

Поглавље 3– Стабилизација и модификација тла примјеном креча, цемента и летећег пепела

3.1. Увод

Модификација означава третман тла одређеним материјалом да би се смањила пластичност и повећала обрадљивост.

Стабилизацијом се постиже дуготрајна чврстоћа и постојаност мјешавине тла и стабилизатора.

Традиционална средства за стабилизацију су:

- креч
- цемент
- летећи пепео

Летећи пепео (flyash) Летећи пепео је споредни производ сагоријевања угља у термоелектранама. У односу на креч и цемент има мала везујућа својства. Постоје двије класе летећег пепела: класа С и класа F. Класа С се одликује високовезујућим својствима због високог садржаја СаО. Класи F је потребан активатор као што је цемент или креч

Свако стабилизационо средство на бази калцијума садржи одређену количину слободног креча (СаО , Са(ОН)₂) који реагује са финим честицама глине и понеких прашина. Ово је такозвана пуцоланска реакција. Ако је обезбијеђена довољна количина креча рН вриједност тла расте преко 10.5 што омогућава распадање честица глине. Ослобођени силицијум и алуминијум реагују са калцијумом формирајући калцијум-силикатне-хидрате (CSH) и калцијум-алумино-хидрате (САН) који формирају матрикс од кога потиче повећање чврстоће тла.

Одмах након мијешања катјони калцијума замјењују воду и друге јоне на површини глиненых честица. Флокулација и агломерација доводе до смањења пластичности и тенденције ка бубрењу и појави пукотина. Глина постаје дробива и грануларна и лакше је са њом радити. Пуцоланска реакција је спора у односу на реакцију флокулације/агломерације у тлу.

Портланд цемент и летећи пепео типа С такође ослобађају одређену количину креча током хидратације калцијум силиката и калцијум алумината, која учествује у пуцоланској реакцији. Цементирање честица тла у овом случају је брзо, што је неповољно код третмана пластичног и глиновитог тла гдје је потребно одређено вријеме за механичку манипулацију над тлом како би се оно стабилизovalo на одговарајући начин.

Предности третмана:

- Смањење скупљања/бубрења експанзивног тла или постојећег материјала
- Повећање чврстоће – потпора за коловозну конструкцију
- смањење дебљине конструкције
- коришћење локалног материјала
- смањење кретања влаге
- обезбјеђење радне платформе за иградњу следећих слојева кроз сушење влажних зона и/или привремено повећање чврстоће

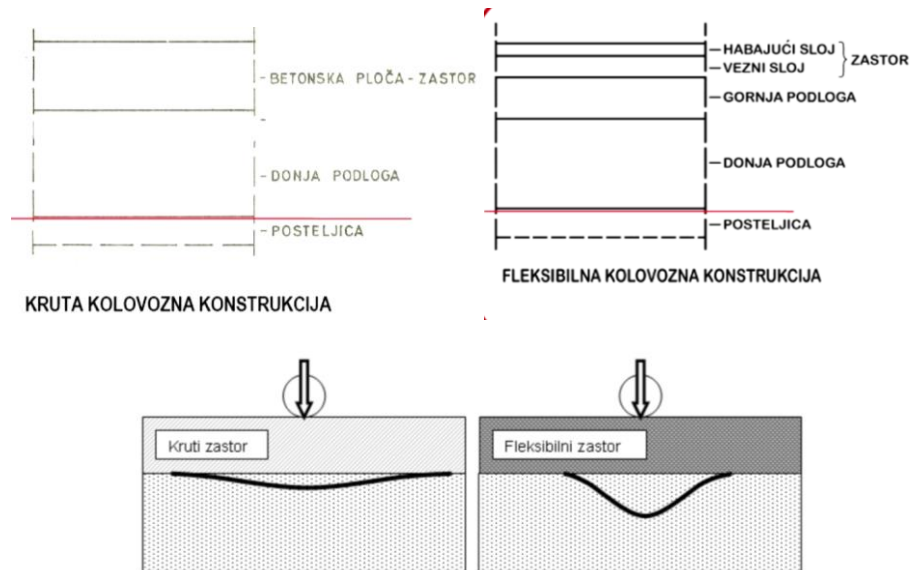
Лабораторијски тестови су кључни за одабир врсте и процента средства за стабилизацију тако да би се задовољили пројектни критеријуми.

Могуће је коришћење комбинација адитива:

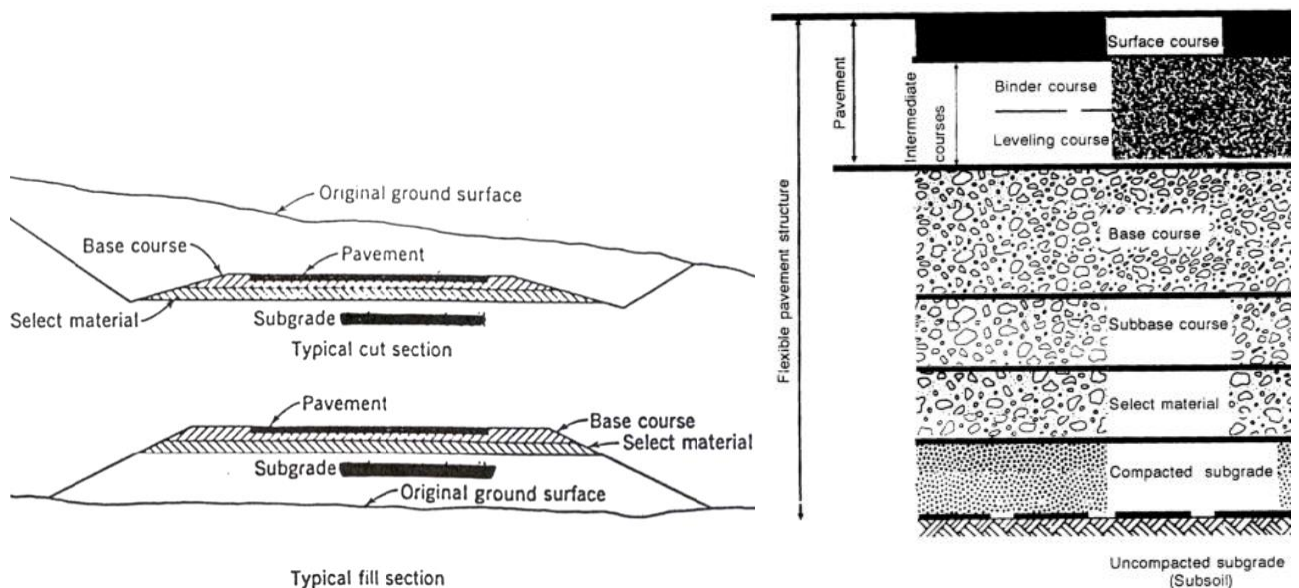
- креч и летећи пепео у односу од 1:1 до 1:9
 - цемент и летећи пепео у односу 1:3 до 1:4
- креч, цемент и летећи пепео у односу 1:2:4, респективно

2.3.1. Дјелови коловозне конструкције

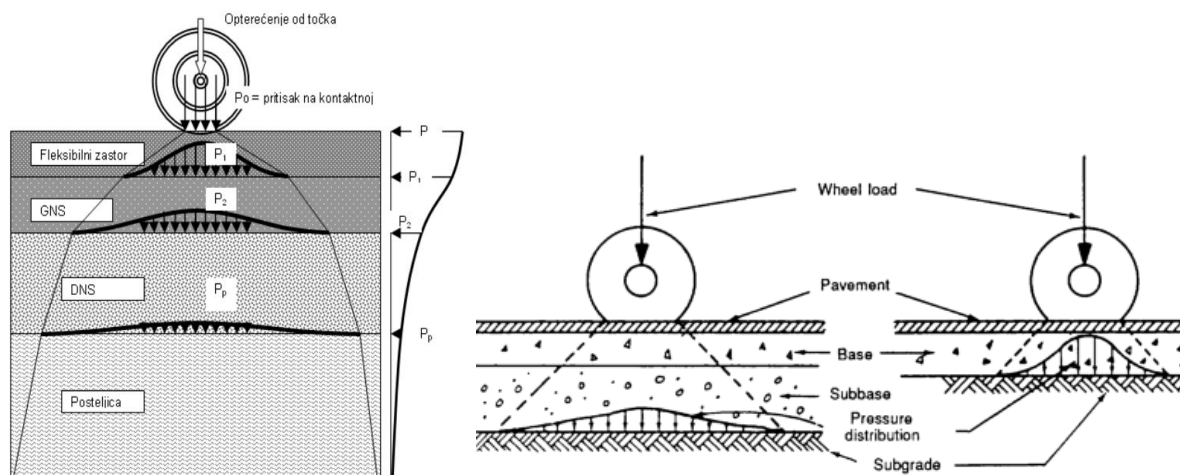
Највећа примјена наведених састојака је у путоградњи, за стабилизацију постелице и доње подлоге, због чега ће у овом поглављу бити приказани основни типови коловозних конструкција и њихових слојева. Коловозне конструкције могу бити круте (бетонски коловози) и флексибилне (асфалтни коловози).



Слика 3.1: Типови коловозних конструкција – слојеви и начин преношења оптерећења



Слика 3.2: Енглески термини за поједине дјелове коловозне конструкције



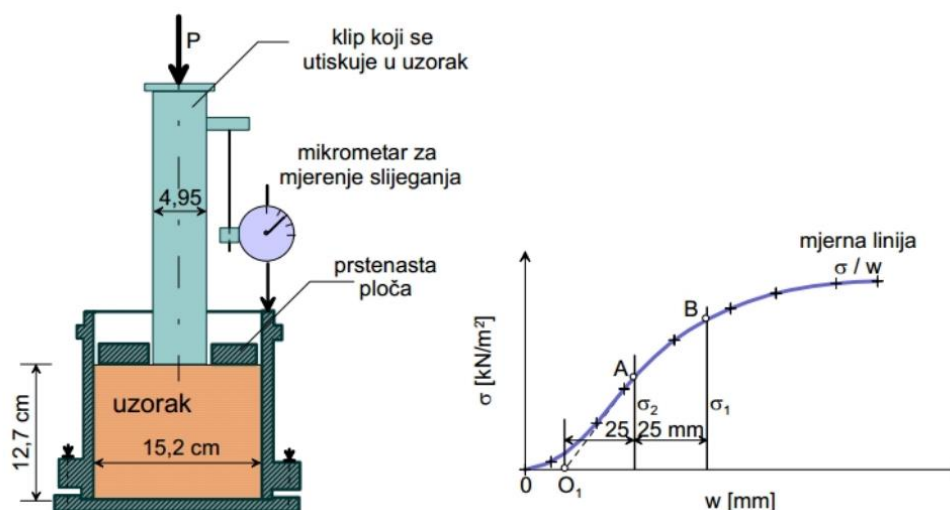
Слика 3.3: Флексибилна коловозна конструкција и шема преноса оптерећења од осовине возила кроз слојеве

3.2. Оцјена квалитета постелице

CBR Калифорнијски индекс носивости (California bearing ratio)

Овај индекс служи за оцјену носивости тла и тла стабилизованог везивима. Првенствено је намијењен испитивању постелице код димензионисања флексибилних-асфалтних застора а користи се и за испитивање стабилизованог тла уопште.

Опит се изводи тако што се у калуп угради узорак према Прокторовом поступку. У узорак се затим утискује клип брзином 1мм/с, при чему се белже сила на клипу и дубина утискивања клипа у узорак (слика 3.4). Мјерадавне вриједности чврстоће су за утискивање од 2.5мм (σ_A) и утискивање од 5мм (σ_B).



Слика 3.4: Апаратура за CBR опит и типични резултати

Вриједност индекса се добија као количник добијених напона и напрезања за стандардни материјал ($\sigma_{AN}=6900 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_{BN}=10300 \text{ kN/m}^2$) изражене у процентуално.

	uscs	CBR (%)
KRUPNOZRNA TLA	GW	40 – 80
	GP	30 – 60
	GM	20 – 60
	GC	20 – 40
	SW	20 – 40
	SP	10 – 40
	SM	10 – 40
	SC	5 – 20
SITNOZRNA TLA	ML	< 15
	CL LL < 50%	< 15
	OL	< 5
	MH	< 10
	CH LL > 50%	< 15
	OH	< 5

CBR	Kvalitet posteljice
2 – 5	Vrlo loša posteljica
5 – 8	Loša posteljica
8 – 20	Posteljica srednjeg kvaliteta
20 – 30	Dobra posteljica
30 - 100	Odlična posteljica

Слика 3.5: Опсези вриједности CBR за различита тла и оцјена квалитета постељице

Резилиентни модул M_R (Resilient modulus) је процјена модула еластичности постељице али при динамичком оптерећењу. Утврђује се триаксијалним тестом гдје се примјењује циклично аксијално оптерећење при константном бочном напону.

Класификација	CBR	M_R (МПа)	Опис
Добар	≥ 10	138	Шљункови, дробљени камен и пјесковито тло GW,GP,GM,SW,SP,SM
Средње повољан	5 – 9	69	Заглињени шљунак и пијесак, прашинаста тла GM,GC,SM,SC
Лош	3 – 5	35	Фини прашинасти пјескови, глине, прашине, органска тла CL,CH,ML,MH,CM,OL,OH

За круту коловозну конструкцију је захтијева CBR веће од 3% а за флексибилну да је већи од 5%. Уколико је CBR мањи од 2% потребна је стабилизација постељице.

3.3. Стабилизација примјеном креча (*lime stabilisation*)

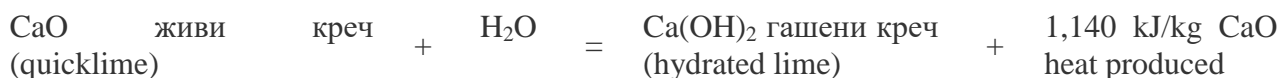
Врсте креча:

- Живи креч (quick lime) CaO – добија се жарењем кречњака/доломита
- Гашени креч (hydrated lime) – Ca(OH)_2
- Течни креч (lime slurry) – суспензија гашеног креча у води добијена или од гашеног или од живог креча

Уобичајено је да се додаје 3-6% у односу на масу сувог тла. Оптимални садржај креча се одређује на основу Eades и Grim рН теста гдје одређује количина креча потребна да се постигне пројектна рН од приближно 12.4. Оптимални проценат креча мора бити провјерен на основу испитивања чврстоће.

Механизми дејства креча на тло:

1. Смањење влажности тла. У тренутку када је крећ помијешан са влажним тлом, почиње егзотермна реакција тј. долази до ослобађања топлоте у контакту креча и воде из тла:

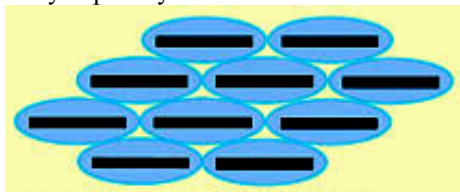


Реакција је брза и доводи до сушења тла.

2. Модификација (живи креч или гашени креч/ течни креч)

Модификација и стабилизација се дешавају само код глиновитог тла. Када се тлу дода живи или гашени креч, долази до размјене јона на глиеним плочицама, односно до увођења јона калцијума на површину плочица што утиче на њихов просторни распоред (видјети слику). Ово увећава чврстоћу и дешава се прилично брзо (обично у оквиру два часа мада може потрајати и један дан зависно од теренских услова)

Честице глине поравнате и окружене водом што омогућава њихово лако клизање што као резултат даје малу чврстоћу глине.



Након модификације кречом смањује се слој воде и мијења се просторни распоред честица што доводи до повећања чврстоће.

Слика 3.6: Промјене у распореду честица глине при додавању креча

3. Стабилизација (живи креч или гашени креч / течни креч)

Силицијум и лауминијум из минерала глине реагују са калцијумом из креча при чему се ствара калцијум силикат хидрат и калцијум алуминат хидрат. Ове реакције се споро одвијају и сличне су реакцијама при очвршћавању цемента. Прираст чврстоће се може наставити и преко 10 година.

Технолошки поступак се састоји из следећих корака:

- Разастирање креча
- Мијешање креча и тла до специфициране дубине
- лагано збијање
- поновно мијешање и подешавање влажности
- Збијање
- његовање

Гашени креч се може примјенити брже него течни креч али због финоће честица ствара се прашина и није погодан за употребу у насељеним подручјима. Течни креч се може аплицирати комбиновано - разастирањем и прскањем, не ствара се прашина и при коначном мијешању је потребна мања количина воде. Недостати су брзина примјене и трошкови у вези опреме.

Предности сувог гашеног креча у економичности (концентрована форма креча, заузима мање простора), одличан је за исушивање влажног тла. Недостаци су: већа количина воде потребна да би био претворен у гашени креч и потреба за интензивнијим мијешањем са тлом у односу на гашени креч и течни креч.



Слика 3.7: Аплицирање течног креча



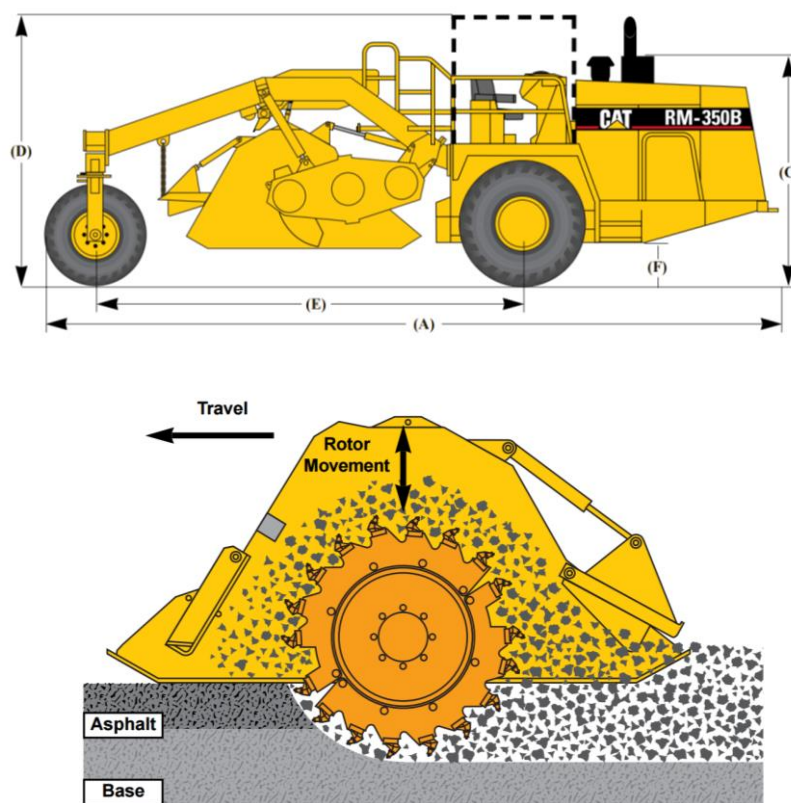
Слика 3.8: Аплицирање сувог креча

Битно је да се креч у потпуности измијеша са тлом по дубини слоја који се стабилизује (максимална дубина 25-50цм). У случају живог креча довољно воде мора бити додато да би се креч хидрирао. Такође додатна вода је потребна да би креч реаговао са глином.

Након мијешања спроводи се лагано збијање са глатким ваљком из следећих разлога: креч се доводи у интимну везу са глином, смањује губитак воде испаравањем, смањује се утицај падавина, смањује се ризик од карбонизације креча. Карбонизација креча је претварање креча у калцијум-карбонат у контакту са угљен-диоксидом што смањује ефективну количину активног креча.



Слика 3.9: Контрола дозирања креча ($\text{кг}/\text{м}^2$)



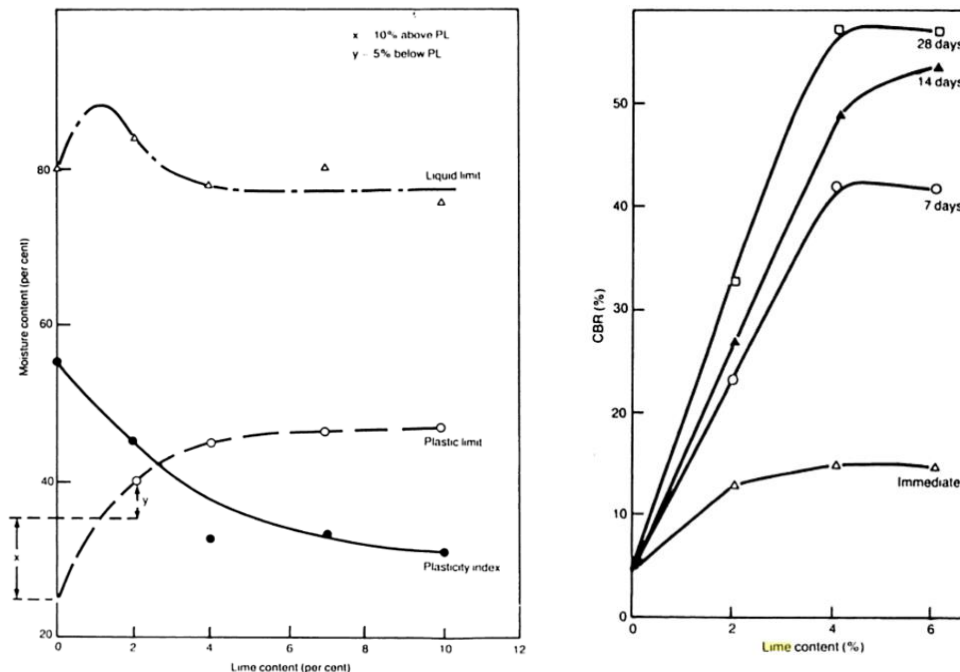
Слика 3.10: Мијешање тла комбинованом машином за рециклирање асфалта/мијешање тла - CAT RM-350B Reclaimer/Mixer

Финално збијање се врши након периода сазријевања типично од 24-72 часа гдје се допушта кречу да модификује тло – промјена пластичности, оптималне влажности. Након тога се врши поновно мијешање и подешавање влажности материјала. За дебље слојеве је најпогоднија комбинација јежа и глатког ваљка. Као код бетона, адекватно његовање је потребно за развијање максималне чврстоће и издржљивости. Потребно је одржавати влажост на задовољавајућем нивоу прскањем површине и коришћењем битумена. Максимална температура је 7 степени.

Максимално вријеме до почетка збијања.

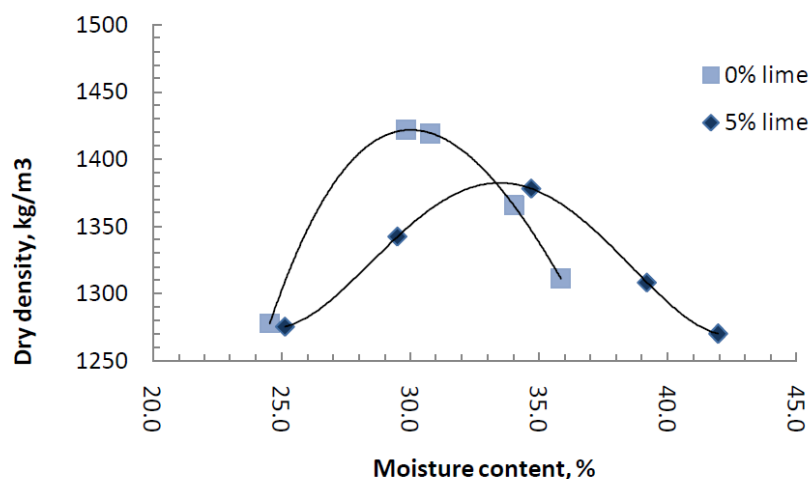
Ко стабилизације цементом потребно је збијање извршити што прије јер цемент брзо реагује са водом у тлу. Насупрот цементу, за креч је повољн нешто дужи период како би дошло до његове дифузије кроз тло и постизања максималног ефекта смањења пластичности.

тип модификације/стабилизације	максимално вријеме прије почетка збијања
модификација кречом	24-48
стабилизација кречом	6-8
цемент	0,5
прашина из пећи за производњу цемента	1
Летећи пепео класе С	1
Летећи пепео класе F са кречом	2
Летећи пепео класе F са цементом	1
Асфалтне емулзије	завршити компакцију прије него што емулзија постане нестабилна



Слика 3.11: Утицај процента додатог креча на смањење пластичности и повећање чврстоће

Утицај додатог креча на збијање тла је приказан на доњој слици кроз зависност запреминске масе од влажности каолина са 0% и 5% креча. Додавањем креча повећава се оптимална влажност и смањује максимална запреминска тежина у сувом стању.



Слика 3.12: Утицај креча на збијање тла

Присуство сулфата. Присуство растворљивих сулфатних соли може бити проблематично код свих додатака на бази калцијума због реакције сулфата са калцијумом и алуминијумом из глине. Са водом они формирају минерал еtringит који је високо експанзиван. Формирање овог минерала након збијања може довести до значајног издизања коловоза и губитка чврстоће. Сулфати у тлу потичу од гипса који се природно налази али и од загађења тла индустријским сулфатима.

Концентрација сулфата испод 3000 ppm (0.3%) није проблематична. Тло са концентрацијом сулфата од 3000 до 5000 ppm може бити стабилизовано уз пажљиво извођење и обезбеђење довољне количине воде. Преко 5000 ppm тако што се креч примјењује 2 пута – након првог мијешања и после периода сазријевања. Једном формиран еtringит је стабилан и не би требало да изазива проблеме.

Органска материја У многим случајевима слојеви тла при површини терена садрже велику количину органских материја. Ове материје реагују са $\text{Ca}(\text{OH})_2$ што као резултат има смањење рН што може успорити процес хидратације. Тла са садржаком органских твари о 1-2% могу бити тешка за стабилизацију или је она неекономична.

3.4. Стабилизација примјеном цемента

Портланд цемент се састоји од калцијум-силиката и калцијум-алумината који хидратацијом прелазе у цементни камен. Хидратација цемента је релативно брза па је уобичајено да се компакција врши што прије максимално, максимално 2 сата након мијешања.

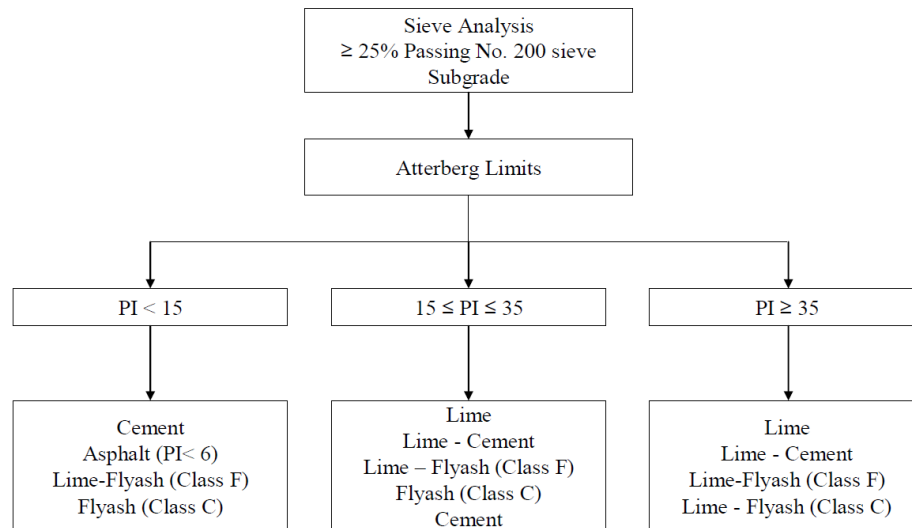
Стабилизација цемента је идеална за добро градуиране агрегате са довољним садржајем ситних фракција које могу поунити простор између крупнијих честица. Генерално индекс пластичности би требао да је мањи од 30% за пјесковите материјале. За ситнозрне материјале индекс пластичности мањи од 20% и граница течења мања од 40% да би се обезбиједило правилно мијешање материјала. Горња граница индекса пластичности:

$$PI \leq 20 + \frac{50 - (\% < 0.075\text{mm})}{4}$$

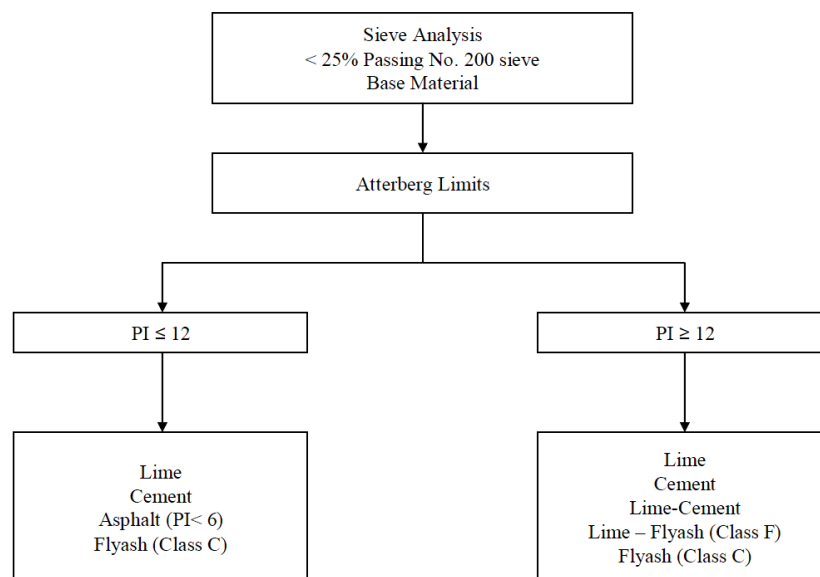
Цемент је одговарајући за стабилизацију шљунковитог тла са не више од 45% материјала задржаног на сити #4. Према препоруци Federal Highway Administration цемент се препоручује за материјале са мање од 35% честица прошлих кроз сито #200 и индексом пластичности мањим од 20%. На основу овога тла класификована према AASHTO као A-2 и A-3 су идеална за стабилизацију цементом иако одређени цемента могу бити успјешно примијењени за стабилизацију тла од A-4 до A-7 (AASHTO класификација – 35% мање од 0,075мм сматра се да је тло глина или прашина, <35% је мање од 0.075мм онда се ради о шљунку/пијеску.)

Проблем: пукотине усљед скупљања – широке и блиске пукотине изазивају слаб пренос оптерећења и неприхватљив квалитет возње.

За потребе стабилизације тло се може подијелити на: постељицу (*subgrade*) и горњу подлогу (*base*) на основу пролаза кроз сито #200 (0.074mm). Ако више од 25% пролази кроз ово сито онда тло сматрамо постељицом у супротном ради се о материјалу за горњу подлогу пута.



Слика 3.13: Одабир адитива за тло постељице



Слика 3.14: Одабир адитива за тло горње подлоге (*base*)

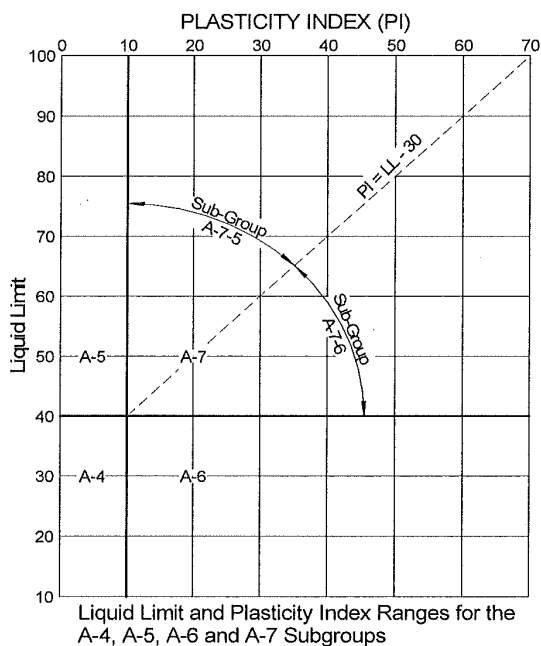
AASHTO SOIL CLASSIFICATION SYSTEM
 AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS

Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures

General Classification	Granular Materials (35% or less passing No. 200 sieve)							Silt-Clay Materials (More than 35% passing No. 200 sieve)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Sieve Analysis, Percent passing:											
No. 10 (2.00 mm)	50 max.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
No. 40 (0.425 mm)	30 max.	50 max.	51 min.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
No. 200 (0.075 mm)	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Characteristics of Fraction Passing No. 40 (0.425 mm)											
Liquid limit .....	.....	.....	.....	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	6 max.	.....	N.P.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual Types of Significant Constituent Materials	Stone Fragments, Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
General Ratings as Subgrade	Excellent to Good							Fair to Poor			

The placing of A-3 before A-2 is necessary in the "left to right elimination process" and does not indicate superiority of A-3 over A-2.

Plasticity index of A-7-5 subgroup is equal to or less than LL minus 30. Plasticity index of A-7-6 subgroup is greater than LL minus 30.

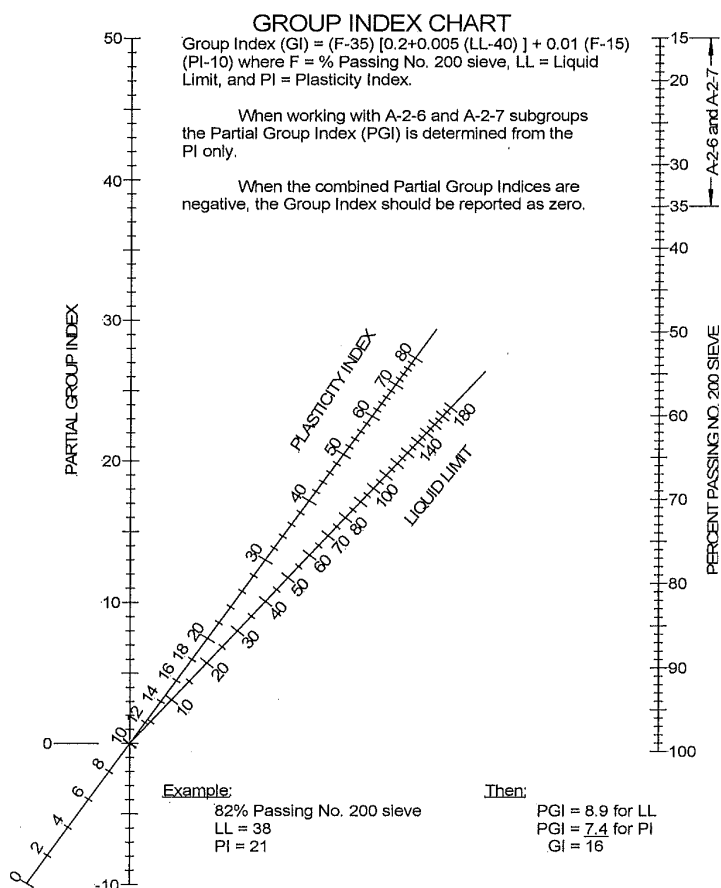


Definitions of Gravel, Sand and Silt-Clay

The terms "gravel", "coarse sand", "fine sand" and "silt-clay", as determinable from the minimum test data required in this classification arrangement and as used in subsequent word descriptions are defined as follows:

- GRAVEL - Material passing sieve with 3-in. square openings and retained on the No. 10 sieve.
- COARSE SAND - Material passing the No. 10 sieve and retained on the No. 40 sieve.
- FINE SAND - Material passing the No. 40 sieve and retained on the No. 200 sieve.
- COMBINED SILT AND CLAY - Material passing the No. 200 sieve
- BOULDERS (retained on 3-in. sieve) should be excluded from the portion of the sample to which the classification is applied, but the percentage of such material, if any, in the sample should be recorded.

The term "silty" is applied to fine material having plasticity index of 10 or less and the term "clayey" is applied to fine material having plasticity index of 11 or greater.



Слика 3.15: AASHTO класификација