



Получена: 09.12.2022 г.

Приета: 23.12.2022 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЛЪСОЦИМЕНТОВИ СМЕСИ И МОДЕЛИРАНЕ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО ФУНДАМЕНТ – ЛЪСОЦИМЕНТОВА ВЪЗГЛАВНИЦА – ЛЪСОС ПРИ ЗАЗДРАВЯВАНЕ НА ЗЕМНАТА ОСНОВА ЗА СТРОИТЕЛСТВО НА ЖИЛИЩНИ СГРАДИ В ГР. КОЗЛОДУЙ

Н. Милев¹, И. Иванов²

Ключови думи: лъсос, циментопочвена възглавница, заздравяване, земна основа

РЕЗЮМЕ

С развитието на строителството в България в северната част на Дунавската равнина се установяват редица проблеми, свързани с пропадане (бързо слягане и самоуплътняване) на лъсовите почви при навлажняване. Пропадъчността на лъсовите почви, причините и предотвратяването на това опасно за строителството явление, са предмет на множество изследвания. Един от най-широко използваните при строителството методи за заздравяване на лъсова земна основа е циментопочвената възглавница (ЦПВ). Основна задача на настоящото изследване и подбиране на ефективна технология за изграждане и подходящ състав на циментопочвената (лъсоциментова) възглавница под фундаментите на сгради в гр. Козлодуй, фундаирани върху пропадъчен лъсос.

1. Въведение

Лъсовите почви са разпространени в Северна България, като заемат площ от около 9800 km². Те формират почти непрекъсната покривка, чиято дебелина се изменя от около 1 m в Предбалкана до над 100 m по поречието на р. Дунав [12]. Произходът на българския

¹ Николай Милев, гл. ас. д-р инж., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: n.milev@yoda-bg.com

² Ивайло Иванов, доц. д-р инж.-геол., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: iji_fte@uacg.bg

лъос е изследван от много български учени, преди всичко като основа за строителство. Доказан е неговият еоличен (ветрови) произход, като с висока степен на достоверност се предполага, че материалът е донесен в тази част на Дунавската равнина основно от север – североизточни ветрове през късния плиоцен и началото на кватернера. Източник на фините прахови, глинести и пясъчни частици са вероятно разливите на Палеодунав, формиращи предимно от ледниковата денудация на склоновете на източните Карпати [2, 9, 15, 17].

Лъосът в България се характеризира с високо съдържание на прахови частици, висок обем на порите и наличие на макропори, ниска обемна плътност на скелета и сравнително ниско водно съдържание. Сред него се установяват и няколко погребани почвени (хумусни) хоризонта, формиращи в периоди на затихване на праховото навяване. Най-общо, според зърнометричния състав на българските лъосови почви могат да се отделят шест разновидности – типичен лъос, глинест лъос, пясъчлив лъос, лъосовидни пясъци и лъосовидна глина [1].

С развитието на строителството в България, в северната част на Дунавската равнина се установяват редица проблеми, свързани с пропадане (бързо слягане и самоуплътняване) на лъосовите почви при навлажняване, като най-висока степен на пропадъчност се проявява при типичния лъос, пясъчливия лъос и глинестия лъос [1]. Основни параметри при оценяването на пропадъчността на лъосовите почви са началният товар на пропадане – натоварването, при което може да възникне внезапно слягане и самоуплътняване, както и обемът на макропорите. Тези параметри са регламентирани в български нормативни документи [13], като са отделени два основни типа пропадъчни почви – I тип – с пропадане от натоварване и собствено тегло под 5 cm и II тип – с пропадане от натоварване и собствено тегло над 5 cm.

Пропадъчността на лъосовите почви, причините и предотвратяването на това опасно за строителството явление, са предмет на изследвания от множество автори [1, 2, 9, 11, 14, 15, 17]. Особено активно се развиват методите за заздравяване на лъоса във връзка с проектирането и строителството на атомната електроцентрала в гр. Козлодуй. Един от най-широко използваните при строителството методи за заздравяване на лъосова земна основа е циментопочвената възглавница (ЦПВ). Методът е разработен в ГИ на БАН през 1970 г. и защитен с авторско свидетелство, а през 1976 г. е регламентиран в „Указания за фундиране на сгради и съоръжения в пропадъчни (лъосови) почви посредством лъосоциментна възглавница“ [12]. Фундирането с циментопочвена възглавница в пропадъчен лъос е метод, разработен в България, като продължават да се провеждат изследвания, насочени към подобряване на свойствата и заздравяването на земната основа чрез ЦПВ [3 – 7, 10, 11, 18 – 20].

2. Характеристики на ЦПВ и основни проблеми при проектирането и изграждането им

Циментопочвените възглавници могат да бъдат разделени на два типа [7]:

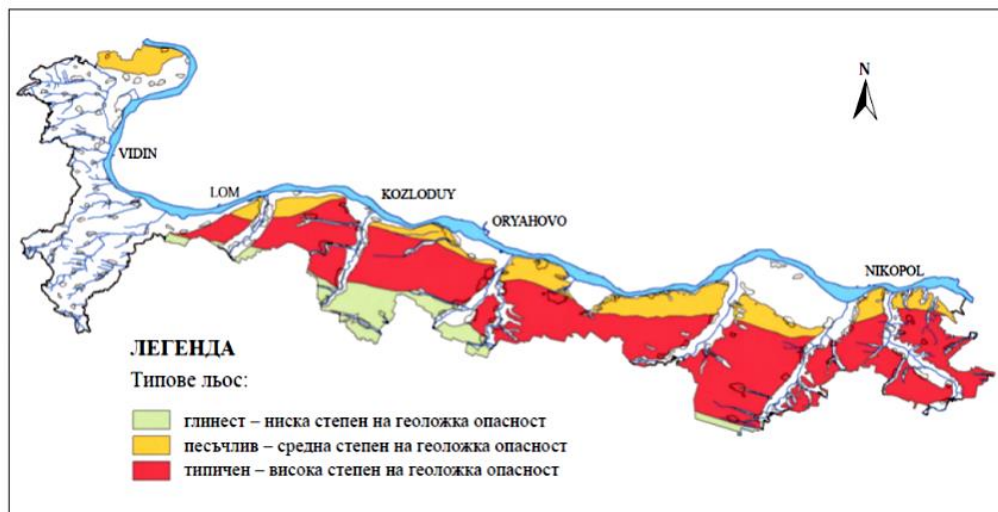
- *корави ЦПВ*, уплътнени при оптимално водно съдържание – w_{opt} до достигане на максимална обемна плътност на скелета – ρ_{dmax} . Тези възглавници се изграждат под целия фундамент на сградите и съоръженията и се отличават с висока носимоспособност;
- *пластични ЦПВ*, които се изграждат при водни съдържания, близки до границата на протичане на почвите – w_L и се използват преди всичко в стеснени условия.

Основната цел на възглавницата е да поеме натоварванията от сградите и съоръженията и да ги разпредели равномерно върху пропадъчната почва в дълбочина, така че да не бъде надвишен началният товар на пропадане и да се избегнат вероятностите за неравномерни слягания, деформации и повреди на сградите и съоръженията. Тя се изгражда обикновено от местна почва (лъос), заздравена с 3 – 8 % цимент. Един от главните въпроси при проектирането и изграждането на ЦПВ е как да се подбере съставът, дебелината и модулът на общи деформации на циментопочвената възглавница, така че напреженията, предавани от фундамента върху лъоса да бъдат по-малки от началния товар на пропадане – $P_{нач.пр.}$ [7]. При съвременното строителство този въпрос става все по-актуален, като при определяне на подходящата конструкция, размери и състав на ЦПВ, е важно параметрите ѝ да бъдат определени така, че да гарантират максимална сигурност и дълговечност, при оптимална стойност.

3. Общо описание на обекта и на задачите на изследването

Обект на представената разработка е фундирането на четири многофамилни жилищни сгради, намиращи се в град Козлодуй, с пет етажа всяка, и kota корниз 15 m. Те са с партерен етаж с конструктивна височина 2,50 m, разположен на +0,10 m над терена. Сградите нямат сутеренни нива. Фундирането им е решено чрез фундаментни плочи с дебелина 60 cm, залягащи на kota +31,50 и +31,70, след отстраняване на пропадъчните свойства на лъоса и заздравяване на основата с ЦПВ.

В тектонско отношение районът на гр. Козлодуй е разположен в Мизийската плоча, в северната част на Ломската падина. Геоложката основа е представена от пясъчливи варовици, глини и пясъци с възраст Неоген и Кватернер, както и от алувиални образувания от старите тераси на р. Дунав, включващи пясъци и чакъли. Тези седименти са покрити с еолични образувания – типичен лъос, глинест лъос и лъосовидни глини с възраст Кватернер, чиято дебелина в района е около 7 – 8 m. Лъосовите почви в района на гр. Козлодуй са I и II тип по пропадъчност, като в града са установявани щети по сгради, особено изградени преди 70-те години на 20-ти век [1, 6, 10].



Фиг. 1. Типове лъос между Видин и Никопол [1]

Основна задача на изследването е подбиране на ефективна технология за изграждане и подходящ състав на циментопочвената (лъосоциментова) възглавница под фундаментите на проектните сгради, която да отговаря на високите изисквания при строителството и да изпълнява своята роля при оптимални технико-икономически показатели. При изследването са ползвани и данни от инженерногеоложко проучване, проведено през 2019 г. [21].

4. Материали и методи

4.1. Геотехнически характеристики на почвите от земната основа

На площадката са направени проучвателни изкопи (шурфове), с дълбочина 4 m, равномерно разположени под проектните сгради, с цел получаване на визуална представа за земната основа и вземане на проби. До проучваната дълбочина са установени две почвени разновидности:

- *Хумус и насип*. Дебелината на хумусния слой в района е средно 20 cm, като под него има антропогенен насип с дебелина от 0,80 m до 1,60 m в западната част на площадката. Тази почвена разновидност не е обект на изследване, тъй като ще бъде отстранена при изкопните работи;
- *Песъчлив глинест прах до песъчлива прахова глина, жълтокафяв (лъос, песъчлив лъос)* – код по БДС EN ISO 14688-2: *sa cl Si – sa si Cl*. Пластът се установява във всички проучвателни шурфове, като заляга директно под насипа.

Таблица 1. Физични показатели на лъоса в изследвания район

Показател	Дименсия	Минимална стойност	Максимална стойност	Характеристична стойност	
Обемна плътност	ρ_n	Mg/m ³	1,46	1,95	1,57
Специфична плътност	ρ_s	Mg/m ³	2,68	2,71	2,70
Водно съдържание	W	%	6,07	15,08	6,1 – 15,1
Граница на протичане	W_L	%	27,82	40,35	27,8 – 40,4
Граница на източване	W_P	%	20,68	28,30	20,7 – 28,3
Обемна плътност на скелета	ρ_d	Mg/m ³	1,35	1,69	1,43
Обем на порите	n		0,370	0,503	0,470
Коефициент на порите	e		0,587	1,011	0,902
Показател на пластичност	I_p	%	6,31	12,05	8,09

Якостни и деформационни показатели на лъоса:

- ъгъл на вътрешно триене – върхов: 22,5°;
- кохезия – върхова: 25 kPa;
- модул на общи деформации при натоварване 0,2 MPa: E_o – 16,0 MPa.

Пропадъчност и тип на лъсовата почва:

Пласт 2 има характеристиките на типичен пропадъчен лъос със следните параметри:

– обем на макропорите – $n_m = 1,00 - 1,12$ %;

– начален товар на пропадане $P_{нач пр} = 0,1$ МРа.

При средна дебелина на пласта от 8 m и средно обемно тегло от $15,4 \text{ kN/m}^3$, очакваното пропадане на лъсовите почви в района може да достигне 10 cm под въздействие на собственото тегло. Лъосът в обсега на обекта може да бъде класифициран като II тип по пропадъчност (пропадане повече от 5 cm под въздействие на собственото тегло).

4.2. Експериментални изследвания

4.2.1. Определяне на стандартна плътност и оптимално водно съдържание по модифициран Проктор

Изпитването на проби от лъоса с цел определяне на стандартна (максимална) плътност на скелета и оптимално водно съдържание е извършено в лицензираната лаборатория на „Евротест – Контрол“ ЕАД по стандарт БДС EN ISO 13286-2:2011. Целта на изпитването е чрез уплътняване в лабораторни условия да се определи водното съдържание, при което почвата се уплътнява максимално и има най-висока обемна плътност на скелета. Изпитани са 4 проби от лъсовата почва (табл. 2).

Таблица 2. Максимална плътност на скелета и оптимално водно съдържание на лъоса

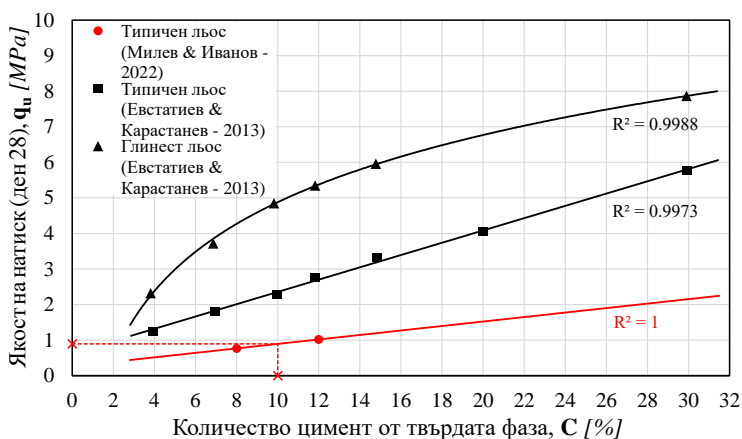
Показател		Дименсия	Минимална стойност	Максимална стойност	Средна стойност
Максимална обемна плътност на скелета	$\rho_{d \max}$	Mg/m^3	1,63	1,65	1,64
Оптимално водно съдържание	W_{opt}	%	16,80	18,80	17,75

4.2.2. Изпитване на лъосоциментови смеси

В лабораторията са изготвени осем смеси от лъос и цимент, по 4 в различни съотношения цимент/лъос (8 тегловни процента цимент и 12 тегловни процента цимент). Водното съдържание на сместа е равно на оптималното. Марката на използвания цимент е СЕМ IV/A 42,5 N (M400 – по стария стандарт). Пробите са уплътнени и са оставени да се втвърдят. На 28-ия ден, съгласно стандарт БДС EN ISO 17892-7:2018, е направено изпитване за якост на натиск на втвърдената лъосоциментова смес (табл. 3). Сравнение между лабораторно определените якости и предишен опит [7] е направено на фиг. 2.

Таблица 3. Резултати от определянето на якост на натиск на лъосоциментова смес, на 28-мия ден, при различно съдържание на цимент

Показател		Дименсия	Минимална стойност	Максимална стойност	Средна стойност
Якост на натиск на 28-мия ден при 8 % съдържание на цимент, марка СЕМ IV/A 42,5 N	R_c	kPa	726,90	831,70	790,31
Якост на натиск на 28-мия ден при 12 % съдържание на цимент, марка СЕМ IV/A 42,5 N	R_c	kPa	958,50	1 164,30	1 048,35



Фиг. 2. Лабораторно установени зависимости „съдържание на цемент – якост на лъсоцимент“

На база на проведените за нуждата на разработката лабораторни изпитвания могат да бъдат направени следните изводи:

- средното съдържание на цемент от 10 % по маса съответства на 0,90 МРа якост на лъсоцимента, получен на площадката;
- очакваното обемно свиване на възглавницата в резултат на съсхвателните процеси, съпътстващи свързването на цимента, е в границите на 6 – 7 mm.

4.3. Отстраняване на пропадъчните свойства на почвата

Поради пропадъчността на установените на строителната площадка почвени разновидности са проектирани мерки за нейното елиминиране. Предложени са два технологично различни варианта: 1) лъсо-циментна възглавница; и 2) дълбочинно цименто-почвено смесване, с които се постигат идентични благоприятни ефекти върху поведението на фундирането и земната основа. Общото и за двата е, че се формира втвърдено цименто-почвено тяло (еластичен фундамент), което замества пропадъчната почва под сградите и служи за трансфер на напреженията от фундаментните плочи към земната основа. В допълнение, тези мерки редуцират слягането под нормативно допустимото съгласно Националното приложение на БДС EN 1997 (Еврокод 7) и повишават носимоспособността (общата устойчивост) на земната основа заради по-дълбокото залягане на основната плоскост. И в двата варианта дебелината и размерите в план са еднакви. Предвижда се 2 (2,2) m дебелина и около 2 m излизане от контура (в план) на фундаментните плочи.

Вариант 1 – чрез лъсоциментова възглавница

Първият вариант представя класически и разработен за нуждите на изграждане на реакторните сгради на АЕЦ метод, който е широко прилаган в подобни почвени условия – фиг. 3. Основана се на изземване на пласт от лъса с определена дебелина и връщането му на пластове със задължително влагане на висока уплътнителна работа, смесен с определени количества вода и цемент. Технологията на изпълнение може да бъде систематизирана както следва:

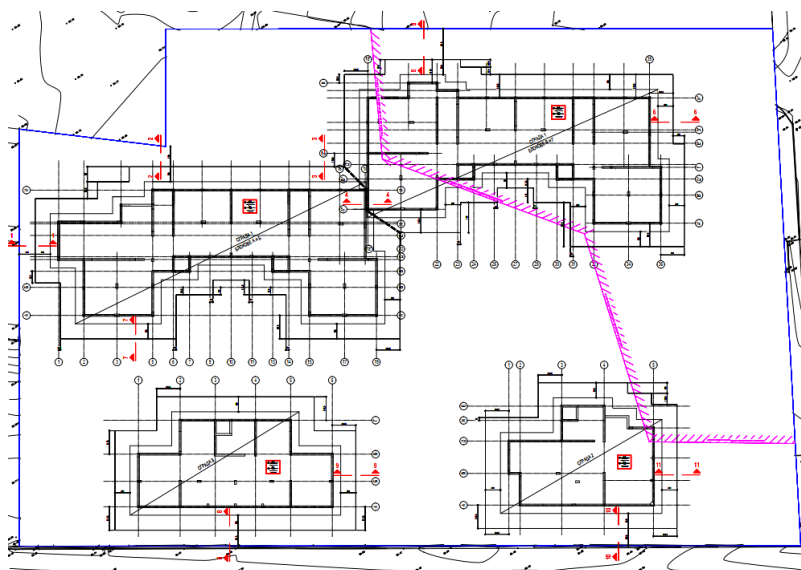
Етап 1(а) – изкопаване до кота, малко по-висока от кота долен ръб лъсоциментова възглавница.

Етап 1(б) – уплътняване на дъното на изкопа и достигане на кота долен ръб лъсоциментова възглавница.

Контрол по достигнатата степен на уплътняване чрез изпитвания стандартна кръгла плоча за достигнат $E_1 = 30$ МПа (деформационен модул при първо натоварване) и отношение на $E_2/E_1 < 2,5$;

Етап 2 – изпълнение на лъсоциментова възглавница на валирани слоеве с максимална дебелина 30 см. Добавеният цимент (СЕМ I 42.5 N сулфатостойчив) трябва да е 10 % по маса, а добавената вода – 8 % по маса. Сместа може да се изготви на място със смесител или в бетонов възел.

Контрол по достигнатите деформационни характеристики се извършва минимум 14 дни след достигане на проектната кота горен ръб на възглавницата. Отново се извършват изпитвания със стандартна кръгла плоча за достигнат $E_1 = 70$ МПа отношение на $E_2/E_1 < 2,5$.

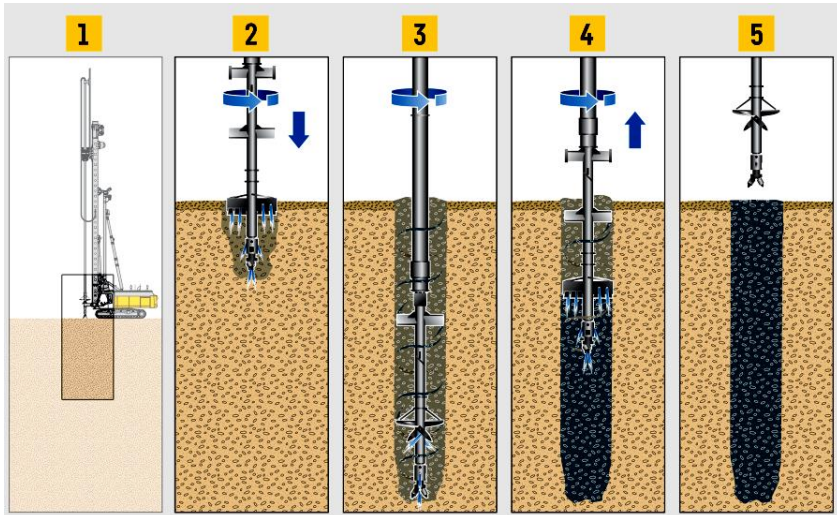


Фиг. 3. Вариант 1 – лъсоциментова възглавница

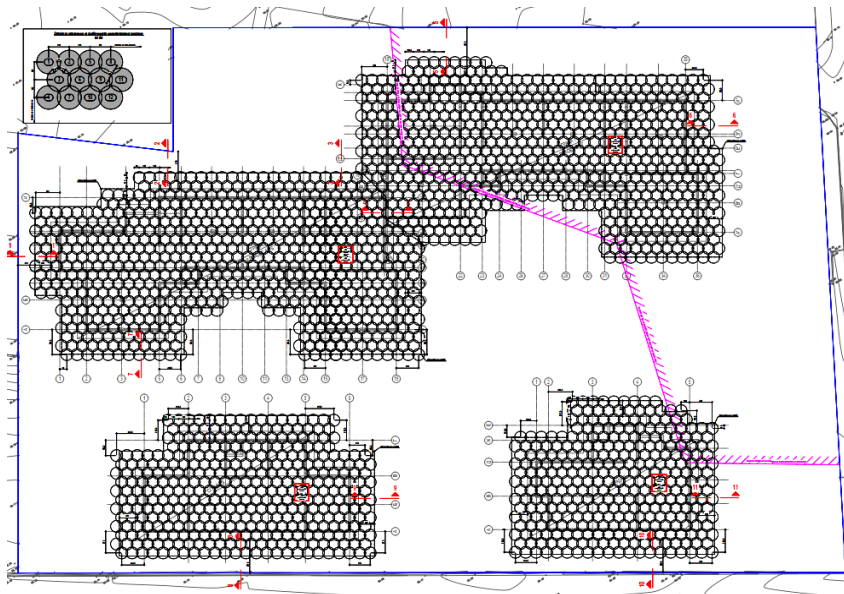
Вариант 2 – чрез дълбочинно циментопочвено смесване

Вторият вариант представя иновативна специализирана технология, която набира все по-голяма популярност през последните години – фиг. 5. Основана се на контролирано механично нарушаване и разбъркване на почвата на място в дълбочина, придружено с добавяне на свързващ агент (цимент) – фиг. 4. Финалният резултат е масив от заздравен водоуплътнен материал с повишени механични характеристики. Това се постига чрез спускане при непрекъсната ротация на един или повече шнекове, оборудвани със сръзващи лопатки. При движението си надолу те нарушават почвата и я подготвят за разбъркване. След достигане на проектната кота, отново при непрекъснато въртене, се инжектира суспензия със свързващ агент (в конкретния случай – водоциментов разтвор) при постепенно изтегляне на шнековете. Предвижда се класът на вложения цимент да е СЕМ I 42.5 N, сулфатостойчив. Могат да бъдат отбелязани някои предимства на тази технология:

- относително висока производителност, без вибрации;
- разбъркването и заместването се случва на практика на място и отпада нуждата от първоначално масово изкопаване, транспортиране, складиране и последващото връщане на големи количества земни маси;
- използва се една интегрирана машина (няма нужда от отделни миксери, валици), свързана с източник на цимент и вода, което прави възможно прецизното им дозиране и поддържане на еднакви параметри през цялото време.



Фиг. 4. Принципна схема и илюстрация на технологията по дълбочинното циментопочвено смесване [16]



Фиг. 5. Вариант 2 – дълбочинно циментопочвено смесване

Якостта на неограничен едноосов натиск на така формираните циментопочвени тела (възглавници) трябва да бъде по-голяма от 1 МРа. Инжекционните параметри се потвърждават след един или няколко тестови участъка в конкретните почвени условия, взимане на проби от циментопочвените тела и изпитването им. Последователността на изпълнение е следната:

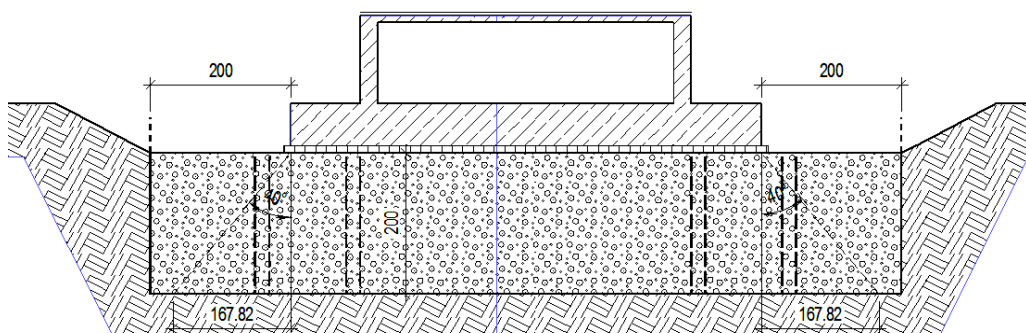
– *Етап I* – изпълнение на цименто-почвените тела с $D = 1,5$ m и $L = 2,5$ m, застъпване 20 cm;

– *Етап II* – 28 дни след завършване на Етап I. Последните 50 cm от цименто-почвените тела се премахват, за да се достигне до еднородна и здрава основа.

4.4. Статически изчисления

Проведени са аналитични изследвания за проверка на носимоспособността на земната основа под фундаментите на сградите преди и след прилагане на мерки за подобряване на льосовата земна основа и предотвратяване на бъдещи, свързани със заливане пропадъчни процеси. Примерни резултати за една от сградите в състояние, в което е подобрена земната основа под нея, са представени в таблици 4 – 7.

Сравнителният анализ доказва, че прилагането на льосоциментова възглавница или дълбочинно циментопочвено смесване намалява напреженията в земната основа и намалява сляганията под максимално допустимите съгласно *Националното приложение на БДС EN 1997 (Еврокод 7)*. Също така се елиминира недостатъчната носимоспособност на земната основа в сеизмична изчислителна ситуация. Това се обуславя от действието им като фиктивен еластичен фундамент с по-голяма площ на основната плоскост. Приет е ъгъл на разпределение на напреженията от 40° на база на предпоставка за еластична хомогенна среда (фиг. 6).



Фиг. 6. Възприето разпределение на напреженията в дълбочина при избор на габарит на мерките за подобряване на земната основа

Таблица 4. Проверка на напреженията в основната плоскост

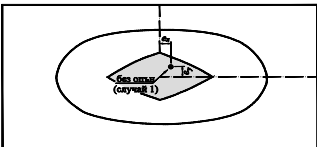
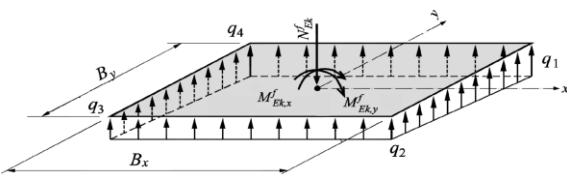
Ограничаване на напреженията за характеристична комбинация							
Товарна комбинация	e_x	e_y	\bar{e}_0	\bar{e}_1^2	случай 1:		
	1*	2*	3*	4*			
	[m]	[m]					
Несеизмична	0.00	0.00	0.00	0.00	няма отлепяне		
Формули:							
1) $e_x = \frac{M_{Ek,y}^f}{N_{Ek}^f}$ 2) $e_y = \frac{M_{Ek,x}^f}{N_{Ek}^f}$ 3) $\bar{e}_0 = \frac{e_x}{B_x} + \frac{e_y}{B_y}$ 4) $\bar{e}_1^2 = \left(\frac{e_x}{B_x}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{B_y}\right)^2 \leq 0.11$							
случай 1: $\bar{e}_0 \leq 1/6 (0.17)$ - няма отлепяне случай 2: $\bar{e}_0 > 1/6 (0.17)$ и $\bar{e}_1^2 \leq 1/9 (0.11)$ - има отлепяне случай 3: $\bar{e}_1^2 > 1/9 (0.11)$ - недопустим ексцентрицитет							
Товарна комбинация	Натоварване:			Напрежения:			
	N_{Ek}^f	$M_{Ek,x}^f$	$M_{Ek,y}^f$	q_1	q_2	q_3	q_4
	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
Несеизмична	80 166	0	0	92.78	92.78	92.78	92.78
Формули:							
5) $q_1 = \left(\frac{N_{Ek}^f}{B_x B_y}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,y}^f}{B_x^2 B_y}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,x}^f}{-B_x B_y^2}\right)$ 6) $q_2 = \left(\frac{N_{Ek}^f}{B_x B_y}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,y}^f}{B_x^2 B_y}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,x}^f}{B_x B_y^2}\right)$ 7) $q_3 = \left(\frac{N_{Ek}^f}{B_x B_y}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,y}^f}{-B_y B_x^2}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,x}^f}{B_x B_y^2}\right)$ 8) $q_4 = \left(\frac{N_{Ek}^f}{B_x B_y}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,y}^f}{-B_y B_x^2}\right) + \left(\frac{6M_{Ek,x}^f}{-B_x B_y^2}\right)$							
Товарна комбинация	Ограничаване на напреженията в осн. плоскост						
	q_{av}	$\leq ?$	q_R	q_{max}	$\leq ?$	$q_{max,adm}$	$q_{min} \geq ? 0$
	9*	Проверка		10*	Проверка	11*	12*
Несеизмична	92.8	<	100.0	92.8	<	150.0	92.8
Формули:				Параметри:			
9) $q_{av} = \frac{N_{Ek}^f}{B_x B_y} \leq q_R$ 10) $q_{max} = \max(q_1; q_2; q_3; q_4) \leq q_{max, adm}$ 11) $q_{max, adm} = \begin{cases} 1.3q_R, & \text{при } M_x \neq 0; M_y = 0 \text{ или } M_x = 0; M_y \neq 0 \\ 1.5q_R, & \text{при } M_x \neq 0; M_y \neq 0 \end{cases}$ 12) $q_{min} = \min(q_1; q_2; q_3; q_4) \geq 0$				$B_x = 43.96 \text{ m}$ $B_y = 19.66 \text{ m}$ $q_R = 100 \text{ kPa}$			
*Номерът на всяка формула съответства на номер на колона от таблицата							

Таблица 5. Проверка на носимоспособността на земната основа (дренажно състояние)

Дренажни условия														
коэф. за носимоспособност			коэф. за наклон на основна плоскост		коэф. за форма на фонд. плоча		коэф. за наклон на натоварването							
1*	$N_q =$	8.23	5*	$b_q =$	1.00	7*	$s_q =$	1.17	10*	$m_x =$	1.31	13*	$i_q =$	1.00
2*	$N_c =$	17.45	6*	$b_c =$	1.00	8*	$s_c =$	1.19	11*	$m_y =$	1.69	14*	$i_c =$	1.00
3*	$N_\gamma =$	5.99	4*	$b_\gamma =$	1.00	9*	$s_\gamma =$	0.87	12*	$m =$	1.31	15*	$i_\gamma =$	1.00
			$R_{v,d}$	$\geq ?$	N_{Ed}^f			$q_{v,d}$	$\geq ?$	q_{Ed}^f				
			16*					17*		18*				
			[kN]		[kN]			[kPa]		[kPa]				
			1 038 737	>	113 875			1 202	>	132				
Изчислителни почвени характ. под основна плоскост съгл. EC7:		Параметри:			Натоварване:									
$c'_d = 25.0$ kPa		$B_x = 43.96$ m			$N_{Ed}^f = 113875$ kN					$V_{Ed}^f = \sqrt{(V_{Ed,x}^f)^2 + (V_{Ed,y}^f)^2}$				
$\varphi'_d = 22.5$ °		$B_y = 19.66$ m			$V_{Ed,x}^f = 0$ kN									
$\gamma'_d = 9.4$ kN/m ³		$B'_x = 43.96$ m			$V_{Ed,y}^f = 0$ kN					$\theta = \arctg\left(\frac{V_{Ed,y}^f}{V_{Ed,x}^f}\right)$				
		$B'_y = 19.66$ m			$V_{Ed}^f = 0$ kN									
Изчислителни почвени характ. над основна плоскост съгл. EC7:		$D_f = 3.85$ m			$M_{Ed,x}^f = 0$ kNm					$e_x = \left \frac{M_{Ed,y}^f}{N_{Ed}^f}\right $				
		$\alpha = 0$ °			$M_{Ed,y}^f = 0$ kNm									
$\gamma_{n,d,1} = 18.4$ kN/m ³		$h_w = 8.00$ m			$e_x = 0.00$ m					$e_y = \left \frac{M_{Ed,x}^f}{N_{Ed}^f}\right $				
$\gamma'_{d,1} = 9.4$ kN/m ³					$e_y = 0.00$ m									
		$B'_x = B_x - 2e_x$			$\theta = 0$ °					$q' = \gamma_{n,d,1} h_w + \gamma'_{d,1} (D_f - h_w)$				
		$B'_y = B_y - 2e_y$			$q' = 71$ kPa									
					$\gamma_{R,v} = 1.40$									
Формули:														
1) $N_q = e^{\text{mg}\varphi'_d} \text{tg}^2(45 + \varphi'_d / 2)$					2) $\frac{B'_x}{B'_y}$					2) $\frac{B'_y}{B'_x}$				
2) $N_c = (N_q - 1) \cotg \varphi'_d$					10) $m_x = \frac{2 + \frac{B'_x}{B'_y}}{1 + \frac{B'_x}{B'_y}}$					11) $m_y = \frac{2 + \frac{B'_y}{B'_x}}{1 + \frac{B'_y}{B'_x}}$				
3) $N_\gamma = 2(N_q - 1) \text{tg} \varphi'_d$					12) $m = m_x \cos^2 \theta + m_y \sin^2 \theta$									
4) $b_\gamma = (1 - \alpha \text{tg} \varphi'_d)^2$					13) $i_q = \left(1 - \frac{V_{Ed}^f}{N_{Ed}^f + B'_x B'_y c'_d \cotg \varphi'_d}\right)^m$									
5) $b_q = b_\gamma$					14) $i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \text{tg} \varphi'_d}$									
6) $b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \text{tg} \varphi'_d}$					15) $i_\gamma = \left(1 - \frac{V_{Ed}^f}{N_{Ed}^f + B'_x B'_y c'_d \cotg \varphi'_d}\right)^{m+1}$									
7) $s_q = 1 + \left[\frac{\min(B'_x; B'_y)}{\max(B'_x; B'_y)}\right] \sin \varphi'_d$					16) $R_{v,d} = \frac{B'_x B'_y [c'_d N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + 0.5 \gamma'_d N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma \min(B'_x; B'_y)]}{\gamma_{R,v}}$									
8) $s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$					17) $q_{v,d} = \frac{R_{v,d}}{B'_x B'_y}$					18) $q_{Ed}^f = \frac{N_{Ed}^f}{B'_x B'_y}$				
9) $s_\gamma = 1 - 0.3 \left[\frac{\min(B'_x; B'_y)}{\max(B'_x; B'_y)}\right]$														

*Номерът на всяка формула отговаря на номер на съответна клетка от таблицата

Таблица 6. Проверка на носимоспособност на земната основа при сеизмично въздействие – съгласно Приложение F на Еврокод 8

Направление на въздействието "X" - MAX

изчисляват се само за несвързани почви							
N_q 1*	N_γ 2*	N_{max} 3*	\bar{N} 4*	\bar{V}_x 5*	\bar{M}_y 6*	\bar{F} 7*	$f(\bar{N}, \bar{V}_x, \bar{M}_y)$ 8*
[kN]							
5.43	2.937	916 089	0.161	0.0053	0.0021	0.54	-0.885
$(1 - m\bar{F})^{k'} = 0.801$ (изчислява се само за несвързани почви)						Числени параметри:	
						свързани (несвързани)	
Стойности на частния коеф. на моделиране γ_{Rd}						$a = 0.70 (0.92)$	$k = 1.22 (1.00)$
						$b = 1.29 (1.25)$	$k' = 1.00 (0.39)$
средно пълтни до пълтни пясъци						$c = 2.14 (0.92)$	$c_T = 2.00 (1.14)$
						$d = 1.81 (1.25)$	$c_M = 2.00 (1.01)$
рохки, сухи пясъци						$e = 0.21 (0.41)$	$c'_M = 1.00 (1.01)$
						$f = 0.44 (0.32)$	$\beta = 2.57 (2.9)$
рохки водонаситени и пясъци						$m = 0.21 (0.96)$	$\gamma = 1.85 (2.8)$
						нечувствителни глини	
чувствителни глини							
						1.00	1.15
Натоварване:			Изчисл. почвени характ. съгл. EC8:			Параметри:	
$N_{Ed}^f = 98092$ kN			Вид почва:		несвързани		$B_x = 43.96$ m
$V_{Ed,x}^f = 3234$ kN			Класификация съгласно EC8-5 Annex F:		рохки водонаситени пясъци		$B_y = 19.66$ m
$M_{Ed,y}^f = 56486$ kNm			$\varphi'_d = 18.3$ °				$\gamma_I = 1.00$
			$\bar{c} = 38.3$ kPa				$a_{gR} = 1.47$ m/s ²
			$\rho = 1840$ kg/m ³				$a_g = 1.47$ m/s ²
			$\gamma_{Rd} = 1.50$				$S = 1.20$
			$\gamma_M = 1.40$				$a_v = 0.88$ m/s ²
							$a_g = \gamma_I a_{gR}; a_v = 0.5 a_g S$
							$g = 9.81$ m/s ²
Формули:							
1) $N_q = e^{m\varphi'_d} \text{tg}^2(45 + \varphi'_d/2)$ - изчислява се само за несвързани почви							
2) $N_\gamma = 2(N_q - 1)\text{tg}\varphi'_d$ - изчислява се само за несвързани почви							
3) $N_{max} = \begin{cases} (\pi + 2) \frac{\bar{c}}{\gamma_M} B_x B_y - [\text{kN}] - \text{за свързани почви} \\ \frac{1}{2} \rho g \left(1 - \frac{a_v}{g}\right) B_x^2 N_\gamma B_y - [\text{N}] \text{ при } \rho [\text{kg/m}^3] \text{ и } a_g [\text{m/s}^2] - \text{за несвързани почви} \end{cases}$							
4) $0 \leq \bar{N} = \frac{\gamma_{Rd} N_{Ed}^f}{N_{max}} \leq \begin{cases} 1 - \text{за свързани почви} \\ (1 - m\bar{F})^{k'} - \text{за несвързани почви} \end{cases}$							
5) $\bar{V}_x = \frac{\gamma_{Rd} V_{Ed,x}^f }{N_{max}} \leq \begin{cases} 1 - \text{за свързани почви} \\ \text{няма изискване} - \text{за несвързани почви} \end{cases}$							
6) $\bar{M}_y = \frac{\gamma_{Rd} M_{Ed,y}^f }{B_x N_{max}}$							
7) $\bar{F} = \begin{cases} \frac{1}{1000} \frac{\rho a_g S B_x}{\bar{c} / \gamma_M} - \text{за свързани почви (формулата е валидна при така приетите мерни единици)} \\ \frac{a_g S}{g \text{tg}\varphi'_d} - \text{за несвързани почви} \end{cases}$							
8) $\frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta \bar{V}_x)^{c_M}}{(\bar{N})^a [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c_M} (\gamma \bar{M}_y)^{c_M}}{(\bar{N})^c [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^d} - 1 \leq 0$							
*Номерът на всяка формула съответства на номер на колона от таблицата							

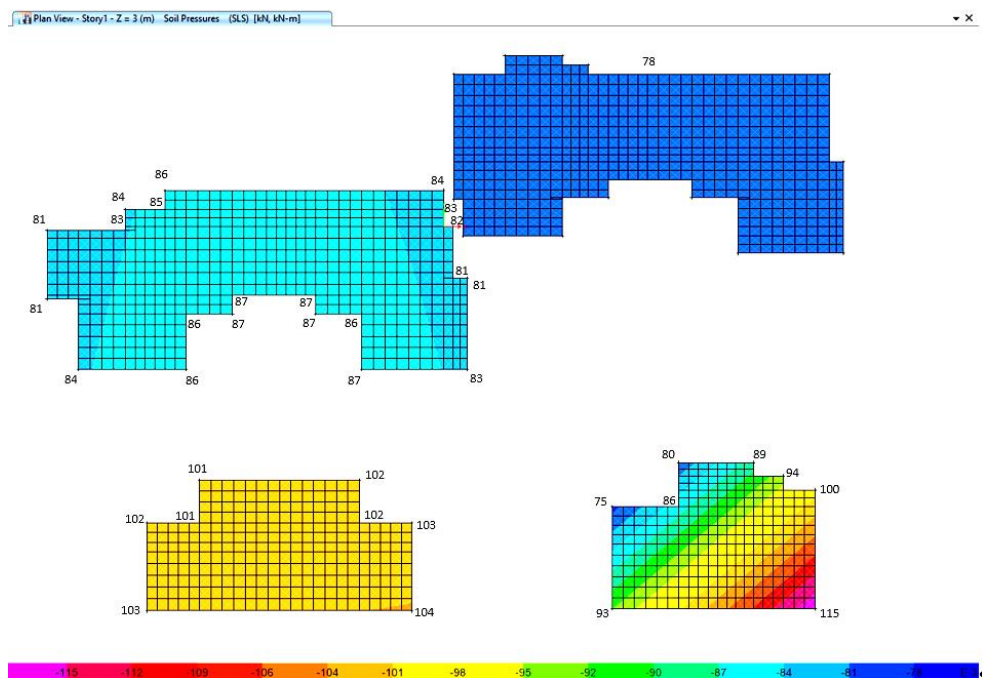
Таблица 7. Определяне на слягането на земята основа чрез метода на послойното сумиране

Слягане в т. М (средно слягане)												
Пласт	Точка i	h_i	z_i	γ_i	D	$\alpha^{\square}(z)$	$\sigma_{z,i}$	$\sigma_{\gamma,i}$	$0.2\sigma_{\gamma,i}$	$\sigma_{\gamma,i} + \frac{\sigma_{z,i}}{2}$	E_{oed}	s_i
			1*		2*	3*	4*	5*			**	6*
		[m]	[m]	[kN/m ³]	[m]		[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[m]
1	a	1.85	-	18.4	-	-	-	34.04	6.8	-	-	-
1	b	2.00	-	16.4	-	-	-	66.8	13.4	-	-	-
2	1	1.1	0.5	16.4	24.1	0.250	92.8	75.7	15.1	122.0	16 000	0.005
2	2	1.1	1.6	16.4	24.1	0.249	92.6	93.3	18.7	139.6	16 000	0.005
3	3	1.3	2.8	18.8	24.2	0.247	91.7	114.3	22.9	160.2	26 000	0.004
4	4	1.0	4.0	20.0	24.4	0.242	90.0	136.6	27.3	181.6	19 100	0.004
4	5	1.00	5.0	20.0	24.6	0.236	87.7	156.6	31.3	200.4	19 100	0.004
4	6	1.00	6.0	20.0	24.8	0.229	84.9	176.6	35.3	219.0	19 100	0.004
4	7	1.00	7.0	20.0	25.1	0.220	81.6	196.6	39.3	237.4	19 100	0.003
4	8	1.00	8.0	20.0	25.4	0.210	77.9	216.6	43.3	255.5	19 100	0.003
4	9	1.00	9.0	20.0	25.7	0.199	74.0	236.6	47.3	273.6	19 100	0.003
4	10	1.00	10.0	20.0	26.1	0.189	70.1	256.6	51.3	291.6	19 100	0.003
4	11	1.00	11.0	20.0	26.4	0.178	66.2	276.6	55.3	309.7	19 100	0.003
4	12	1.00	12.0	20.0	26.9	0.168	62.3	296.6	59.3	327.7	19 100	0.003
пълно слягане: $\sum s_i =$											0.043	
Формули:												
1) $z_i = \begin{cases} z_1 = 0.5h_1 - \text{за точка } i = 1 \\ z_2 = z_1 + 0.5(h_1 + h_2) - \text{за точка } i = 2 \\ z_i = z_{i-1} + 0.5(h_{i-1} + h_i) - \text{за точка } i \end{cases}$						2) $D = \sqrt{B_{x0}^2 + B_{y0}^2 + z^2}$						
3) $\alpha^{\square}(z) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{B_{x0}B_{y0}Dz}{(B_{x0}^2B_{y0}^2 + D^2z^2)} + \arctg\left(\frac{B_{x0}B_{y0}}{Dz}\right) \right]$												
4) $\sigma_{z,i} = 4\alpha^{\square} q_{av}$												
5) $\sigma_{\gamma,i} = \begin{cases} \sigma_a = \gamma_{n,пл.1} h_w; \sigma_b = \sigma_a + \gamma'_{пл.1} (D_f - h_w) \\ \sigma_1 = \sigma_b + 0.5\gamma'_1 h_1 - \text{за точка } i = 1 \\ \sigma_2 = \sigma_1 + 0.5(\gamma'_1 h_1 + \gamma'_2 h_2) - \text{за точка } i = 2 \\ \sigma_i = \sigma_{i-1} + 0.5(\gamma'_{i-1} h_{i-1} + \gamma'_i h_i) - \text{за точка } i \end{cases}$						6) $s_i = \frac{\beta h_i \sigma_{z,i}}{E_{oed}}$						
											Параметри:	
											$B_x = 43.96 \text{ m}$	
											$B_y = 19.66 \text{ m}$	
											$B_{x0} = 21.98 \text{ m}$	
$B_{y0} = 9.83 \text{ m}$												
$\beta = 0.80$												
$h_w = 7.90 \text{ m}$												
$D_f = 3.85 \text{ m}$												
Натоварване:												
$q_{min} = 92.78 \text{ kPa}$												
$q_{max} = 92.78 \text{ kPa}$												
$q_{av} = 92.78 \text{ kPa}$												
*Номерът на всяка формула съответства на номер на колона от таблицата												
** За определяне на междинни стойности на E_{oed} се използва линейна интерполация												

За оценка на достоверността на резултатите е изготвен и пространствен модел в средата на софтуерния продукт SETTLE-3 ROCSCIENCE, в който са позиционирани четирите конструкции и е изследвана цялата площадка, с отчитане на взаимодействието на фундаментните плочи (фиг. 7 – 9). Стойността на еластичния модул на циментопочвената възглавница е приет със стойност 200 000 kPa – [16]. Напреженията в основната плоскост на фундаментите са получени при предпоставка „корав фундамент“ в софтуера ETABS. Същите са приложени на ниво горен ръб циментопочвена възглавница в софтуера SETTLE-3 ROCSCIENCE. По този начин е показано деформираното състояние на почвения масив, а сляганята под фундаментите са изобразени пространствено. Резултатите кореспондират добре с аналитичните решения, а сляганята са в допустимите граници (под 50 mm при незначително завъртане).

Софтуерът SETTLE-3 ROCSCIENCE е базиран на следните предпоставки:

- програмата изчислява напреженията, пространствени вследствие на товарите, приложени на повърхността. От друга страна, преместванията (сляганята) и порният натиск се изчисляват едномерно при предпоставка, че възникват единствено вертикални премествания. Софтуерът е базиран на класическата геотехническа практика, а параметрите, които се използват в изчисленията, са подбрани така, че да отразяват едномерния характер на анализа;
- товарите се възприемат като „огъваеми“. Това означава, че напреженията в равнината, непосредствено под товарите, са константни, а преместванията не са;
- нивото на терена се намира на условна кота 0,00, дълбочината е позитивна в посока надолу, а натисковите напрежения са позитивни.



Фиг. 7. Напрежения в основната плоскост на фундаментните плочи от характеристична комбинация при предпоставка за корав фундамент, получени в ETABS

към земната основа и значително подобряват реагирането на системата „почва – фундамент – връхна конструкция“. В допълнение, този подход редуцира слягането под нормативно допустимото такова съгласно Националното приложение на БДС EN 1997 (Еврокод 7) и повишават носимоспособността (общата устойчивост) на земната основа заради по-дълбокото залягане на основната плоскост. Освен това, ЦПВ елиминира недостатъчната носимоспособност на земната основа в сеизмична изчислителна ситуация. Това се обуславя от действието им като фиктивен еластичен фундамент с по-голяма площ на основната плоскост.

Предлаганият от авторите повишен разход на цимент от 10 %, в сравнение с предложените 3 % – 8 % в [7 и 12], има следните предимства:

- значително се повишава натисковата якост на ЦПВ;
- повишават се деформационните параметри на ЦПВ, изразени чрез модула на общи деформации и модула на еластични деформации;
- по-високото циментово съдържание гарантира по-голяма дълготрайност на циментопочвената възглавница и по-голямата ѝ устойчивост на външни въздействия – повърхностни води, битови води, подземни води, сеизмично въздействие, което се отразява положително върху експлоатационния живот на сградите и съоръженията;
- постигането на тези подобрени качества на ЦПВ и на земната основа, в сравнение със стандартния разход на цимент, е за сметка на незначителното повишаване на стойността на СМР по изготвяне на циментопочвената възглавница.

Изборът на по-висока стойност на съдържанието на цимент в лъосоциментовата смес се базира и на проектните изисквания за минимални стойности на механичните параметри (якостни и деформационни), изразени съответно чрез едноосова якост и модул на обща деформация.

С оглед на изложеното и отчитайки предимствата и недостатъците на двата разгледани технологични метода за подобряване на земната основа (Вариант 1 – стандартна циментопочвена възглавница и Вариант 2 – дълбочинно циментопочвено смесване), авторите препоръчват изпълнението на Вариант 2. Това би осигурило бързо и прецизно изпълнение на подобрението на земната основа. Спецификата на метода предполага възможност за директен и автоматизиран контрол на параметрите на изпълнение, качеството и количеството на вложените материали във всеки един момент. Нещо повече, постига се висока степен на еднородност и повторимост на получените циментопочвени тела, което гарантира хомогенното поемане на натоварванията от сградите и предаването им към земната основа.

6. Заключение

Представените в разработката изследвания са насочени към решаване на въпроса, свързан с правилния подбор на състава, размерите и конструкцията на циментопочвената възглавница при оптимална икономическа ефективност. Основната насока е постигане на максимална якост, висока носимоспособност и дълготрайност на ЦПВ, гарантираща дългогодишна безпроблемна експлоатация на сградите и съоръженията. Получените резултати показват, че смеси със съдържание на 10 тегловни процента цимент (СЕМ IV/A 42,5 N), при водно съдържание на сместа, близко до оптималното, са много подходящи за изграждане

на циментопочвена възглавница, като гарантират висока якост и носимоспособност. Увеличението на стойността на строителните работи и разхода на материали е минимално, но положителното влияние върху строителството е значително по-голямо.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Berov, B., Ivanov, P.* Propadane na lyos mezhdurazgradovete Vidin i Nikopol. BAN, Problemi na geografiyata, 2014, 1 – 2, 76 – 88.
2. *Gunchev, G.* Lyosat v Severna Bulgaria. Byuletin na Geolozhkoto druzhestvo, 3, 1935, 16 – 79.
3. *Evstatiev, D.* Izsledvania varhu zazdravyavaneto na lyosa v Severna Bulgaria s portland-tsiment. Trudove varhu geologia na Bulgaria, ser. Inzh. geol. i hidrogeol., kn. IV, 1965, 131–153.
4. *Evstatiev, D.* Nyakoi zakonomernosti v izmenenieto na yakostnite pokazateli na tsimentolyosovite smesi. Izvestia na Geologicheskaya Institut., seria Inzhenerna geologia i hidrogeologia, kn. XXI – XXII, 1973, 87 – 101.
5. *Evstatiev, D.* Formirane na yakostta na tsimentopochvite. BAN, 1984, 94.
6. *Evstatiev, D., Angelova, R., red.* Tsimentatsia na skali i dispersni pochvi. BAN, 1993, 206.
7. *Evstatiev, D., Karastanev, D.* Izsledvania i prilozhenia na tsimentolyosa v Bulgaria. BAN, Inzhenerna geologia i hidrogeologia, 27, 2013, 85 – 112.
8. *Kostov, V., Todorov, M.* Fundirane. UASG, 2015, ISBN 978-954-724-082-7, 220.
9. *Minkov, M.* Lyosat v Severna Bulgaria. BAN, 1968, 202.
10. *Minkov, M., Evstatiev, D., Atanasov, T.* Inzhenernogeolozhki uslovnia na fundiraneto na AETs „Kozloduy“. Godishnik na Energoproekt, 13, № 1, 1969, 213 – 236.
11. *Minkov, M., Evstatiev, D.* Osnovni svoystva i prilozhimost na tsimentopochveni vazglavnitsi pri fundirane v propadachen lyos. Izvestia GI BAN, seria. Inzhenerna geologia i hidrogeologia, kn. XXI – XXII, 1973, 77 – 86.
12. *Minkov, M., Evstatiev, D.* Ukazania za fundirane na sgradi i saorazhenia v propadachni (lyosovi) pochvi posredstvom lyosotsimentova vazglavnitsa. Byuletin za stroitelstvo i arhitektura, 20, № 1 – 2, 1976, 4 – 21.
13. Normi za proektirane na plosko fundirane. Naredba № 1, DV, br. 85 ot 8.10.1996.
14. *Stefanov, G., Kremakova, B.* Stroitelni svoystva na balgarskite lyosovi pochvi. Tehnika, 1960, 260.
15. *Yaranov, D.* Lyosat i lyosovidnite sedimenti v Bulgaria. Izvestia na Pochvenia institut na BAN, kn. III, 1956, 37 – 76.
16. *Arellano, D., Thompson, M.* Stabilized Base Properties (Strength, Modulus, Fatigue) for Mechanistic-Based Airport Pavement Design. Technical Report on Research, Dep. Of Civil Eng., Univ. of Illinois, 1998, 119.
17. *Evlogiev, Y.* Evidence for the Aeolian Origin of Loess in the Danubian Plain, Geologica Balcanica, 36, 3 – 4, 2007, 31 – 39.

18. *Jefferson, I., Rogers, C., Evstatiev, D., Karastanev, D.* Chapter 25 Treatment of metastable loess soils: Lessons from Eastern Europe, Editors: Buddhima Indraratna, Jian Chu, Elsevier Geo-Engineering Book Series, Vol. 3, 2005, 723 – 762, ISSN 1571-9960, ISBN 9780080446332, [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80028-X](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80028-X).

19. *Karastanev, D., Antonov, D., Tchakalova, B., Trayanova, M.* Selection of optimum loess-cement mixture for construction of a compacted soil-cement cushion. *BAN, Inzhenerna geologia i hidrogeologia*, 30, 2016, 3 – 15.

20. *Tchakalova, B., Karastanev, D.* Geotechnical parameters of loess-cement mixture for construction of compacted soil-cement cushion. *Geologica Balcanica*, 46 (2), Sofia, Nov. 2017, 117 – 124.

21. *Pancheva, N.* Izgrazhdane na vedomstveni zhlishta na „AETs-Kozloduy” EAD v tsentralna gradska chast na gr. Kozloduy, UPI III i UPI IV v kv. 255 po plana na gr. Kozloduy. Chast Inzhenerna geologia i hidrogeologia, V3 dizayn, 2019.

RESEARCH ON LOESS-CEMENT MIXTURES AND MODELING OF THE INTERACTION FOUNDATION – LOESS-CEMENT CUSHION – LOESS IN GROUND STABILIZATION FOR THE CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS IN THE TOWN OF KOZLODUY

N. Milev¹, I. Ivanov²

Keywords: loess, cement-soil cushion, ground stabilization

ABSTRACT

With the development of civil engineering in Bulgaria, in the northern part of the Danube plain, several problems related to the collapse (quick subsidence and self-compaction) of the loess soils during wetting are established. The collapsibility of loess soils, the causes, and the prevention of this dangerous phenomenon for construction, are the subject of many studies. One of the most widely used methods in construction for stabilizing a loess ground is the cement-soil cushion (CSC). The main task of the present study is to select an effective technology for the construction and adequate composition of the cement-soil (loesscement) cushion under the foundations of buildings in the city of Kozloduy, founded on collapsible loess.

¹ Nikolai Milev, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Geotechnics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: n.milev@yoda-bg.com

² Ivailo Ivanov, Assoc. Prof. Dr. Eng. Geol., Dept. “Geotechnics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: iji_fte@uacg.bg