



Циментолъсови смеси с високо водно съдържание

Боряна Чакалова

Геологически институт, БАН, 1113 София; E-mail: boriana@geology.bas.bg

B. Tchakalova. 2006. *Loess-cement mixtures with high water content*. – *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 67, 1–3, 117–122.

Abstract. The paper presents the results from laboratory analyses of mixtures of silty loess and small quantities of Ordinary Portland cement prepared at high water content. The test specimens formed without compaction manifest unconfined compressive strength above 1.0 MPa after 28 days of curing and hydraulic conductivity less than $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. The so-called “plastic” soil-cement mixtures analyzed in this study would be applied successfully in deep and surface stabilization of loess bases of 1st as well as 2nd type.

Key words: loess soil, saturated, non-compacted stabilization, strength behaviour.

Въведение

Лъсовите почви се отличават от другите кватернерни наслаги по своята недоуплътненост и структурна неустойчивост. При овлажняване якостта на структурните връзки рязко пада и лъсовата основа пропада. Пропадането на лъса е важен елемент на геоложката опасност в България (Бручев, 1994). В днешно време по техногенни причини в лъсовите терени постъпват огромни количества вода. Изменените влажностни условия модифицират преовлажнения лъс в урбанизираните територии от пропадъчна при намокряне почва в силно деформируема земна основа (Karastanev, 1998). Лъсовата основа, дори и вече да е непропадъчна, преминава в неравновесно и неустойчиво механично състояние. Съчетанието на отслабени структурни връзки, намалени ефективни напрежения и положително порово налягане (особено при динамично въздействие) води до значително понижаване на якостта и носещата способност.

Световната геотехническа наука е разработила ефикасни методи за подобряване на слаби почви, при много от които се прилага повърхностно и дълбочинно заздравяване с хидравлични свързващи вещества. У нас до този момент за ликвидиране на пропадъчността и водопропускливостта на лъса успешно е използвано повърхностно заздравяване с портландцимент (Минков, Евстатиев, 1975). При лъс с голяма дебелина по-добър ефект се постига при дълбочинно заздравяване. В много страни сравнително широко приложение имат варовите и варопочвените пилоти (Абелев, 1983). В отделни случаи е прилагана силикатизация или електроси-

ликатизация (Bally, 1988; Voronkevich et al., 1990). Като перспективно се счита и хидроструйното заздравяване (Welsh, 1987). Базирайки се на теренни експерименти, Yüewen (1996) предлага прилагането на циментопочвени пилоти, изградени чрез дълбочинно смесване на местен лъс и цимент. Bell (1993) посочва предимствата на т.нар. „пластични“ циментопочвени смеси, приготвени при високи водни съдържания и прилагани без уплътняване за заздравяване на водонаситени почви. У нас „пластична“ циментопочва е използвана за изграждане на противофилтрационни екрани на водоизравнителни и при фундаране на сгради (Евстатиев, 1969; Минков, Евстатиев, 1975).

В настоящата статия се описват свойствата и технологичните характеристики на пластични циментопочви с оглед използването им за дълбочинно подобряване на лъсови терени в Северна България.

Характеристика на изходните материали

За изготвянето на смеси с високо водно съдържание без уплътняване е използвана представителна проба от прахов лъс от района на Козлодуй. По класификационните си показатели (табл. 1 и 2) той се определя като прахова пясъчлива глина (по БДС) и като „CL-lean clay with sand“ (по ASTM). Преобладаваща е праховата фракция (0,1–0,005 mm) като едрият прах (0,1–0,01 mm) е около 4 пъти повече от дребния (0,01–0,005 mm).

В използваната лъсова разновидност съдържанието на SiO_2 е 53% (табл. 3). Отношението

Таблица 1
Класификационни показатели на типичен лъос по БДС 676

Table 1
Classification parameters of typical loess soil according to BDS 676

Зърнометричен състав (%)				Пластичност (%)		
чакъл >2 mm	пясък 2 – 0,1 mm	прах 0,1 – 0,005 mm	глина < 0,005 mm	W _p	W _L	I _p
0	4	87	9	17,3	29,4	12,1

Таблица 2
Класификационни показатели на типичен лъос по ASTM D 4318

Table 2
Classification parameters of typical loess soil according to ASTM D 4318

Зърнометричен състав (%)			Пластичност (%)		
чакъл >4,75 mm	пясък 4,75-0,075 mm	прах+глина <0,075 mm	PL	LL	PI
0	17	83	17,3	35,6	18,3

Таблица 3
Химически състав на типичен лъос, определен с рентгенофлуоресцентен анализ, %

Table 3
Chemical composition of typical loess soil determined by X-ray fluorescent analysis, %

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ЗН 1000 °C
53,93	0,65	11,34	3,80	0,05	3,46	11,02	1,50	1,61	13,21

SiO₂:R₂O₃ използвано като геохимичен белег, е 3,6. Тази стойност е характерна за праховия лъос (Минков, 1968) и се съгласува добре с ниското съдържание на глинеста фракция (9%). Дългогодишни изследвания показват, че праховият лъос е слабо засолен. Общото количество на водоразтворимите соли е под 0,30% (Минков, 1968). Водният извлек е слабо алкален. Стойността на рН варира около 8. Във водните извлекци присъстват и трите вида водоразтворими соли, но количеството на HCO₃ е около 80% от общата анионна сума, изразена в meq/dm³. От катионите доминира Са йон. Поради малкото съдържание на глинеста фракция количеството на хумусно вещество е незначително.

По класификационни показатели и веществен състав изследваната лъосова разновидност се счита за подходяща за заздравяване с хидравлични свързващи вещества (Евстатиев, 1984). Като заздравител е използван преснопроизведен портландцимент, сертифициран по БДС EN ISO 9001/2001 и БДС EN ISO 14001/1998.

Методика на изследването

За предвидените лабораторни изследвания са приготвени цилиндрични пробни образци с диаметър d = 5 cm и височина h = 10 cm (h:d = 2:1)

от неуплътнена циментопочва с високо водно съдържание по методика, съобразена с изискванията на японски стандарт JSF T 821-1990: Practice for Making and Curing Noncompacted Stabilized Soil Specimens (фиг. 1).

Към въздушносух лъос е добавян портландцимент в количество 5, 10 и 15 тегл. % спрямо теглото на почвата. След хомогенизиране и до-



Фиг. 1. Приготвяне на цилиндрични пробни образци от циментопочвена смес с високо водно съдържание

Fig. 1. Preparation of cylindrical test samples of loess-cement mixture at high water content



Фиг. 2. Пробни образци от циментопочвена смес след 28-дневно отлежаване

Fig. 2. Test samples of loess-cement mixture after 28-days of curing time

бавяне на определеното количество вода приготвената смес е изсипвана (изливана) на три равни части в цилиндрични матрици като от всяка прибавена част е отстранен въздухът чрез слабо стръскване. Цилиндричните матрици са съхранявани при 100% относителна влажност и температура около 20°C в продължение на 28 дни.

Подвижността на смесите е оценена чрез определяне на тяхната консистенция по метода на Абрамис (БДС 7016). Те се делят на 4 класа в зависимост от големината на слягането след изсипването им в стандартизираният пресечен конус. Смесите от клас K_1 (слягане 0–2 cm) се приема, че са със земновлажна консистенция, смесите от клас K_2 и K_3 (слягане съответно 2–8 cm и 8–14 cm) — с пластична консисетнция, а смесите от клас K_4 (слягане 14 cm) — с течна консистенция (Симеонов, 1991).

Извадените от формите пробни образци са изпитвани след 24-часово водонасищане. Якостта на едноосен натиск q_u е определена чрез разрушаване на пробни образци на хидравлична преса при скорост на вертикалните деформации 11,8 mm/h. Коефициентът на филтрация k е определен във филтрационен апарат по метода на „падащ напор“ (Head, 1982), като във филтраци-

онната касета са вграждани цилиндрични образци с $d = 9,4$ cm и $h = 10$ cm. Посочените стойности за якостта и водоплътността са средноаритметични от изпитването на три успоредни пробни образци (фиг. 2).

Резултати от изследването

Подвижност на циментопочвените смеси

За целите на настоящото изследване предлаганите циментопочвени смеси е необходимо да запълват плътно определена форма и да се уплътняват при възможно най-малки усилия без да се разслояват и загубват своята еднородност. С нарастване на водоциментовото съотношение В/Ц подвижността на смесите се увеличава, тъй като намалява гранично състояние на срязване и вискозитета им. Резултати от досегашни изследвания са показали, че циментопочвените смеси придобиват достатъчна подвижност и могат лесно да се изсипват (изливат) при водни съдържания около и малко над границата на протичане на заздравяваната почва (Karastanev, 1998). В тази връзка е определена границата на протичане на льоса и на смесите с различно количество цимент по БДС и ASTM. Установи се, че добавянето на цимент увеличава границата на протичане на смеси само 0,5–1,0%. На тази база се прие за начално водно съдържание за всички смеси границата на протичане W_L на льоса.

Смесите, които са обект на настоящото изследване, имат сравнително висока специфична повърхност, поради праховите размери на техните компоненти. Циментовото тесто се разпределя върху по-голяма площ, с което се намалява дебелината на циментовия слой около почвените частици и се увеличава триенето между тях. По-високата специфична повърхност е предпоставка за намаляване на подвижността. При водно съдържание, съвпадащо с границата на протичане по БДС (29,4%), изследваните смеси се оказаха със земновлажна консистенция (табл. 4)

Таблица 4

Консистенция по БДС 7016 на смеси от льос и 10% портландцимент в зависимост от водното съдържание

Table 4

Consistency according to BDS 7016 of loess-cement mixtures in comparison with the water content

Водно съдържание %	Слягане cm	Клас —	Консистенция —
29,5	<2	K_1	земновлажна
33,6	4,0	K_2	пластична
38,4	11,6	K_3	пластична
40,5	12,7	K_3	пластична
44,5	>14	K_4	течна

Таблица 5

Якост на едноосен натиск q_u на смеси от лъос и портландцимент след 28-дневно отлежаване

Table 5

Unconfined compressive strength q_u of loess-cement mixtures after 28-days of curing time

Количество цимент	В/Ц фактор	Изходно водно съдържание	Обемна плътност след 28 дни	Якост на едноосен натиск
$c, \%$	—	$W_i, \%$	$\rho, \text{g/cm}^3$	q_u, MPa
5	7,3	34,39	1,84	0,81
5	8,4	39,44	1,80	0,56
5	9,5	44,39	1,77	0,43
10	3,9	33,64	1,86	1,45
10	4,4	38,39	1,81	1,28
10	4,95	44,52	1,77	0,90
15	2,7	33,83	1,85	1,77
15	3,1	40,64	1,80	1,45
15	3,5	43,87	1,78	0,97

и не са пригодни за приложение. При увеличаване на водното съдържание с 2–3% над W_L смесите са слабо пластични (клас K_2). Едва при водни съдържания над установената по ASTM граница на протичане $LL = 35,6\%$ те придобиват по-голяма пластичност (клас K_3) и лесно се изливат и самоуплътняват. При водно съдържание над 44,5% смесите преминават в течна консистенция (клас K_4) и са склонни към водоотделяне, разслояване и дехомогенизиране в резултат на седиментационни процеси.

Всички образци за лабораторни изпитвания са изготвени от смеси с водни съдържания от 33% до 44,5%, т.е. в диапазона, в който те придобиват и запазват пластична консистенция.

Якост на едноосен натиск

Счита се, че при смеси с малки количества заздравител от особено важно значение за придобиване на по-голяма якост е доброто уплътняване.

При кратки срокове на отлежаване пластичните смеси с високо водно съдържание, приготвени без уплътняване, имат по-малка якост на 28-я ден, отколкото корави смеси със същия състав, уплътнени при оптимално водно съдържание W_{opt} до стандартна плътност c_{ds} . Якостта на пластичните циментопочви нараства чувствително във времето и в много случаи след по-продължително отлежаване тя е дори по-висока от тази на коравите циментопочви. Установено е, че при екрани от пластична циментопочва в Северна България якостта нараства от 0,7–1,0 МПа на 28-я ден до 12–16 МПа след 20 години (Карастанев, 1988). Счита се, че това интензивно нарастване на якостта се дължи на възникването на допълнителни циментиращи вещества (Евстатиев, 1969).

При изследваните смеси в зависимост от количеството на цимента и изходното водно съдържание якостта на едноосен натиск q_u след 28-дневно отлежаване варира от 0,4 до 1,8 МПа (табл. 5). Якостта нараства с увеличаване на количеството на цимента (фиг. 3) като смесите с

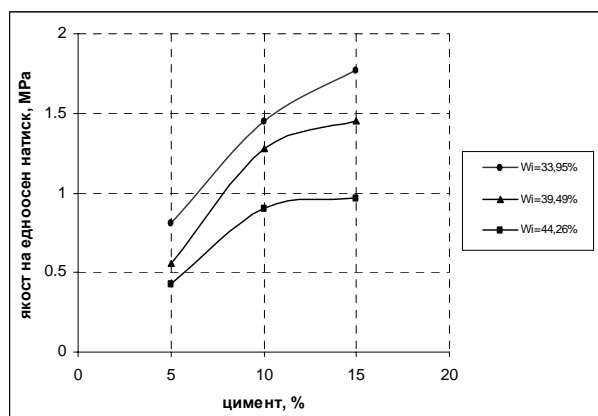
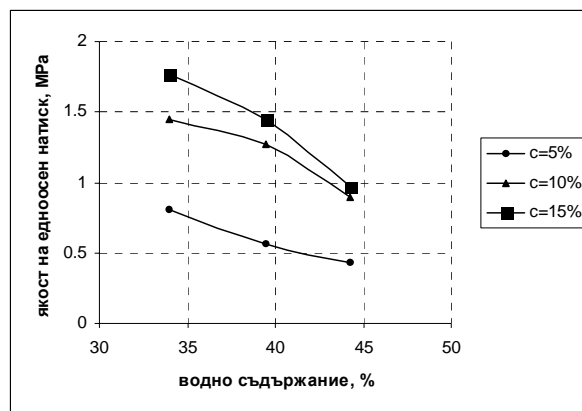
Фиг. 3. Зависимост якост на едноосен натиск q_u от количеството цимент c Fig. 3. Unconfined compressive strength q_u versus cement content c Фиг. 4. Зависимост якост на едноосен натиск q_u от водното съдържание W_i Fig. 4. Unconfined compressive strength q_u versus water content W_i

Таблица 6

Коефициент на филтрация на смеси от лъос и портландцимент след 28-дневно отлежаване

Table 6

Permeability of loess-cement mixtures after 28-days of curing time

Количество цимент	Водно съдържание	Обемна плътност	Коефициент на филтрация
c, %	W _i , %	ρ, g/cm ³	k, m/s
5	39,44	1,80	8,51*10 ⁻⁷
10	33,64	1,86	1,50*10 ⁻⁶
10	38,39	1,81	7,54*10 ⁻⁸
10	44,52	1,77	1,19*10 ⁻⁹
15	40,64	1,80	1,01*10 ⁻⁷

10 и 15% цимент придобиват на 28-я ден якост около и над 1,0 МРа. В потвърждение на по-рано извършени изследвания (Kitazume et al, 2000; Антонов, 2002) якостта на едноосен натиск намалява с увеличаването на водното съдържание (фиг. 4). При увеличаване на водното съдържание (респективно водоциментовото отношение В/Ц) зърната на циментовия клинкер се раздалчават и това затруднява структурообразуването в циментовата смес. Формираните хидросиликати и алумосиликати при втвърдяването на цимента не могат да свържат всички зърна в непрекъснатата мрежа, което е най-вероятната причина за понижаване на якостта.

Коефициент на филтрация

Коефициентът на филтрация на прахов лъос в естествено състояние е средно $1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s (Минков, Евстатиев, 1962). Заздравеният лъос има значително по-голяма водоплътност. Коефициентът на филтрация на смеси от прахов лъос и 10% портландцимент, уплътнени при W_{opt} до r_s , варира от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-9}$ m/s (Антонов, 2002). При изследваните смеси, приготвени при $W_i > LL$ без уплътняване, коефициентът на филтрация се изменя приблизително в същите граници (табл. 6). Резултатите от извършените досега филтрационни изпитвания са недостатъчни, за да се оцени влиянието на количеството на цимента и на водното съдържание върху водоплътността.

Технологична характеристика на смесите

Смесите от прахов лъос и 5–15% портландцимент с водно съдържание над границата на протичане по ASTM са достатъчно подвижни (клас К₃) и лесно се изсипват (изливат) и самоуплът-

няват в достатъчна степен. Те са устойчиви и поради праховия си състав съхраняват продължително време (повече от 60 min) своята първоначална подвижност. Изградените с тях пробни образци имат плътна структура. След 28-дневно отлежаване във влажна среда не се установи свиване и напукване на втвърдената маса.

Заклучение

Изследваните пластични циментопочвени смеси след 28-дневно отлежаване придобиват якост над 1 МРа и коефициент на филтрация под $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Те са с добра технологична характеристика и приготвянето, транспортирането и приложението им няма да създават затруднения. Изхождайки от получените резултати се установи, че най-подходящи за практическо приложение от технологична и икономическа гледна точка са смесите от прахов лъос и 10% портландцимент с водно съдържание 38–40%. Освен за изграждане на циментолъосови пилоти за дълбочинно подобряване на лъосови основи с голяма дебелина на пропадъчната зона тези смеси са подходящи и за изграждане на противофилтрационни екрани на водни басейни, защитни облицовки на хранилища за индустриални и битови отпадъци, шлицови стени чрез застъпване на отделните колони и др.

Приложението на пластичните циментопочвени смеси за различни геотехнически цели трябва да се предшества от определяне на техните свойства след по-продължителен срок на отлежаване, потвърждаване на ефективността от тяхното използване чрез полеви опити и оценка на въздействието им върху околната среда.

Благодарности. Изследването е направено в рамките на проект НЗ-1206, финансиран от Национален фонд „Научни изследвания“ при МОН.

Литература

- Абелев, М. Ю. 1983. Новые исследования свойств слабых грунтов в СССР. — В: *VII Дунайско—Европейская конференция по механике грунтов и фундаментостроению*. Кишинев, том 3, 47—58.
- Антонов, Д. 2002. *Льосът в района на АЕЦ „Козлодуй“ като среда за погребване на ниско и средноактивни отпадъци*. Докторска дисертация. С., Геологически институт при БАН, 166 с.
- Бручев, Ил. (Ред.). 1994. *Карта на геоложката опасност на България в М 1:500 000 с обяснителен текст към нея*. Изд. ВТС — Троян.
- Евстатиев, Д. 1969. Относно влиянието на изходната влажност върху якостта на циментогрунта. — *Изв. Геол. инст, сер. инж. геол. и хидрогеол.*, 18—19, 127—136.
- Евстатиев, Д. 1984. *Формиране на якостта на циментопочвите*. С., БАН, 94
- Карастанев, Д. 1988. *Подобряване на инженерногеоложките свойства на льоса за нуждите на хидромелиоративното строителство*. Докторска дисертация, С., БАН, 161 с.
- Минков, М. 1968. *Льосът в Северна България. Комплексно изследване*. С., БАН, 202 с.
- Минков, М., Д. Евстатиев. 1962. Изследвания върху водопропускливостта на льосови скали в Северна България. — *Изв на Геол. инст.*, 9, 203—211.
- Минков, М., Д. Евстатиев. 1975. *Основи, облицовки и екрани от заздрави льосови почви*. С., Техника, 189 с.
- Симеонов, Й. 1991. Бетони. В: *Строителни материали*. С., Техника, 125—170.
- Bally, R. J. 1988. Some specific problems of wetted loessial soils in civil engineering. — *Engineering Geology*, 25, 303—324.
- Bell, B. G. 1993. *Engineering Treatment of Soils*. London, E & FN Spon, 302 p.
- Karastanev, D. 1998. Influence of moisture content on strength behaviour of loess. — In: *International Symposium on Problematic Soils*. IS—Tohoku'98, Japan, October 25—28, 457—460.
- Kitazume, M., T. Nakamura, D. Karastanev. 2000. Strength behaviour of loess soil improved by stabilizing agents. — In: *Third International Conference on Ground Improvement Techniques*, 25-26 September 2000, Singapore, 227—232.
- Head, U. H. 1982. *Manual of Soil Laboratory Testing*, vol. 2. London, Pentech Press, 449—455.
- Voronkevich, S., T. Abramova, N. Larionova. 1990. Enhancing the reliability of injectible chemical stabilization of loessial collapsible soils. — In: *Proceedings 6-th IAEG Congress*, vol. 3, Amsterdam, 2055—2064.
- Yuewen, J. Ed. 1996. Deep-cement-mixing piles stabilizing the saturated loess. — In: *Grouting and Deep Mixing. Proc. of IS—Tokyo'96*, May 14-17, 573—576.
- Welsh, J. (Ed.). 1987. *Soil Improvement. — A Ten Year Update*. — *Geotechn. Publ.*, 12, New York ASCE, 331 p.

(Постъпила на 28.06.2006 г., приета за печат на 28.09.2006 г.)