



Получена: 14.05.2021 г.

Приета: 16.08.2021 г.

## ОПИТНА ПОСТАНОВКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ФОРМАТА НА ОСНОВНАТА ПЛОСКОСТ ВЪРХУ НОСЕЩАТА СПОСОБНОСТ НА ЗЕМНАТА ОСНОВА ПРИ ПЛОСКОСТНИ ФУНДАМЕНТИ

Ц. Иванов<sup>1</sup>, М. Тодоров<sup>2</sup>

*Ключови думи:* носеща способност на земната основа, плоскостни фундаменти, фактори на формата, експериментална постановка

### РЕЗЮМЕ

През изминалите десетилетия са извършени редица изследвания за определяне на носещата способност на земната основа при различни типове фундаменти. Настоящото изследване цели постигането на по-ясни и точни дефиниции за прилагане на прогнозните аналитични техники при определяне на носещата способност на земната основа при несвързани почви като се фокусира върху влиянието на формата на основната плоскост. Изследванията имат за цел допълване на аналитичните подходи с емпирични сравнения, получени чрез изследвания на моделни мащабни товарни плоскости. Носещата способност на земната основа е функция на формата на фундамента, като тази зависимост се отчита чрез бездименсионните коефициенти за формата на основната плоскост  $s_c$ ,  $s_q$  и  $s_y$ . Фокус на изследванията е прецизирането на стойността на коефициентите на формата.

### 1. Въведение

Плоскостните фундаментни конструкции са най-разпространеният начин на фундиране. Широката им употреба е резултат от приложимостта им при широк спектър от сгради и съоръжения, технологията на изпълнение (конвенционална), положението им

---

<sup>1</sup> Цветан Иванов, докторант инж., кат. „Геотехника”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: cvetan\_ivanov@mail.bg

<sup>2</sup> Мирослав Тодоров, доц. д-р инж., кат. „Геотехника”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: miro\_todorof@yahoo.com

спрямо терена (плитки) и вече утвърдения опит от прилагането им. Този тип финансиране се използва в три основни варианта – единични, ивични (скаррови) и фундаментни плочи. Категоризацията им е базирана на огъвната коравина на конструкцията на фундамента. В този смисъл единичните фундаменти могат да се разглеждат като такива с голяма огъвна коравина ( $EI \approx \infty$ ), а ивичните и плочестите – като огъваеми. Отчитането на коравината на фундамента е важен елемент от анализа на взаимодействието на фундамента със земната основа [1 ÷ 6].

Плоскостните фундаментни конструкции контактуват със земната основа под тях чрез хоризонтална или наклонена (под малък ъгъл) основна плоскост. Натоварванията от връхната конструкция се предават върху земната основа главно чрез основната плоскост на фундамента [1].

Носещата способност на земната основа  $q_{ult}$  ( $R_{ult}$ ) е най-голямото контактно напрежение, което земната основа (масивът) може да мобилизира преди да се развие механизъм на разрушение. Определянето на това гранично натоварване (контактно напрежение) е задача на общата устойчивост на почвите чрез уравненията на теорията на граничното равновесие. Изследването за носеща способност протича с избор на изчислителен модел и описание на напрегнатото и деформираното състояние [1, 3, 7].

Граничното натоварване е утвърден в практиката метод за оценка на крайното гранично състояние на земната основа. То следва да се разглежда като недопустимо за съоръжението, тъй като съответства на пълно изчерпване на носещата способност на почвата, развитие на зони, в които се наблюдава разрушение на скелета – частично или изцяло под фундамента. Тези процеси могат да се съпътстват от образуване на кораво ядро (при корави фундаменти), следствие от уплътнението на част от масива. Развитието на вертикалните и хоризонталните деформации на земната основа и изтласкването на почвата в страни от фундамента по образували се хлъзгателни повърхнини са физически установими ефекти в разглеждания механизъм и моделна интерпретация [7, 8].

Интересно е да се отбележи, че при големи слягания или пропадания земната основа под единичен фундамент, ако не се разруши, а се развие уплътняване, достига до ново равновесно състояние (но при нови гранични условия). Независимо от това, такива натоварвания са недопустими за някои от съоръженията. Още един факт е от значение: деформациите на уплътняване са затихващи, докато във фазата на граничното състояние, съпътствано от аухетис ефекти, преместванията са незатихващи [7, 9].

От многобройните изследвани случаи е достигнато до извода, че за да се достигне до загуба на устойчивост, е необходимо слягането да достигне от 3 до 15% от ширината на фундамента [2 ÷ 6].

Загубата на носещата способност на земната основа при плоскостни фундаменти е едно от основните гранични състояния, съгласно БДС EN 1997-1, което следва да се причисли към крайните гранични състояния (ULS – крайни гранични състояния), и съгласно стандарта е причислено към геотехническите състояния (GEO състояния) [10, 11].

Методите и подходите за определяне на носещата способност на земната основа представят последователност от решения и емпирични зависимости, установени в годините. За изследване на носещата способност на земната основа са известни множество решения, като използваните в момента зависимости са получени при съвместния труд на серия изследователи – Prandtl, Terzaghi, Meyerhof, Brinch Hansen и др.

Общият вид на уравнението за определяне на носещата способност на плоскостни фундаменти при дренирани условия съгласно Hansen (1970) [12] е

$$R_{ult} = V_{ult} = B' \cdot L' \cdot q_{ult}, \quad (1)$$

$$\text{където } q_{ult} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q + 0,5 \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma. \quad (2)$$

В зависимост от формата на фундамента се променя носещата способност на земната основа, като тази промяна се отчита чрез бездимензионните коефициенти за формата на основната плоскост  $s_c$ ,  $s_q$  и  $s_\gamma$ . Те са част от тройната  $N$  формула към влиянието на кохезията, геоложкия товар над нивото на фундиране и частта от масива под фундамента. Повечето от известните в литературата коефициенти за формата са полуемпирични, като различните изследователи нямат единно виждане за стойностите на коефициента на формата ( $s$ ) и отчитането на влиянието на деформираното състояние на земната основа. Ограниченията при тези изследвания произтичат от мащабните ефекти и тяхното приложение за подходящи за изследване материали (хомогенни, изотропни и в редица случаи несвързани) [7].

Ако формата на основната плоскост на фундамента не е безкрайно дълга ивица, а правоъгълна плоскост с ширина  $B$  и дължина  $L$ , обичайните фактори за корекция на носещата способност на земната основа са отново серия от бездимензионни коефициенти [7]. За отношение  $B/L \cong 0$  (ивичен фундамент) зависимостите дават стойност на коефициентите  $s \cong 1$ , които са в съответствие с основните резултати за безкрайна ивица (двумерен случай). Аргументите за стойности, по-големи от 1 на коефициентите  $s_c$  и  $s_q$  се съдържат в резултатите от наблюденията в поведението на почвата под товарната плоскост. Тези резултати подсказват, че част от масива извън обхвата на товарната плоскост също се деформира, а това води до завишаване на носещата способност [7].

Коефициентът  $s_\gamma$  е по-малък от 1, защото изпитванията са показали, че за правоъгълна плоча, положена в пясък, плъзгателната повърхнина е по-плитка от случая на ивична основа, при която плъзгателната повърхнина е по-дълбока [7].

В табл. 1 са представени познати (представени от редица изследователи), както и в БДС EN 1997-1, стойности и зависимостите за бездимензионни коефициенти, отчитащи формата на основната плоскост при определяне на носещата способност на земната основа под плоскостни фундаменти [10, 12, 13].

Проектирането на земната основа и фундаментите, а така също и изпълнението на тази част от строителството, е една сложна и комплексна задача, която трябва да се решава със съвременни методи. Ефективното прогнозиране и оценката на поведението на съоръженията при плоскостно фундиране в контекста на различни въздействия са основни средства за обезпечаване на експлоатационните изисквания за дълготрайност и превенция на потенциално възможни нарушения и повреди. Винаги следва въпросът „достатъчно ли е това“?

Съвременните комплексни системи за проектиране (нормативната база) почиват на отминалия опит и целят защита на човешкия продукт от природни и антропогенни влияния. Това означава, че опитът трябва постоянно да бъде събиран и обобщаван с непрекъснато усъвършенстваните технологични средства, с което да се допълват различни детайли и аспекти на познанието за естествената материя (почвената среда) и нейната изменчивост. Важно е да се отбележи, че за разлика от конвенционалните материални среди (антропогенните), които използваме в строителните конструкции, естествените (дисперсните почвени и скалните масиви) могат да бъдат само „изучавани – наблюдавани“. Ние не сме в състояние да проектираме чрез нарочни средства в широки мащаби качествата на естествените материали и винаги трябва да държим под внимание инвазивното влияние на прилаганите мерки за промяна на качествата на естествената среда.

Към настоящия момент в практиката се прилагат методики за прогнозиране на поведението на земната основа под плоскостни фундаменти. Наличието на множество методи, включително и стандартизирани, предполага тяхната специфична насоченост към определен аспект и невъзможността на една процедура да опише целия комплекс от взаимовръзки и явления.

**Таблица 1. Бездимензионни коефициенти, отчитащи формата на основната плоскост на фундамента при определяне на носещата способност [10, 12, 13]**

Terzaghi (1943)	<p>За ивичен фундамент: <math>s_c = 1,0</math>; <math>s_\gamma = 1,0</math>                      За квадратен фундамент: <math>s_c = 1,3</math>; <math>s_\gamma = 0,8</math>                      За кръгъл фундамент: <math>s_c = 1,3</math>; <math>s_\gamma = 0,6</math>                      За правоъгълен фундамент (Terzaghi &amp; Peck (1967)): <math>s_c = 1 + 0,3 \frac{B}{L}</math>; <math>s_\gamma = 1 - 0,2 \frac{B}{L}</math></p>
Meyerhof (1963)	<p>За <math>\varphi = 0^\circ</math>: <math>s_c = 1 + 0,2 \frac{B}{L}</math>; <math>s_q = s_\gamma = 1,0</math>                      За <math>\varphi \geq 10^\circ</math>: <math>s_c = 1 + 0,2 K_p \frac{B}{L}</math>; <math>s_q = s_\gamma = 1 + 0,1 K_p \frac{B}{L}</math></p>
Hansen (1970)	<p><math>s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B'}{L'}</math>; <math>s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin \phi</math>; <math>s_\gamma = 1 - 0,4 \frac{B'}{L'} \geq 0,6</math>                      За ивичен фундамент: <math>s_c = s_q = s_\gamma = 1,0</math></p>
Vesić (1973, 1975)	<p><math>s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B}{L}</math>; <math>s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi</math>; <math>s_\gamma = 1 - 0,4 \frac{B}{L} \geq 0,6</math>                      За ивичен фундамент: <math>s_c = s_q = s_\gamma = 1,0</math></p>
Michalowski (1997)	<p><math>s_c = 1 + (1,8 \tan^2 \phi + 0,1) \left( \frac{B}{L} \right)^{0,5}</math>  <math>s_q = 1 + 1,9 \tan^2 \phi \left( \frac{B}{L} \right)^{0,5}</math>                      За <math>\varphi \leq 30^\circ</math>: <math>s_\gamma = 1 + (0,6 \tan^2 \phi - 0,25) \frac{B}{L}</math>                      За <math>\varphi &gt; 30^\circ</math>: <math>s_\gamma = 1 + (1,3 \tan^2 \phi - 0,5) \left( \frac{L}{B} \right)^{1,5} e^{-\left( \frac{L}{B} \right)}</math></p>
Приложение D (информационно) на БДС EN 1997-1:2005	<p>За правоъгълни: <math>s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin \phi'</math>; <math>s_\gamma = 1 - 0,3 \frac{B'}{L'}</math>; <math>s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}</math>                      За квадратна или кръгла форма: <math>s_q = 1 + \sin \phi'</math>; <math>s_\gamma = 0,7</math>; <math>s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}</math></p>

При сега действащата нормативна база [10] проектирането на плоскостни фундаменти се извършва основно чрез директни аналитични процедури, с които моделно се изследва всяко гранично състояние. Крайното гранично състояние се моделира чрез интерпретация на физическия механизъм на разрушаване. Това е основното изискване на т. 6.4 (5) на БДС EN 1997-1 за проектиране на плоскостни фундаменти и на т. 6.5.2 на БДС EN 1997-1, за проверка за носеща способност при плоскостни фундаменти, където основно се прилагат аналитични методи.

Предвид познатите изследователски техники и техните възможности, в настоящата изследователска разработка се реализира комбинирана маломасщабна постановка за третиране на носещата способност на земната основа при моделни плоскостни фундаменти.

## 2. Цел и методика на изследването

Изградената изследователска постановка е разработена въз основа на реализация на измервателни техники и процедури, които се използват широко в практиката. Постигането на целите се основава на използването на конвенционални измерватели средства с широко приложение при натурни изпитания – изпитване с натоварваща щампа /PLT/ или пробно натоварване. Изброените два директни метода за изпитване се доближават максимално близко до работата на плоскостните фундаменти.

Разработената постановка е изградена в лабораториите на катедра Геотехника на УАСГ-София, като изследователските модели се създават в лабораторна среда и са развита в материал с контролируеми параметри (несвързана почва – речен пясък).

Постановката е проектирана за изследване на поведението на моделни плоскостни фундаменти с различна форма (кръгла, квадратна и правоъгълна), които са разположени на повърхността на почвата, следователно тя позволява да се изследва изменението на коефициента на формата  $s_f$  (отчитащ приноса на теглото на почвата), но не и на коефициента на формата  $s_c$  (отчитащ приноса на кохезията на почвата). С минимални усилия изследователската постановка би могла да се модифицира и за изследване на вкопани фундаменти и/или отчитайки влиянието на допълнителен товар, разположен на нивото на фундиране, като по този начин ще се позволи и изследване на изменението на коефициента на формата  $s_q$  (отчитащ приноса на допълнителното натоварване на нивото на фундиране).

При изпитването на моделните плоски фундаменти чрез опитната постановка се описва и регистрира промяната на слягането им под действие на централно разположено натисково натоварване, но може да се приложи и върху нецентрално натоварени натискови фундаменти. В бъдещи изследвания се предвиждат и изпитвания на модели на пилотни фундаменти и pile-raft системи.

За (индиректно) измерване на преместването (слягането) на моделните фундаменти ще се използват индуктивни сензори за линейно преместване (LVDT displacement transducer), като преди измерването е необходимо всеки от използваните сензори да се тарира, като се определи мащабният фактор, представляващ отношение на напрежението на разбаланс на моста ( $\Delta V_{out}$ ), съответстващо на единица преместване на осовия прът на сензора (измерено слягане;  $\Delta L = \Delta s$ ). Резултатите от сляганията, получени от индуктивните сензори по време на изпитванията посредством аналогово цифровия преобразувател в реално време се записват, което позволява своевременна обработката и визуализация на резултатите по време на опитите.

За (индиректно) измерване на прилаганото от хидравличния цилиндър допълнително натоварване върху моделните фундаменти по време на изпитването ще се използва контролният манометър (с точност от 10 bar) на свързаната и контролираща цилиндъра ръчна хидравлична помпа с работно налягане до 700 bar.

И двата типа измервателни прибори (за измерване на слягането и натоварването) са добре познати в практиката, удобни са за тарирание и управление, както и за четене и запис на резултатите.

Всички предвиждания в изследователския модел са съобразени с капацитета на приборите, като се следи и за прилагането на аналитични техники за начален избор на параметрите и тарировъчни процедури за всяка от измервателните постановки.

Получените резултати от опитите се анализират чрез сравнения с формираните аналитични модели.

За всяко изпитване се предвижда изпразването на почвата от контейнера на опитната постановка и последващото му напълване наново с уплътнена на пластове почва с цел гарантиране на близки характеристики на изпитваната почва при всяко едно от из-

питванията. За подготовка на почвата в контейнера за всяко едно от изпитванията е разработена работна програма с технологична последователност на отделните етапи (описани в точки 2 и 3).

За провеждане на всяко изпитване за носещата способност на моделните фундаментни образци е разработена работна програма с технологична последователност на отделните етапи (описана в точка 2), като за основа на работната програма е приет американският стандарт ASTM D 1194 – 94 [14], широко използван и при други моделни изпитвания за определяне на носещата способност на плоскостни фундаменти.

С проучването на проблематиката авторите на проекта намират поставените задачи като имащи принос с конкретно научно и практическо приложение при използването на плоскостни единични фундаменти в решението на следните задачи:

- прецизиране на геометрията на модела за изследване на носещата способност при различни форми на основната плоскост;
- изследване на коефициентите, участващи във факторите на формата  $s_f$ ;
- изследване на горните две направления при различно ниво на уплътненост на земната основа;
- изследване на геометрията на модела за определяне на носещата способност на земната основа при различни дълбочини на фундиране.

Проектните цели са част от направлението за изследване в дисертационния труд „Натурно определяне на носещата способност и контактната реакция при плоскостни фундаменти” на докторант инж. Цветан Иванов.

Програмата на изследването се развива в двугодишен период (в два етапа) без да има претенции за всеобхватност и общовалидност. Тази членимост и последователност се диктува от необходимото време за реализация на процедурите по изследването.

С отчитане на тези особености изследванията се развиват в следните два етапа:

- **Първи етап** (2020 г.), при който се извършват предварителни дейности по подготовка и определяне на параметрите на програмата на изследванията, както и се разработва опитна постановка.
- **Втори етап** (2021 г.), при който се предвижда изпитването на моделните образци и обработка и анализ на получените от изпитването данни.

За провеждане на изпитването за определяне на носещата способност на моделни фундаментни образци, както и за опорна система на натоварващата система на опита се използва съществуваща опитна постановка за изпитване на анкери (изготвена по договор финансиран от ЦНИП при УАСГ през 2014 г.) [15], разположена в лабораторията по Скална механика към катедра Геотехника на УАСГ. За целите на настоящите изследвания съществуващата опитна постановка предварително е подобрена и модифицирана, като напълно се запазва и първоначалното ѝ приложение.

Подобренията и модификациите на съществуващата опитна постановка са извършени в периода октомври – декември 2020 г. и се изразяват в следното:

- изготвяне и монтаж на нова стоманена опорна греда за опора на натоварващ хидравличен цилиндър;
- монтаж на натоварващ хидравличен цилиндър;
- изготвяне на четириточкова винтова система за повдигане и сваляне на съществуващата стоманена щампа (с размери 625/1420 mm – фиг. 1), която ще се използва за подготовка (уплътняване на пластове) на почвата в опитната постановка преди всеки опит;

- изготвяне на система от опорни стоманени греди, използвани за монтаж на измервателни устройства (индуктивни сензори за линейно преместване), с възможност за регулиране на местоположението на сензорите в план и по височина;
- изготвяне на стоманен цилиндър/удължител и компенсиращи стоманени подложни планки за прилагане на натоварването.

Изследванията се изпълняват за 7 бр. новоизготвени стоманени фундаментни моделни образци (натискови плочи – фиг. 1 и 2) със следните форми и размери:

- 2 бр. квадратни – 160/160 mm и 200/200 mm;
- 2 бр. кръгли –  $\varnothing 160$  mm и  $\varnothing 200$  mm;
- 3 бр. правоъгълни – 160/560 mm, 160/640 mm и 160/720 mm.

Всички моделни образци са изготвени от листовата стомана клас S355JR, по БДС EN 10025-2, като кръглите и квадратните образци (поради по-малките им размери) са изготвени от листовата стомана с дебелина 20 mm, а правоъгълните образци от листовата стомана с дебелина 30 mm.



**Фиг. 1. Опитна постановка с размери 625/1420 mm**

Габаритите на избраните моделни образци попадат в категорията на единичните плоски фундаменти, които са често използвани при изпълнение на плитко фундиране по монолитна или сглобяема технология.

При изпитването по-големите кръгли или квадратни моделни фундаменти ще се закоравяват чрез поставяне върху тях на по-малките моделни фундаменти със същата форма.

При изпитването на правоъгълните моделни фундаменти ще се закоравяват чрез разполагане върху тях на товароразпределяща стоманена греда, като допълнително двата по-дълги правоъгълни моделни фундаменти се закоравяват.

На база на избраните геометрични размери и предвиденото закоравяване при изследването всички фундаменти образци могат да се причислят към коравите фундаменти.



**Фиг. 2. Кръгли и квадратни стоманени моделни фундаментни образци (натискови плочи) с размери  $\text{Ø}160 \text{ mm}$ ,  $\text{Ø}200 \text{ mm}$ ,  $160/160 \text{ mm}$  и  $200/200 \text{ mm}$**



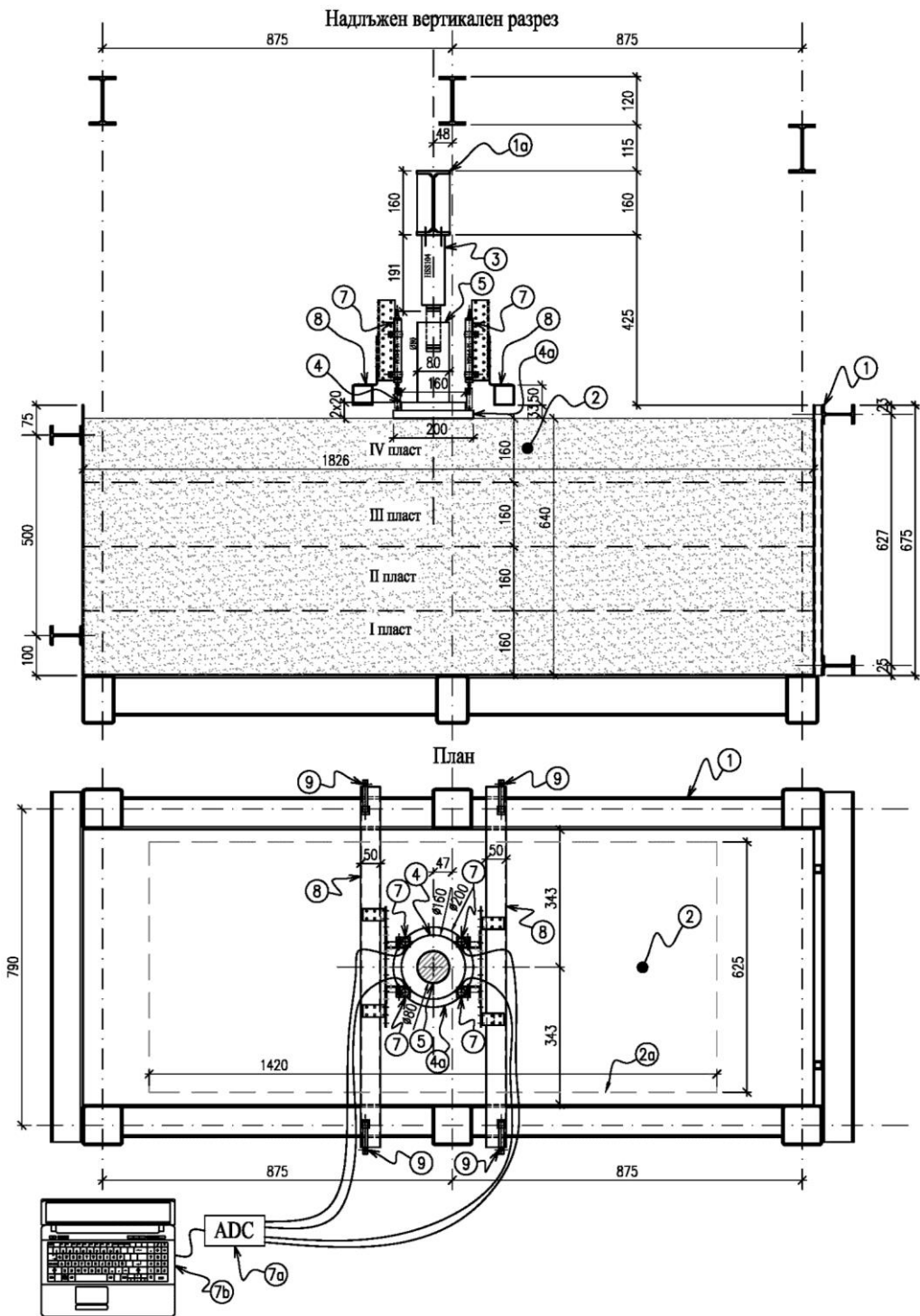
**Фиг. 3. Правоъгълни стоманени моделни фундаментни образци (натискови плочи) с размери  $160/560 \text{ mm}$ ,  $160/640 \text{ mm}$  и  $160/720 \text{ mm}$**



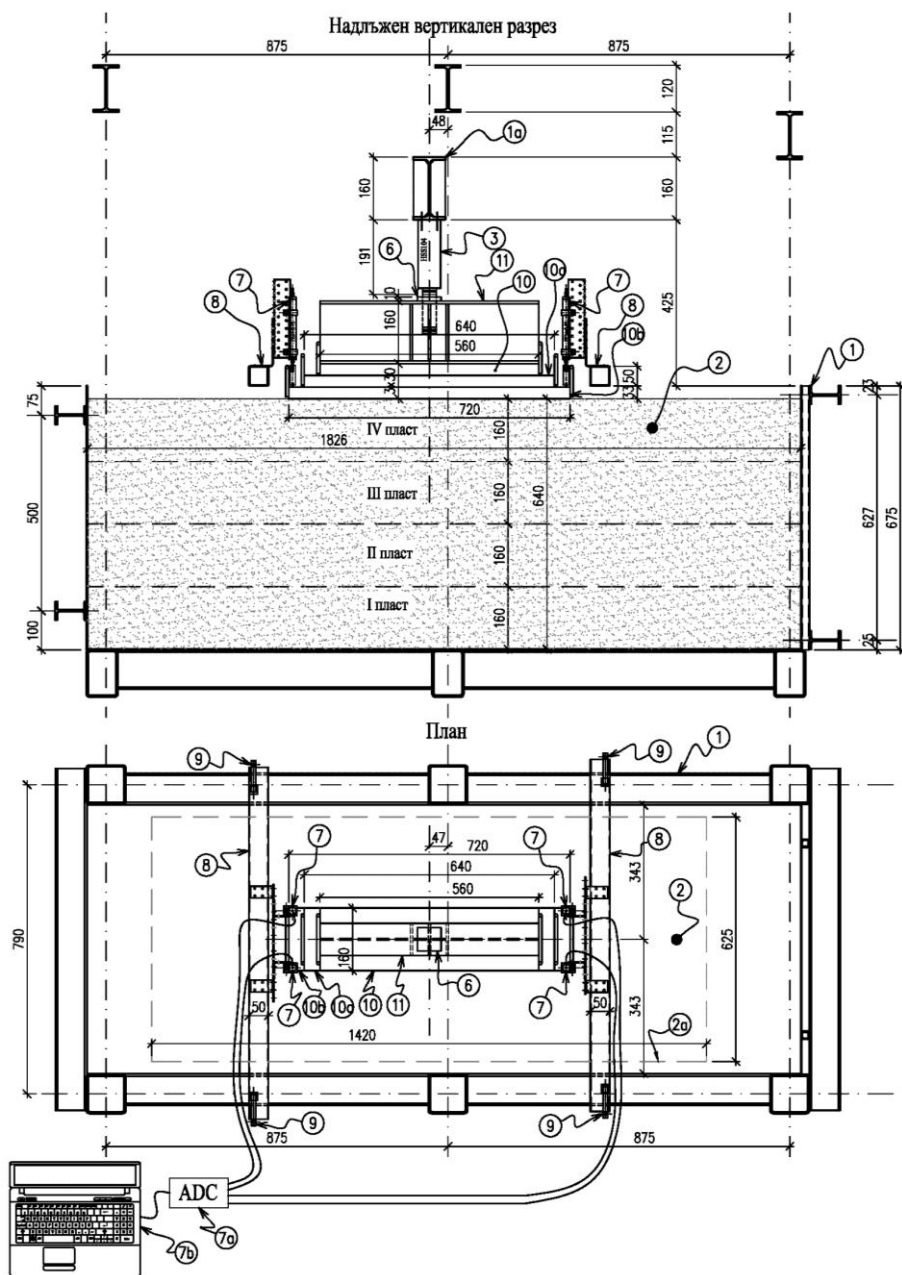
**Фиг. 4. Товароразпределяща греда (със сечение IPE 160,  $L = 560 \text{ mm}$ )**

Прието е изпитванията да се извършат с несвързана почва – речен пясък, поради възможността за реализиране на характеристики и поведение на почвата, положена в контейнера, при подготовката за всеки опит, максимално съответстващи на реална несвързана почва.

Поради продължителното престояване (месеци) на използвания пясък в лаборатория може да се счита, че водното му съдържание е съвсем минимално, т.е. близко до 0%, поради което пясъкът може да се определи като въздушно-сух и без привидна кохезия, характерна за влажния пясък. При подготовката на почвата за изпитванията, както и при самите изпитвания не се предвижда допълнително овлажняване или водонасищане на използвания въздушно-сух пясък.



Фиг. 5. План и надгъжен вертикален разрез на опитна постановка при изследване на кръгъл моделен стоманен фундамент с размер  $\text{Ø}200 \text{ mm}$



**Фиг. 6. План и надлъжен вертикален разрез на опитна постановка при изследване на правоъгълен моделен стоманен фундамент с размери 160/720 mm**

Схема на опитната постановка при изследване на:

- кръгъл моделен стоманен фундамент (натискава плоча) с размер  $\text{Ø}200 \text{ mm}$  е показана на фиг. 5;
- правоъгълен моделен стоманен фундамент (натискава плоча) с размери 160/720 mm е показана на фиг. 6.

### Легенда към фиг. 5 и 6:

1. Модифицирана съществуваща опитна постановка за изпитване на анкери (стоманен контейнер за почва с опорна конструкция за натоварване);
  - 1а. Стоманена опорна греда за натоварващия хидравличен цилиндър;
  2. Несвързана почва (пясък), уплътнена на 4 пласта от по около 16 cm;
  - 2а. Уплътнена зона от почвата при полагането на пластове;
  3. Натоварващ хидравличен цилиндър с товароподемност 10 t, ход на буталото 100 mm със сферично „седло“ при върха на буталото;
  - 3а. Ръчна хидравлична помпа с работно налягане 700 bar, снабдена с контролен манометър с точност 10 bar;
  - 3б. Хидравличен маркуч с работно налягане 700 bar;
  4. Кръгла стоманена натискаваща плоча –  $\varnothing 160$  mm,  $t = 20$  mm;
  - 4а. Кръгла стоманена натискаваща плоча –  $\varnothing 200$  mm,  $t = 20$  mm;
  5. Стоманен цилиндър/удължител  $\varnothing 80$  mm,  $L = 200$  mm;
  6. Компенсиращи стоманени подложни планки;
  7. Индуктивни сензори за линейно преместване (LVDT displacement transducer) – с обхват 75 mm или 50 mm;
  - 7а. Аналогово-цифров преобразувател;
  - 7б. Компютър/лаптоп;
  8. Опорна стоманена греда за измервателни устройства с възможност за регулиране;
  9. Фиксатори за прикрепяне на опорна стоманена греда за измервателни устройства към стоманения сандък;
  10. Правоъгълна стоманена натискаваща плоча – 160/560 mm,  $t = 30$  mm;
  - 10а. Правоъгълна стоманена натискаваща плоча – 160/640 mm,  $t = 30$  mm;
  - 10б. Правоъгълна стоманена натискаваща плоча – 160/720 mm,  $t = 30$  mm;
  11. Стоманена товароразпределяща греда – IPE160.

Уплътняването на почвата в стоманения контейнер на опитната постановка се извършва на 4 пласта с дебелина на всеки от уплътнените пластове от около 16 cm.

Технологичната последователност при уплътняването на всеки пласт е следната:

- Почвата се разстила и подравнява при дебелина на пласта преди уплътняването от около  $17 \div 19$  cm. Не се предвижда навлажняване на почвата преди уплътняването ѝ.
- Върху положения пласт от почва се спуска стоманената щампа за уплътняване с размери 625/1420 mm, като тя се центрира под натоварващия хидравличен цилиндър.
- Върху щампата се монтират всички необходими спомагателни елементи за предаване на натоварването от хидравличния цилиндър към нея, а именно: товароразпределящите греда или моделни фундаментни образци; стоманеният цилиндър/удължител, както и компенсиращи стоманени подложни планки.
- Определя се теглото на всички монтирани върху щампата елементи, включително и на самата щампа.
- Към стените на стоманения контейнер се монтират опорните стоманени греди за закрепяне на измервателните устройства (индуктивни сензори за линейно преместване).
- Вертикално се монтират индуктивните сензори за линейно преместване (LVDT), чрез които ще се измерва преместването/слягането на уплътняващата щампа.
- Индуктивните сензори за линейно преместване (LVDT) се свързват посредством аналогово-цифров преобразувател към компютър.

- При започване на уплътняването първоначално се прилага минимален товар от 5÷7 kPa, за да се провери надеждността на уплътняващата постановка, като при констатирани проблеми се извършват съответните корекции.
- Уплътняването се реализира чрез прилагане на напрежение от 70 до 100 kPa, съответстващо на сила от 62 ÷ 88 kN, приложена чрез натоварващия хидравличен цилиндър с капацитет от 10 t. Натоварването се прилага на 2 етапа/стъпала, като за всеки етап се изчаква условно затихване на деформацията от 0,01 mm за 1 h. Разликата в стъпките на натоварване между всеки два етапа е до 2 пъти (т.е. 35 kPa => 70 kPa; 50 kPa => 100 kPa).
- След уплътняването на пласта се демонтират всички измервателни и товаропредаващи елементи.
- Повдига се и се премахва стоманената щампа за уплътняване, за да се положи и впоследствие уплътни следващия пласт.

Така описаната последователност се прилага за всеки от предвидените 4 пласта до цялостното запълване на контейнера с почва със сумарна дебелина от около 64 cm.

### 3. Изследвания и дискусия

Технологичната последователност при изпитването на всеки стоманен моделен фундамент [14, 16 и 17] е следната:

- При необходимост се подравнява предварително подготвената уплътнена земна основа в зоната под моделния фундамент.
- Полага се и се хоризонтира моделният фундамент върху уплътнената земна основа, като се центрира под натоварващия хидравличен цилиндър. При полагането е необходимо да се осигури плътен контакт между почвата и фундаментния образец.
- Върху моделния фундамент се монтират при необходимост допълнително закоравяващите елементи: по-малки моделни фундаменти и товароразпределящата греда.
- Монтират се при необходимост стоманеният цилиндър/удължител, както и компенсиращи стоманени подложни планки.
- Документира се теглото на всички положени върху подготвената почва елементи от тестовата постановка – използвания основен моделен фундамент; закоравяващите допълнителни елементи (по-малки моделни фундаменти и товароразпределящата греда); стоманеният цилиндър/удължител, както и компенсиращите стоманени подложни планки.
- Монтират се към стените на стоманения контейнер опорните стоманени греди за закрепяне на измервателните устройства (индуктивни сензори за линейно преместване).
- Монтират се индуктивните сензори за линейно преместване (LVDT), чрез които ще се измерва преместването/слягането на фундамента. За всеки моделен фундамент се използват 4 бр. сензори, които е необходимо да се монтират строго вертикални.
- Индуктивните сензори за линейно преместване (LVDT) се свързват посредством аналогово-цифров преобразувател към компютър.

- При започване на натоварването първоначално се прилага минимален товар от  $5 \div 7$  kPa, за да се провери надеждността на опитната постановка, като при констатирани проблеми се правят съответните корекции.
- Натоварването на моделния фундамент се реализира съгласно изискванията на ASTM D 1194-94 [14], като то се прилага на етапи/стъпала с константна стойност за всеки етап, равна на не повече от 95 kPa или не повече от 1/10 от очакваната носеща способност на земната основа (за изпитваната почва е приета първоначална носеща способност от 500 kPa). Натоварването е необходимо да се прилага статично, без удари, отклонения или ексцентрицитети. Всяко стъпало на натоварване се поддържа за избрано време, но не по-малко от 15 min. (По-продължителни времеви интервали за поддържане на всяко стъпало на натоварване може да се определят от условието за затихване на слягането или докато скоростта на слягане стане постоянна.) След прилагането на всяка стъпка на натоварването се измерва слягането на определени фиксирани интервали от време, например 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min и 15 min, след това на всеки 15 min.

Измерване на слягането се извършва при споменатите интервали време за всяка от стъпките на натоварване. Необходимо е за всяка стъпка от натоварването да се осигурят достатъчен набор от измервания на слягането до достигане на завършеност на консолидационния процес. Изпитването продължава, докато се достигне максимално натоварване или докато съотношението между нарастването на натоварването и нарастването на слягането достигне минимална, постоянна стойност. Ако е достигнато достатъчно натоварване, изпитването продължава, докато общото слягане достигне поне 10% от диаметъра/ширината на моделния фундамент, освен ако не се констатира добре дефинирано гранично/разрушително натоварване.

След приключване на измерванията на слягането за последната стъпка на натоварването се пристъпва към разтоварване на три приблизително равни етапа/стъпки на разтоварване. По време на разтоварването продължават да се измерват сляганята за всяка стъпка, докато то затихне или за период, не по-малък от времеви интервал на стъпката на натоварване.

Определяне на силата, приложена на натискщата плоча чрез хидравличния цилиндър и напреженията в почвата под натискщата плоча:

$$P = q_p \cdot A_p / 100, \quad (3)$$

$$q = \frac{W_e \cdot g}{1000} + P, \quad (4)$$

където  $P$  е сила, прилагана на натискщата плоча чрез хидравличния цилиндър, kN;

$q_p$  – налягане в хидравличната система на натоварващия хидравличен цилиндър, измерено и контролирано с манометър на ръчната хидравлична помпа, bar;

$A_p$  – площ на буталото на хидравличния цилиндър,  $\text{cm}^2$ ;

$q$  – напрежение, прилагано върху почвата чрез натискщата плоча, kPa;

$W_e$  – обща маса на всички елементи, действащи на моделния фундамент, преди прилагане на допълнителния товар от хидравличния цилиндър – използвания основен моделен фундаментен; закоравяващите допълнителни по-малки моделни фундаменти и товароразпределяща греда; стоманения цилиндър/удължител, както и компенсиращите стоманени подложни планки, kg;

$g = 9,81$  – земното ускорение,  $m/s^2$ ;

$A$  – площ на основната плоскост на моделния фундамент,  $m^2$ .

#### 4. Заключение

Провеждането на изследванията и анализът на данни са планирани за втория етап на научното изследване, който ще се реализира през 2021 г.

Въз основа на проведените предварителни проучвания при проектирането и разработването на изследователската постановка могат да се направят следните основни заключения:

- предлаганата тестова процедура се доближава до действителния работен механизъм на плоскостните фундаменти.

Предварителните тарирания на отделните компоненти (прибори за измерване на налягане и премествания) ни позволяват да проведем измерванията с достатъчни нива на точност.

- очакваните слягания на моделните фундаменти са в рамките на обхвата (50/75 mm) на планираните за измерванията им индуктивни сензори за линейно преместване (LVDT);
- очакваната носимоспособност на моделните фундаменти е в обхвата на използваната натоварваща хидравлична система (10 t).

В заключение може да очаква, че проведените проучвания и планирани действия ще позволят постигане на целите на изследването.

#### Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор № Д-133/2020 г. е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Kostov, V., Todorov, M.* Fundirane. UASG, 2015, ISBN 978-954-724-082-7.
2. *Balushev, E., Germanov, T., Denev, D., Zhelev, Zh., Ilov, G., Kirov, B., Krastilov, I.* Zemna mehanika. Pod obshtata redaktsia na dots. d-r inzh. T. Germanov. UASG, 1999, ISBN 954-724-015-3.
3. *Sakleshpur, V., Reddy, C. N. V.* A Comparative Study on Bearing Capacity of Shallow Foundations in Sand from N and  $\phi$ . // Journal of the Institution of Engineers (India), 2017, 98: 355-365.
4. *Kobayashi, S., Izawa, R.* Rigid plastic analysis for bearing capacity of strip footings subjected to combined loads. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Alexandria), 2009, 1B: 626-629.
5. *Zhusupbekov, A., Lukpanov, R., Muzdybaeva, T., Das, B., Patra, C., Shin, E.* Bearing capacity of eccentrically loaded strip foundation on geogrid-reinforced sand. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Alexandria), 2009, 2: 861-864.

6. *Shaldykova, A., Moon, S-W., Kim, J., Lee, D., Ku, T., Zhussupbekov, A.* Comparative Analysis of Kazakhstani and European Approaches for the Design of Shallow Foundations // *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 2920.
7. *Todorov, M., Kostov, V.* Zemna mehanika. UASG, 2015, ISBN 978-954-724-081-0.
8. *Salahudeen, A., Sadeeq, J.* Evaluation of bearing capacity and settlement of foundations. // *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies (LEJPT)*, 2016, 29: 93-114.
9. *Tezcan, S., Keceli, A., Ozdemir, Z.* Allowable Bearing Capacity of Shallow Foundations Based on Shear Wave Velocity. // *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24: 203-218.
10. BDS EN 1997-1:2005, Evrokod 7: Geotehničko proektiranje. Čast 1: Osnovni pravila.
11. *Poulos, H., Carter, J., Small, J.* 2002, Foundations and retaining structures-Research and practice, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Istanbul), 2002, 4: 2527-2606.
12. *Baban, T.* Shallow Foundations: Discussions and Problem Solving. Wiley-Blackwell, 2016, ISBN: 978-111-905-613-3.
13. *Das, B.* Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement, Third Edition. CRC Press, 2017, ISBN 978-131-516-387-1.
14. ASTM D 1194 - 94: Standard test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings.
15. Markov, I. Avtoreferat na disertatsionen trud s tema: Teoretichno i eksperimentalno izsledvane na ankeri pri dinamichni vazdeystvia. Katedra „Geotehnika”, UASG, 2016.
16. BS 1377-9:1990 Methods for test for soils for civil engineering purposes. In-situ tests.
17. *Anyang, M., Atarigiya, B., Ofori-Addo, R., Allotey, N.* Plate Load Test: Getting it Right. 49<sup>th</sup> Ghana Institution of Engineers (GhIE) Annual Conference, 2018. [https://www.researchgate.net/publication/332801669\\_Plate\\_Load\\_Test\\_Getting\\_it\\_Right](https://www.researchgate.net/publication/332801669_Plate_Load_Test_Getting_it_Right).

# EXPERIENTIAL MODEL FOR THE INFLUENCE OF SHAPE FACTORS ON THE BEARING CAPACITY IN THE CASE OF FLAT FOOTING

C. Ivanov<sup>1</sup>, M. Todorov<sup>2</sup>

*Keywords: bearing capacity of soil, shallow foundation, shape, experimental facility*

## ABSTRACT

Over the past decades, several studies have been conducted to determine the bearing capacity (analytical techniques and constitutive models included) of the ground base in the case of different types of footings. The main goal of the present study is to obtain more detailedly definitions for the practical application of bearing capacity analytical techniques for noncohesive soils by focusing on the influence of the footing base shape. The research uses verification procedure with analytical approaches and empirical model scale load tests obtained by studies of flat footings. The bearing capacity of the ground base is a function of the shape of the footings, in relation with the dimensionless coefficients for the shape factors  $s_c$ ,  $s_q$  and  $s_\gamma$ . The focus of the research is to refine the value of the form coefficients.

---

<sup>1</sup> Cvetan Ivanov, Eng. PhD Student, Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: cvetan\_ivanov@mail.bg

<sup>2</sup> Miroslav Todorov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: miro\_todorof@yahoo.com