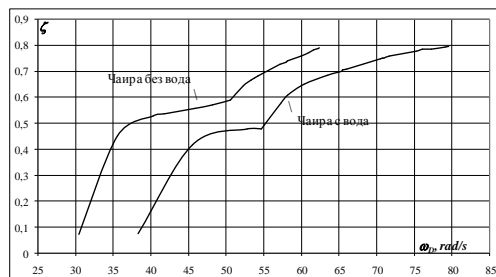
Геометричното затихване се определя въз основа на три критерия. Първият критерий се основава на зависимост, предложена в [22], с която се доказва съответствието между измерените честоти на затихващите и на изчислените честоти на незатихващите трептения [23]. Вторият критерий се отнася за момента на възникване на геометрично затихване. Определя се от мястото на пресечната точка в резонансната ходова крива. За неговото определяне могат да бъдат използвани и кръстосано-корелирани спектри [1] от записи на измерени ускорения в три точки – при свободното поле, при короната и в основата. Чрез третия критерий се определя способността на основата да притежава свойството геометрично затихване, т.е. да отвежда вълните на трептене [19]. Определя се чрез т. нар. вертикален сеизмичен профил (ВСП), който описва плътността, модула на сръзване и скоростта на сеизмичната вълна V_S във функция на дълбочината на основата. Описаните критерии се прилагат като разширение на създадения от автора метод [13], оформяйки подход за изследване на динамичното взаимодействие почва-конструкция и давайки като краен резултат честотнозависими коефициенти на геометрично затихване. Описаният подход е приложен за бетонната гравитационна язовирна стена Чаира, подложена на динамични изследвания преди около 25 години. Принудените трептения на стената са били предизвикани чрез взривни натоварвания при пълно и при празно язовирно езеро. Резултатите от тези тестове са описани в [24], където са показани получените резонансни ходови криви и графиките на пълното затихване на трептенията за двата теста – с вода и без вода в язовирното езеро.

5.1. Първи критерий

За да се приложи първият критерий е необходимо често пъти оскъдните данни от динамични изследвания и особено от сеизмични въздействия да бъдат обогатени и уплътнени. След получаването на РХК следва определяне на периодите на незатихващите трептения (T_U). Резултатът подлежи на проверка, която се явява пряко приложение на първия критерий. Критерият е приложен за 14 теста на 7 язовирни стени [25], при което е доказано, че получените точки лежат на една и съща крива. Резултатът за двата теста – с вода (триъгълници) и без вода (ромбове) са показани на фиг. 5, като $\theta = T_D/T_U$, $\eta = \exp(\alpha T_U/2)$ е множител на затихване на трептенията, а α е коефициент на съпротивление. С долен индекс „D” са отбелязани периодите (или честотите) на затихващите трептения, а с долен индекс „U” – съответно на незатихващите трептения.



Фиг. 5. Зависимост θ - η за стената Чаира по Лойцянский и Лурие



Фиг. 6. Честотнозависими коефициенти на затихване за язовирната стена Чаира

Удовлетворяването на този критерий е важен момент при изчисляването на коефициентите на пълното затихване и затова е наречен ключов [23].

Видът на кривата, показана на фиг. 5, дава увереност, че идентифицираните и прогнозираните честоти на затихващите и на незатихващите трептения са правилно определени. Въз основа на този резултат са изчислени коефициентите на пълното затихване ζ за двата теста на язовирната стена Чаира (фиг. 6). Пресечните точки в кривите на фиг. 6 показват момента на възникване на геометрично затихване.

5.2. Втори критерий

Известно е, че по време на тестовете на стената Чаира, със специално монтирани акселерометри, са били регистрирани движения в точки от основата и створа на стената. Може да се предположи, че са били регистрирани и движения на свободното поле, или поне параметрите на постъпващата към стената взривна вълна. За съжаление, вече над 25 години след проведените тестове, няма публикувани подобни данни. Обширните натурни динамични изследвания, въпреки използваната модерна техника, не съдържат кръстосано-корелирани спектри. Тази липса се компенсира чрез предложения в [21] критерий за разделянето на честотите на нисши и висши и неговото разширение като критерий за момента на възникване на геометрично затихване [15 – 17].

5.3. Трети критерий

Моделът на основата трябва да съответства на глобалната информация, получаваща от натурните динамични изследвания на язовирните стени – честоти и форми на трептене, т.е. да е достатъчно информативен, но и достатъчно опростен, за да бъде и общо-приложим. Основание за този избор е видът на получаваните РХК, показващи общи характерни черти и тенденции в динамичното поведение на различни конструкции, построени върху земна основа, в това число различните видове язовирни стени, някои високи сгради и други инженерни съоръжения.

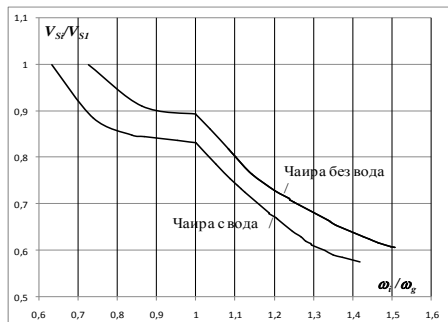
Чрез употребата на вертикални сеизмични профили се цели да бъде избегната крайно-елементната дискретизация на различните обеми от основата, участващи в трептенията при различните форми на трептене, както и елиминирането на проблемите и ограниченията, свързани с описването на контактната повърхност и изкуствено налаганите гранични условия.

Wolf и Song [19] са предложили аналитичен критерий за съществуване на геометрично затихване, който има вида $k=1-g/2+m/2$. Проведено е изследване на вертикални сеизмични профили по данни от литературни източници чрез модифициран критерий на Wolf и Song за съществуване на геометрично затихване [26]. Показано е, че опитът за пряко прилагане на модифицирания критерий на Wolf и Song е сполучлив, както и че строителните почви, като част от земната кора, притежават характерното свойство да отвеждат енергията на сеизмичните вълни.

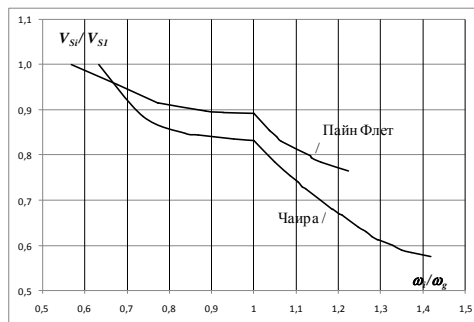
След сравняване на построенията по Тажими за някои от изследваните язовирни стени се оказва, че липсата на вертикални сеизмични профили може успешно да бъде компенсирана.

Описаните критерии са обединени в единен подход, който е приложен за двата динамични теста на язовирната стена Чаира, а резултатът е показан на фиг. 7. На фиг. 8 са показани две криви, също построени по идеята на Тажими, за две бетонни язовирни стени (Пайн Флет, САЩ, и нашата стена Чаира).

Въз основа на близостта между двете криви, показани на фиг. 8, за определяне на геометричното затихване е избран вертикалният сеизмичен профил, използван за същата цел при изследването на стената Пайн Флет [13, 16, 17].



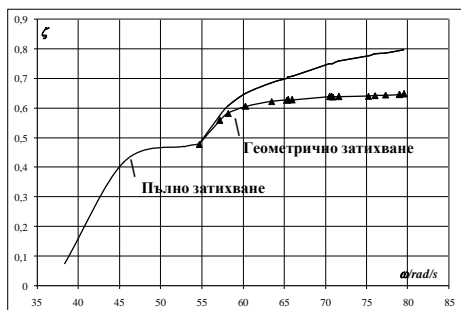
Фиг. 7. Чаира с вода и без вода, построение по Тажими



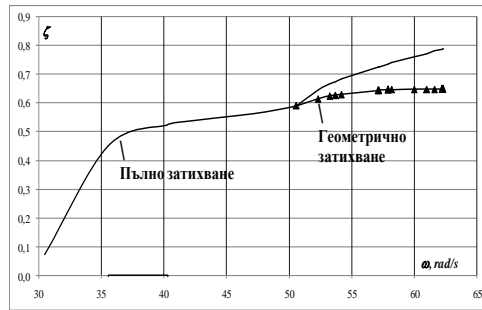
Фиг. 8. ПайнФлет и Чаира с вода, построение по Тажими

6. Определяне геометричното затихване на стената Чаира

За изчисляването на честотнозависими коефициенти на геометрично затихване по разработения подход се правят няколко приемания, чрез които се въвеждат нови честотнозависими параметри. Това са радиус на включените в трептенията обеми от основата, период на трептене на тези обеми, вълнови числа. Обосновката за тяхното въвеждане и начина на определянето им са дадени в [13], както и в няколко доклада [15 – 17], в които получаването им е представено в табличен вид. Тези данни, поради големият им обем, не са показани тук.



Фиг. 9. Пълно и геометрично затихване на стената Чаира, тест без вода



Фиг. 10. Пълно и геометрично затихване на стената Чаира, тест с вода

На фиг. 9 е показан видът на кривата, описваща хода на изменение на честотнозависимите коефициенти на пълното затихване, както и предполагаемият вид на кривата, описваща геометричното затихване на трептенията (черни триъгълници) на бетонната язовирна стена Чаира по време на тест с принудени трептения при липса на вода в язовирното езеро.

На фиг. 10, подобно на фиг. 9, са дадени двете криви на затихване на трептенията на бетонната язовирна стена Чаира по време на тест с принудени трептения при наличие на вода в язовирното езеро.

Както се вижда от фиг. 9 и фиг. 10, основният принос към затихването на трептенията на язовирната стена Чаира е дисипацията на енергия в материала на стената (бетона) – до появата на пресечните точки в двете криви, а след тях и в материала на системата стена-основа. Участъкът между двойките криви след пресечните точки онагледява приноса на геометричното затихване на основата към пълното затихване.

Получените резултати могат лесно да бъдат актуализирани при наличие на споменатите по-горе вертикален сеизмичен профил и особено на кръстосано-корелиран спектър, като първият може да бъде направен допълнително, за разлика от втория.

Според мнението на някои водещи учени определянето на геометричното затихване представлява академичен интерес. Продължаващите над сто години опити са показали, че прякото му определяне не е по силите както на изследователите, така и на създателите на програми за числени изследвания, поради невъзможността в последните да бъдат въведени съответните оператори, което не означава, че програмите с провалят. Напротив – те могат да направят и правят само това, което програмистът е предвидил.

По аналогия с предложения от Вестергард метод за отчитане на влиянието на водата чрез присъединени маси и неговата реализация по Метода на крайните елементи, предложена по-късно от Зенкевич, може да се предположи, че при достигане на определено ниво на усъвършенстване на решението с използване на вълновата теория, предлаганият подход за определяне на геометричното затихване чрез присъединени променливи трептящи обеми от основата ще намери своята програмна реализация.

7. Изводи и заключения

Направен е анализ на едно ранно изследване на динамичното взаимодействие почва-конструкция. Въз основа на този анализ са получени подобни резултати, даващи основание да се смята, че това ранно изследване е сполучлив опит за обяснение на явленияето и добра основа за бъдещи търсения, както и шанс за усъвършенстване на МИП и на подхода за определяне на динамичното взаимодействие почва-конструкция.

Изследвано е динамичното взаимодействие между бетонната язовирна стена Чаира и нейната основа. За целта е използван авторски подход, обогатен с предложена от японския учен Hiroshi Tajimi идея, на базата на която е направен избор на вертикален сеизмичен профил, описващ скоростта на разпространение на сеизмичната вълна в основата на стената.

Показан е рядко срещан в литературата пример за влиянието на основата върху състоянието на построена върху нея конструкция, от което следва, че изучаването на взаимодействието, вкл. динамичното, представлява не само академичен, но и съществен практически интерес.

Подходът за определяне на геометричното затихване представлява логично продължение и усъвършенстване на разработения по-рано Метод за идентифициране и прогнозиране на динамичните характеристики на язовирните стени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Trifunac, M., Todorovska, M., Hao T.-Y.* Full-scale experimental studies of soil-structure interaction – A review. Proc. 2nd U.S.-Japan Workshop on Soil-Structure Interaction, Tsukuba City, Japan, 2001.
2. *Kausel, E.* Early history of soil-structure interaction. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30, 822–832.
3. *Crouse, C.* Energy dissipation in soil-structure interaction. 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, 2000.
4. *Jennings, P., Bielak, J.* Dynamic of building-soil interaction. California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory, Report EERL 72-01, Pasadena, California, 1972.
5. *Tajimi, H.* Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Chile, 1969, 3, A6-53 – A6-69.
6. *Flores-Berrones, R.* A theoretical approach for computing radiation damping in endbearing pile foundation. 6th World Conference on Earthquake Engineering, India, 1977, 2, 1583-1589.
7. *Wong, H.* Dynamic soil-structure interaction. Technical Report: Caltech EERL: 1975, EERL-75-01, California Institute of Technology, 1975.
8. *Ishida, K., Tamori., S.* Dynamic characteristics of soil-foundation interaction detected from forced vibration test. 8th World Conference on Earthquake Engineering, California, 1984, 3, 881-888.
9. *Ishida, K.* Dynamic characteristics of soil-foundation interaction system detected from forced vibration test and earthquake observation. // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1985, 13, 799-825.
10. *Wu, G.* Dynamic soil-structure interaction: Pile foundation and retaining structure. Dissertation, University of British Columbia, Canada, 1994.
11. *Gazetas, G.* Seismic response of end-bearing single piles. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1984, 3, 82-93.
12. *Tasev, C.* Метод за идентифициране и прогнозиране на динамичните характеристики на гравитационни язовирни стени. Дисертация, София, 2002.
13. Динамично взаимодействие между язовирните стени и техните основи с отчитане на геометричното затихване. Научен отчет, Архив на ИВП-БАН, София, 2007.
14. *Lestuzzi, P.* Effective stiffness of RC walls in dynamic tests. 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, England, 2002.
15. *Tasev, S., Grigorov, S., Tzenkov, A.* Dam-foundation interaction – stiffness degradation and radiation damping estimation during an earthquake. International Symposium “Operation, Rehabilitation and Up-grading of Dams”, 76th Annual Meeting of ICOLD, Sofia, Bulgaria, 2008.
16. *Tasev, S.* Dynamic soil-structure interaction: I. Two criteria and their experimental confirmation. 10th Jubilee National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 2005, Vol. II, 315-319.

17. *Tasev, S.* Dynamic soil-structure interaction: II. An applied engineering approach for radiation damping determination. 10th Jubilee National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 2005, Vol. II, 320-325.
18. *Foti, S.* Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PhD dissertation, Politecnico di Torino, Italy, 1999.
19. *Wolf, J., Song, C.* To radiate or not to radiate. // Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25, 1421-1432.
20. *Tasev, C.* Резултатите от натурните динамични изследвания – оскъдица или изобилие. Научно-техническа конференция с международно участие “Строителни конструкции – теория и практика”, Велико Търново, 2002, 6.1–6.8.
21. *Tasev, C.* Критерий за оценка на трептенията на гравитационните язовирни стени като нискочестотни и високочестотни. National Scientific Conference with International Participation “WaterResourcesUse and Protection”, Sofia, 1998, 373-378.
22. *Лойцянский, Л., Лурье, А.* Курс теоретической механики. М., Наука, 1983.
23. *Tasev, C., Григоров, С., Ценков, А.* Периодите на незатихващите трептения на язовирните стени – ключ за определяне на коефициентите на затихване. Юбилейна международна научно-техническа конференция „65 години Хидротехнически факултет и 15 години Немскоезиково обучение”, УАСГ, 2014.
24. *Tasev, C.* Някои характерни особености в динамичното поведение на бетонните язовирни стени. 7-ми конгрес по язовирно строителство, Семково, 2002.
25. *Tasev, C.* Относно периодите на незатихващите трептения на язовирните стени: получаване, доказателство, приложение. XIII-та международна научна конференция ВСУ’2013, София, 2013, 1, 354-359.
26. *Tasev, C.* Някои физически характеристики на почвата и тяхното значение за динамичното взаимодействие почва-конструкция, Трета национална конференция с международно участие „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения – DCB 2004”, Пловдив, 2004.

ON THE DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION

S. Tasev¹

Keywords: *dams, dynamics, damping coefficients*

ABSTRACT

The dynamic interaction between engineering structures and their foundations has been the focus of many researchers for many years. One of the objectives is to determine the total and radiation damping of vibration in seismic impacts.

¹S. Tasev, Assoc. Prof. Dr., e-mail: stefan.g.tasev@gmail.com

The paper examines one of the early investigations on the topic, reported during 1969 by Hiroshi Tajimi. The relationship between this study and the current understanding of the problem is presented.

An example is given for a well-known construction built on a weak foundation.

The lessons learned from the application of the proposed approach, in particular in the light of the example examined, have been summarized in order to address the issues of dynamic interaction in construction of high-rise buildings.

The criteria used to determine the dynamic soil-structure interaction are described. The first criterion proves the correspondence between the measured frequencies of damped and calculated frequencies of undamped vibrations. The second criterion determines the moment of radiation damping origin. The third criterion determines the ability of the foundation to have the radiation damping property.

Data from full scale dynamic tests on a Chaira dam is used. Graphical constructions following the Tajimi's idea are made for two concrete dams – Pine Flat dam and Chaira dam. Based on the comparison, a vertical seismic profile of investigated dam foundation is selected. It is used to calculate frequency-dependent damping coefficients at full and empty dam lake.

The performed analysis and obtained results show that the underlying assumptions of the recently proposed approach to damping determination is appropriate and can provide frequency-dependent coefficients of the total and radiation damping.