

Teoria i praktyka budowy nasypów z gruntu spoistego o zróżnicowanej plastyczności

*Janusz Hauryłkiewicz
Politechnika Koszalińska*

*Recenzent: Jerzy Przysański
Politechnika Poznańska*

1. Wstęp

Wykonywanie nasypów z gruntów spoistych o małym stopniu plastyczności wymaga dostarczenia znacznie większej pracy w celu zagęszczenia gruntu, niż w przypadku gruntów niespoistych. Na przykład, zagęszczenie wałowniem wymaga do 10-krotnego przejazdu wału po jednej warstwie 20÷40 cm grubości (por. [8]). Znaczna część pracy zużywana jest na rozdrabnianie brył gruntu twardego (w celu zlikwidowania kawern między bryłami) i na ponowne nadawanie gruntowi rozdrobnionemu dużego zagęszczenia przy zmienionym kształcie (płaskiej warstwy).

W niniejszej pracy przedkłada się propozycję wykonywania nasypu z gruntów spoistych dostarczanych w dwóch porcjach: porcji gruntu twardego, o małej plastyczności i porcji gruntu miękkiego o dużej plastyczności (rys. 1), co pozwala na znaczące obniżenie energii zagęszczania nasypu, czasu wznoszenia i kosztu budowy. Grunt miękki wypełnia bowiem łatwo kawerny między bryłami gruntu twardego; unika się przez to zużycia energii na rozdrabnianie i ponowne zagęszczanie brył oraz skraca czas wykonywania nasypu, umożliwiając dostateczne jego zagęszczenie na przykład już po jednym przejeździe wału. Z biegiem czasu następuje wyrównanie wilgotności i plastyczności składników.

W pracy przedstawiono teoretyczną analizę zagadnień wyznaczania stopnia plastyczności mieszanki, proporcji składników, sposobów ich wbudowywania, prognozy stateczności i odkształcalności nasypu oraz oszacowania oszczędności energetycznych (rozdziały 2÷8) a także zreferowano rezultaty doświadczalnej weryfikacji niektórych wyników teoretycznych (rozdział 9). Wykorzystano przy tym fragmenty wcześniejszych prac autora na ten temat [1÷6] oraz niepublikowane wyniki pięciu prac dyplomowych [7].

Proponowana technologia może okazać się szczególnie przydatna, gdy świeżo wykonany nasyp nie będzie poddany znacznym obciążeniom po-

wierzchniowym na koronie, więc m.in. przy obwałowaniach takich obiektów, jak poldery, stawy, osadniki, odstożniki, wylewiska i wysypiska odpadów, a także nasypy drogowe, jeśli ich nawierzchnię kłaść się będzie z dostateczną zwłoką po zakończeniu budowy nasypu.

2. Wyrównany stopień plastyczności nasypu

2.1. Założenia

Stopień plastyczności gruntu spoistego określony jest znanym wzorem (zob. [8]):

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} = \frac{w - w_P}{I_P}, \quad (1)$$

gdzie:

w - wilgotność naturalna gruntu,

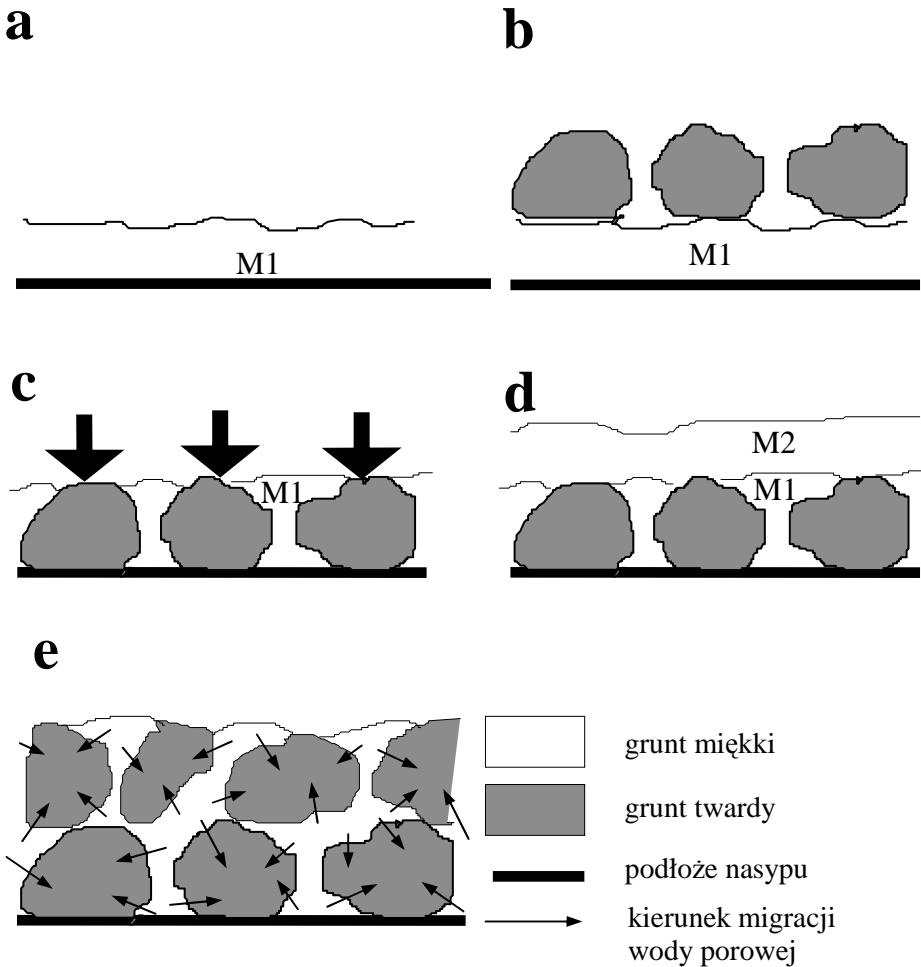
w_P - granica plastyczności,

w_L - granica płynności,

I_P - wskaźnik plastyczności.

Wyznaczenie stopnia plastyczności mieszanki różnych rodzajów gruntów spoistych wymaga na ogół doświadczalnego zbadania zależności granic konsystencji mieszanki od granic konsystencji składników, gdyż składniki mieszanki mogą wchodzić w reakcje chemiczne zmieniające ich właściwości fizyczne. Dlatego do potrzeb niniejszej analizy teoretycznej zakłada się, że używać się będzie gruntów spoistych w dwóch porcjach, reakcja chemiczna pomiędzy którymi może powodować jedynie zmiany sumarycznej ilości wody porowej składników: w jednej porcji grunt jest twardszy (stopień plastyczności I_{Lt} , mniejszy), w drugiej bardziej miękki (stopień plastyczności I_{Lm} , większy).

O tych porcjach gruntu zakłada się, że znane są masy składników, twardego - m_t i miękkiego - m_m lub ich objętości V_t i V_m a także znane są ich stopnie plastyczności I_{Lt} i I_{Lm} oraz granice konsystencji w_{Pt} , w_{Pm} , w_{Lt} i w_{Lm} . Założono, że masa wody w mieszance jest sumą mas wody m_{wt} i m_{wm} w składnikach i dodatkowej masy wody m_{wd} (dodatkowej, na przykład w wypadku zwilżania nasypu lub kondensacji pary wodnej w gruncie, lub ujemnej, na przykład w wypadku wysychania nasypu, lub o dowolnym znaku, jeśli jest skutkiem określonej reakcji chemicznej), przy czym ta ewentualna dodatkowa masa wody zmienia wilgotność gruntu, ale nie zmienia granic konsystencji gruntów składowych. Założono też, że bilansują się masy szkieletu gruntowego składników i mieszanki.



Rys. 1. Układanie warstw nasypu technologią HS

a - ułożenie pierwszej od dołu warstwy gruntu miękkiego (M1) na podłożu nasypu, b - rozrzucenie brył gruntu twardego po powierzchni warstwy gruntu miękkiego, c - wtłoczenie brył gruntu twardego w pierwszą warstwę podkładową z gruntu miękkiego, d - ułożenie drugiej warstwy gruntu miękkiego (M2), e - schemat migracji wody porowej na pewnym etapie budowy nasypu

Fig. 1. Embankment constructing order using HS technology

Przy tych założeniach, można otrzymać wzór określający stopień plastyczności mieszanki. Wykorzystać należy w tym celu znane w geotechnice, w szczególności w gruntoznawstwie, związki między fizycznymi właściwo-

ściami gruntu (gęstością szkieletu gruntowego ρ_s , gęstością objętościową gruntu ρ , gęstością objętościową szkieletu gruntowego ρ_d , gęstością wody ρ_w , wilgotnością w) a masami i objętościami składników gruntu odpowiadającymi określonej objętości szkieletu gruntowego V_s :

$$\text{- masa szkieletu gruntowego} \quad m_s = \rho_s V_s \quad (2)$$

$$\text{- masa wody} \quad m_w = w \rho_s V_s \quad (3)$$

$$\text{- masa gruntu} \quad m = (1+w) \rho_s V_s \quad (4)$$

$$\text{- objętość gruntu} \quad V = (1+w) \rho_s V_s / \rho = \rho_s V_s / \rho_d \quad (5)$$

$$\text{- objętość porów} \quad V_p = (\rho_s / \rho_d - 1) V_s \quad (6)$$

$$\text{- objętość wody} \quad V_w = w \rho_s V_s / \rho_w \quad (7)$$

Podane wyżej oznaczenia właściwości gruntu oraz mas i objętości składników zaopatrzone są dodatkowo indeksami dolnymi: t - dla gruntu twardego, m - dla gruntu miękkiego.

Wyznaczenie wyrównanego stopnia plastyczności mieszanki poprzedza się wyznaczeniem granic konsystencji mieszanki i wyznaczeniem wilgotności mieszanki.

2.2. Granice konsystencji mieszanki

Niech najpierw oba składniki mieszanki będą na granicy plastyczności, mając wilgotności w_{Pt} i w_{Pm} odpowiednio i niech w reakcji nie zmienia się suma wody składników. Wtedy masy wody w składnikach:

$$m_{wt} = m_{st} w_{Pt}, \quad m_{wm} = w_{Pm} m_{sm} \quad (8)$$

masa wody w mieszance:

$$m_w = m_{st} w_{Pt} + m_{sm} w_{Pm} \quad (9)$$

i wilgotność mieszanki, będąca równocześnie jej granicą plastyczności:

$$w_p = \frac{m_{st} w_{Pt} + m_{sm} w_{Pm}}{m_{st} + m_{sm}} \quad (10)$$

Powyższe stwierdzenie, że wilgotność mieszanki jest jej granicą plastyczności ma następujące uzasadnienie: wałeczki ze składników mieszanki przy właściwych sobie granicach plastyczności pękają przy średnicy 3 mm, mieszanie nie powoduje zmiany masy wody w mieszance, zatem i wałeczki mieszanki będą pękać przy średnicy 3 mm, a to oznacza, że mieszanka jest na granicy plastyczności. Tok rozumowania w przypadku granicy płynności jest analogiczny.

Tak więc granica konsystencji mieszanki jest średnią ważoną granic konsystencji składników, a wagami są odpowiadające tym składnikom masy szkieletu gruntowego. Przechodząc do wyznaczenia wilgotności mieszanki dopuści się możliwość wprowadzenia do bilansu wody w mieszance dodatkowej masy wody m_{wd} , o której zapowiedziano powyżej, w p.2.1.

2.3. Wilgotność mieszanki

Ze wzoru (1) wynikają wyrażenia określające wilgotności wprowadzanych do mieszanki gruntów (twardego i miękkiego):

$$w_t = I_{Lt} (w_{Lt} - w_{Pt}) + w_{Pr}, \quad w_m = I_{Lm} (w_{Lm} - w_{Pm}) + w_{Pm}. \quad (11)$$

Ze wzoru (4) wynikają objętości szkieletu gruntowego:

$$V_{st} = \frac{m_t}{(1 + w_t) \rho_{st}}, \quad V_{sm} = \frac{m_m}{(1 + w_m) \rho_{sm}}, \quad (12)$$

ze wzorów (2) i (12) - masy szkieletu gruntowego:

$$m_{st} = \frac{m_t}{1 + w_t}, \quad m_{sm} = \frac{m_m}{1 + w_m}, \quad (13)$$

ze wzorów (2), (3) i (10) - masy wody wprowadzanej wraz ze składnikami mieszanki:

$$m_{wt} = \frac{m_t}{1 + w_t} w_t, \quad m_{wm} = \frac{m_m}{1 + w_m} w_m. \quad (14)$$

Końcowa wilgotność mieszanki w równa jest ilorazowi: suma mas wody ze wzoru (14) zwiększona o masę dodatkową m_{wd} podzielona przez sumę mas szkieletu gruntowego ze wzoru (13). W tym miejscu dogodniejsze jest jednak posłużenie się w tej definicji wyrażeniami (2), (3), z których wynika

$$w = \frac{m_{st} w_t + m_{sm} w_m + m_{wd}}{m_{st} + m_{sm}}, \quad (15)$$

skąd po wykorzystaniu związków (11) oraz po przekształceniach algebraicznych (zmierzających do zgrupowania w liczniku wzoru (15) w jednym członie wyrażen związanych z I_{Lt} i w drugim członie wyrażen związanych z I_{Lm}) z wy-

korzystaniem zależności (10), otrzymuje się wyrażenie określające wyrównaną wilgotność mieszanki:

$$w = w_P + \frac{m_{st} I_{Pt} I_{Lt} + m_{sm} I_{Pm} I_{Lm}}{m_{st} + m_{sm}} + \frac{m_{wd}}{m_{st} + m_{sm}}. \quad (16)$$

2.4. Stopień plastyczności

Po podstawieniu wielkości w wg wzoru (16) do wzoru (1) i po wykonaniu przekształceń algebraicznych z wykorzystaniem wzoru (10) na granicę plastyczności i analogicznego wyrażenia na granicę płynności otrzymuje się następujący wzór określający stopień plastyczności mieszanki:

$$I_L = \frac{m_{st} I_{Pt} I_{Lt} + m_{sm} I_{Pm} I_{Lm}}{m_{st} I_{Pt} + m_{sm} I_{Pm}} + \frac{m_{wd}}{m_{st} I_{Pt} + m_{sm} I_{Pm}}. \quad (17)$$

Pierwszy składnik powyższej sumy przedstawia wyrównany stopień plastyczności mieszanki w wypadku gdy $m_{wd} = 0$, tj. gdy bilans mas wody w mieszance i w jej składnikach zeruje się. Stopień plastyczności mieszanki jest wtedy średnią ważoną stopni plastyczności składników, przy czym wagami są iloczyny mas szkieletu gruntowego i wskaźników plastyczności odpowiednich składników. W szczególnym wypadku gdy wskaźniki plastyczności składników są sobie równe, tj. gdy:

$$I_{Pt} = I_{Pm} = I_P, \quad (18)$$

wtedy

$$I_L = \frac{m_{st} I_{Lt} + m_{sm} I_{Lm}}{m_{st} + m_{sm}} + \frac{m_{wd}}{m_s A f_i}, \quad (19)$$

gdzie:

m_s - masa szkieletu gruntowego w mieszance,

A - aktywność koloidalna gruntu mieszanki,

f_i - zawartość frakcji ilowej w mieszance.

Wzór (19) w wypadku $m_{wd} = 0$ określa stopień plastyczności mieszanki jako średnią ważoną stopni plastyczności składników, gdzie wagami są masy szkieletu gruntowego m_{st} i m_{sm} .

Ponieważ gęstość objętościowa szkieletu gruntowego

$$\rho_d = m_s / V, \quad (20)$$

więc stopień plastyczności mieszanki można też wyrazić w funkcji objętości składników:

$$I_L = \frac{I_{Lt} \rho_{dt} V_t + I_{Lm} \rho_{dm} V_m}{\rho_{dt} V_t + \rho_{dm} V_m} + \frac{m_{wd}}{m_s A f_i}, \quad (21)$$

gdzie:

ρ_{dt} i ρ_{dm} - gęstości objętościowe szkieletu gruntu twardego i miękkiego odpowiednio.

3. Proporcje objętościowe składników

Proporcję objętościową wyznaczono z warunku wypełnienia gruntem miękkim kawern międzybryłowych w gruncie twardym rozgarniętym na nasypie. Objętość kawern w gruncie twardym zależy od sposobu pobierania gruntu ze złoża, od sposobu transportu, od sposobu rozgarniania gruntu po nasypie. Należy ją wyznaczać w następującym, nieskomplikowanym doświadczeniu z wykorzystaniem technologii, która będzie zastosowana na budowie nasypu.

Należy wyznaczyć gęstość objętościową ρ_t gruntu twardego w złożu, następnie należy ze złoża pobrać grunt twardy (na przykład łyżką koparki) i wyznaczyć jego masę m_t . Objętość pobraną tego gruntu należy wyznaczyć ze wzoru:

$$V_t = m_t / \rho_t \quad (22)$$

Grunt ten należy rozgarnąć po nasypie w sposób przyjęty za standardowy i wyznaczyć jego objętość V_r (razem z kawernami). Objętość kawern i równa jej z założenia objętość gruntu miękkiego:

$$V_m = V_r - V_t. \quad (23)$$

Stosunek objętościowy wypełnienia miękkiego do sumarycznej objętości (bez kawern) twardych brył:

$$\mu = V_m / V_t = (V_r / V_t) - 1 = s - 1, \quad (24)$$

gdzie:

s - współczynnik spulchnienia gruntu twardego wskutek wydobywania go ze złoża i rozgarnięcia po powierzchni nasypu w sposób przyjęty na danej budowie za standardowy.

Ze wzoru (21) dzieląc licznik i mianownik przez iloczyn $\rho_{dt}V_t$ i wykorzystując parametr μ ze wzoru (24) otrzymuje się:

$$I_L = \frac{I_{Lt} + I_{Lm}r\mu}{1 + r\mu} + \frac{m_{wd}}{m_s A f_i}, \quad (25)$$

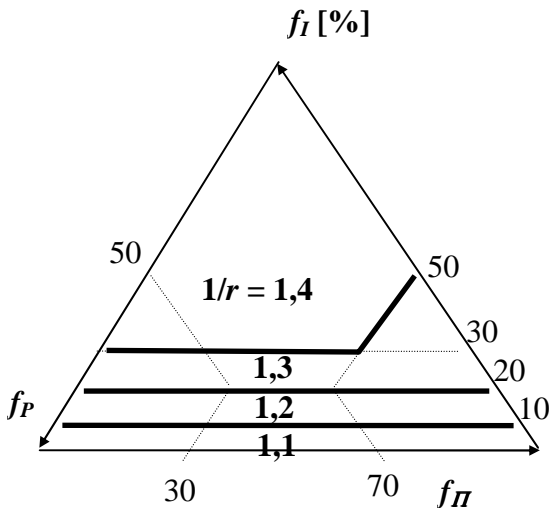
gdzie

$$r = \rho_{dm} / \rho_{dt} \quad (26)$$

Ze wzoru (25) przy założeniu $m_{wd} = 0$ otrzymuje się poszukiwaną proporcję objętościową gruntu miękkiego do gruntu twardego:

$$\mu = \frac{1}{r} \cdot \frac{I_L - I_{Lt}}{I_{Lm} - I_L}. \quad (27)$$

Parametr r zależy od rodzaju gruntu, jego składu petrograficznego, zwłaszcza zawartości minerałów chłonących wodę (na przykład, montmorylonit) i od jego stanu. Przeciętne wartości ilorazu $1/r$ dla warunków polskich obliczone na podstawie tab. 2 w PN-81/B-03020 (przy założeniu stanu twaroplastycznego dla gruntów twardych i stanu miękoplastycznego dla gruntu miękkiego) podano na rys. 2 nawiązującym do trójkąta podziału gruntów spoistych wg PN-86/B-02480. Jak z rys. 2 wynika, wartości $1/r$ zmieniają się w dość wąskim zakresie ze średnią 1,25.



Rys. 2. Przeciętne wartości $1/r$ dla gruntów polskich
Fig. 2. Average values of $1/r$ for soils of Poland

4. Sposoby wbudowywania składników w nasyp

Realizacja proponowanej technologii może być osiągnięta różnymi sposobami, dostosowanymi do rodzajów używanych gruntów spoistych, na przykład przez:

- wtlaczanie brył gruntu twardego (o małej plastyczności) w podkładową warstwę gruntu miękkiego (o dużej plastyczności),
- mieszanie brył gruntu twardego z lepiszczem w postaci gruntu miękkiego,
- iniekcję płynnej masy gruntu miękkiego w kawerny między bryłami gruntu twardego,
- ciśnieniowe lub bezciśnieniowe obrzucanie brył gruntu twardego masą z gruntu miękkiego.

W pierwszym z wymienionych sposobów, tj. przez wtlaczanie, każdą z warstw nasypu można formować albo najpierw rozgarniając bryły gruntu twardego a potem nakładając grunt miękki albo najpierw nakładając na podłoże porcję gruntu miękkiego, a potem rozgarniając na nim bryły gruntu twardego. Wariant drugi (rys. 1) jest lepszy z dwóch powodów:

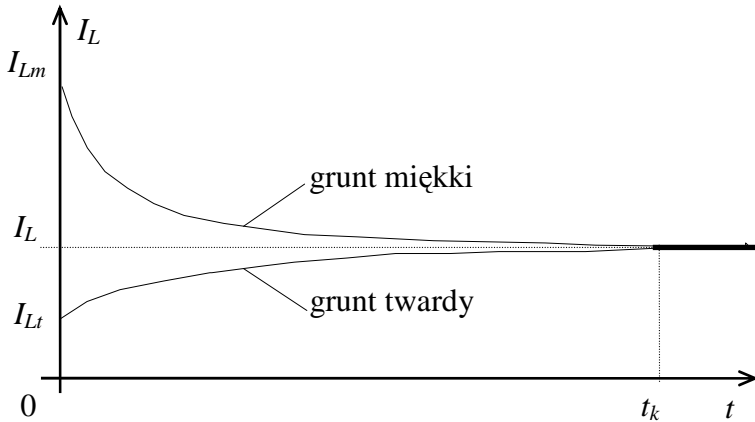
- zapobiega zamknięciu pęcherzy powietrznych między bryłami gruntu twardego,
- zmniejsza przyczepność gruntu do narzędzia zagęszczającego.

Niezależnie od sposobu wznoszenia nasypu przez nakładanie na przemian porcji gruntu twardego i gruntu miękkiego nasyp po zagęszczeniu nie wykazuje tekstury warstwowej.

5. Prognoza stateczności nasypu

Stopnie plastyczności gruntów składowych (I_{Lr} gruntu twardego oraz I_{Lm} gruntu miękkiego) po wbudowaniu tych gruntów w nasyp zmieniają się z biegiem czasu, wskutek oddawania wody porowej przez grunt miękki gruntowi twardemu, zmierzając do ustabilizowanej wartości I_L , jak to ilustruje rys. 3.

W czasie krótszym niż t_k w nasypie nie ma gruntu o stopniu plastyczności I_L , lecz są dwa składniki o stopniach plastyczności dążących do tej wartości jako wyrównanej. Podobny, jak na rys. 3 charakter zmienności w czasie wykazują parametry wytrzymałościowe obu składników nasypu - kąt tarcia wewnętrznego i spójność. Aczkolwiek stopniowi wyrównanemu I_L odpowiadają końcowe ustalone (po wyrównaniu) wartości parametrów wytrzymałościowych, to jednak przed upływem czasu t_k w nasypie utrzymuje się segregacja materiału: w masie gruntu miękkiego o niskich parametrach wytrzymałościowych spoczywają stykające się ze sobą bryły gruntu twardego o parametrach wysokich. Segregacja ta nie wyznacza wszakże żadnej regularnej tekstury nasypu, na przykład warstwowej.



Rys. 3. Przebieg zmienności stopnia plastyczności składników nasypu w czasie
Fig. 3. Time - plasticity index relationship for two embankment components

Dlatego do oceny stateczności nasypu nie mogą być przyjęte parametry wytrzymałościowe średnie z gruntu twardego i z gruntu miękkiego (ani też średnie ważone). Utrata stateczności nasypu zbudowanego z brył twardego gruntu rozmieszczonych losowo w masie gruntu miękkiego następuje wskutek poślizgu po powierzchni przebiegającej tylko przez grunt miękki (lub wskutek deformacji ciągłej praktycznie tylko gruntu miękkiego). Z tego powodu, jeśli wymiary brył gruntu twardego są znacznie niższego rzędu (na przykład poniżej 10%) niż wysokość nasypu, do obliczeń stateczności nasypu należy przyjmować parametry wytrzymałościowe jedynie gruntu miękkiego.

Zmienność tych parametrów (ogólnie oznaczonych tu przez p) w czasie wyrażona jest krzywą na rys. 4. Parametry tej krzywej należy wyznaczać w razie potrzeby doświadczalnie. Proponuje się dane doświadczalne aproksymować funkcją wykładniczą:

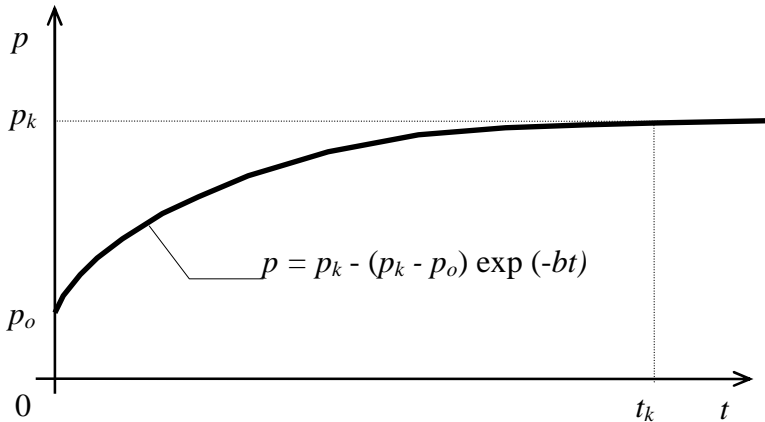
$$p = p_k - (p_k - p_o) \exp(-bt), \quad (28)$$

gdzie:

p_o i p_k - wartości parametru wytrzymałościowego (kąta tarcia wewnętrznego lub spójności) odpowiednio gruntu miękkiego i gruntu z plastycznością wyrównaną do stopnia

I_L , b - parametr tempa wzrostu wytrzymałości, zależny m. in. od rodzaju i składu petrograficznego gruntu spoistego, jego stanów początkowych (w bryłach twardych i w masie miękkiej), proporcji składników, wielkości brył, gdyż głównie wymienione czynniki decydują o tempie wyrównywania potencjałów wilgotnościowych obu składników nasypu; większej

wartości parametru b odpowiada szybsze tempo zbliżania się do wartości asymptotycznej. Konkurencyjną w stosunku do funkcji (28) pod względem siły korelacji może okazać się funkcja logistyczna, ale tej kwestii tutaj się nie analizuje.



Rys. 4. Zmienność w czasie parametrów wytrzymałościowych gruntu miękkiego
Fig. 4. Time - strength parameters relationship for soft soil

Konsekwentnie z powyższymi stwierdzeniami końcowy przekrój poprzeczny nasypu należy wyznaczyć na podstawie końcowych (wyrównanych) parametrów wytrzymałościowych p_k , ale aktualną wysokość nasypu podczas jego wznoszenia i aktualne nachylenie skarpy należy dostosowywać do aktualnych wg rys. 4 parametrów wytrzymałościowych.

6. Prognoza odkształcenia nasypu

Końcowe odkształcenia nasypu od kształtu uzyskanego bezpośrednio po zakończeniu budowy wynikają głównie ze zmian objętości gruntu wbudowanego wskutek wyrównywania potencjałów wilgotnościowych obu składników: bryły gruntu twardego spęczniają a masa gruntu miękkiego skurczy się.

W przybliżeniu można przyjąć, że w stadium końcowym grunt nasypu będzie wilgotnościowo jednorodny z wilgotnością końcową w według wzoru (16) odpowiadającą wyrównanemu stopniowi plastyczności I_L według wzoru (17).

Gdyby oba składniki nasypu były w pełni nasycone wodą, wtedy migracja wody między składnikami nie powodowałaby zmiany objętości mieszanki. Zazwyczaj jednak grunty twarde mają pory tylko w części zajęte przez wodę (higroskopową i błonkową) i migracja wody z gruntu miękkiego do gruntu twardego może naruszać zerowość bilansu skurczu i pęcznienia. Zmianę objętości mieszanki spowodowaną przez wyrównanie wilgotności składników do wil-

gotności końcowej w oszacowano w niniejszej pracy teoretycznie, zakładając ważność ustalonych w gruntoznawstwie związków (2) - (7) między masami i objętościami składników mieszanki i ich faz (tj. szkieletu gruntowego, wody porowej i powietrza porowego) oraz właściwościami fizycznymi gruntu.

Grunt twardy o gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{dt} mający początkowo (przy wbudowaniu w nasyp) objętość V_t , przechodząc w stan końcowy z gęstością objętościową szkieletu gruntowego ρ_{dk} pęcznieje, uzyskując objętość V_{tk} , przy czym zgodnie ze wzorem (5) wartość spęcznienia

$$\frac{V_{tk}}{V_t} = \frac{\rho_s V_{stk}}{\rho_{dk}} \cdot \frac{\rho_s V_{st}}{\rho_{dt}} \quad (29)$$

Ponieważ objętości szkieletu gruntowego w gruncie twardym nie ulegają zmianie przy zmianie wilgotności, tj. $V_{st} = V_{stk}$ więc spęcznienie

$$V_{tk}/V_t = \rho_{dt} / \rho_{dk} \quad (30)$$

$$V_{tk} = V_t \cdot \rho_{dt} / \rho_{dk} = r_t V_t, \quad (31)$$

gdzie

$$r_t = \rho_{dt} / \rho_{dk} \quad (32)$$

jest wskaźnikiem spęcznienia gruntu twardego.

Analogicznie rozumując, otrzymuje się że grunt miękki przechodząc w stan końcowy zmienia gęstość objętościową swego szkieletu gruntowego z ρ_{dm} na ρ_{dk} , doznając skurczu z objętości początkowej V_m do objętości końcowej V_{mk}

$$V_{mk} = V_m \rho_{dm} / \rho_{dk} = r_m V_m, \quad (33)$$

gdzie

$$r_m = \rho_{dm} / \rho_{dk} \quad (34)$$

jest wskaźnikiem skurczu gruntu miękkiego.

Wzory (32) i (34) określają teoretyczne wartości (odpowiednio) spęcznienia jednostki objętości gruntu twardego i skurczu jednostki objętości gruntu miękkiego wskutek międzyskładnikowej migracji wody porowej bez uwzględnienia wpływu dodatkowej masy wody m_{wd} .

Łączna objętość początkowa obu składników:

$$V_o = V_t + V_m \quad (35)$$

oraz łączna ich objętość końcowa:

$$V_k = V_{tk} + V_{mk} = r_t V_t + r_m V_m. \quad (36)$$

Ze wzorów (35) i (36) wynika natychmiast wzór określający relację v między objętością końcową (po wyrównaniu wilgotności) mieszanki V_k a objętością początkową (bezpośrednio po zmieszaniu składników) V_o :

$$v = V_k / V_o = \frac{V_t r_t + V_m r_m}{V_t + V_m} = \frac{r_t + r_m \mu}{1 + \mu} \quad (37)$$

gdzie:

μ wg wzoru (24),

r_t i r_m wg wzorów (32) i (34),

V_m i V_t - objętości początkowe wbudowanych w nasyp składników, odpowiednio: miękkiego i twardego,

ρ_{dm} , ρ_{dt} , ρ_{dk} - gęstości objętościowe szkieletu gruntowego odpowiednio: początkowa w składniku miękkim, początkowa w składniku twardym i końcowa (po wyrównaniu wilgotności) w mieszance. Warto przypomnieć, że gęstości te, w ogólności ρ_d , zależą od gęstości gruntu ρ i jego wilgotności w według wzoru:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}. \quad (38)$$

Wzór (37) wskazuje m.in. na zależność zmiany objętości mieszanki od objętościowej relacji między składnikami miękkim i twardym, wyrażonej parametrem μ według wzoru (24). Łatwo sprawdzić, że zmiana objętości spowodowana migracją wody nie nastąpi ($v = 1$), gdy parametr μ będzie miał wartość μ_{gr} określoną wzorem:

$$\mu_{gr} = \frac{r_t - 1}{1 - r_m}. \quad (39)$$

Relacja faktycznego stosunku μ objętości między składnikiem miękkim i twardym do wartości μ_{gr} wyznacza kierunek zmiany objętości nasypu po wykonaniu:

- gdy $\mu < \mu_{gr}$, wtedy $v > 1$ i występuje pęcznienie nasypu,
- gdy $\mu > \mu_{gr}$, wtedy $v < 1$ i zachodzi skurcz nasypu.

Ponieważ parametry r_t i r_m wyrażają (odpowiednio) pęcznienie i skurcz, więc prawa część wzoru (37) wyraża fakt, że względna zmiana objętości v jest średnią ważoną wskaźników pęcznienia i skurczu, przy czym wagami są początkowe (wbudowywane) objętości gruntów składowych.

Do orientacyjnych obliczeń zmian objętości v oraz wartości μ_{gr} można przyjmować wartości r_t i r_m wg tab. 1, jako przeciętne dla czwartorzędowych gruntów spoistych Polski. Wartości te obliczono według wzorów (32) i (34) na podstawie tab. 2 w PN-81/B-03020 wstawiając ρ_{dt} jak dla gruntu twaroplastycznego, ρ_{dm} jak dla gruntu miękkoplastycznego oraz ρ_{dk} jak dla gruntu plastycznego.

grunt	r_t	r_m
mało spoisty	1,04	0,95
średnio spoisty	1,09	0,90
zwięzły spoisty	1,11	0,88
bardzo spoisty	1,14	0,85

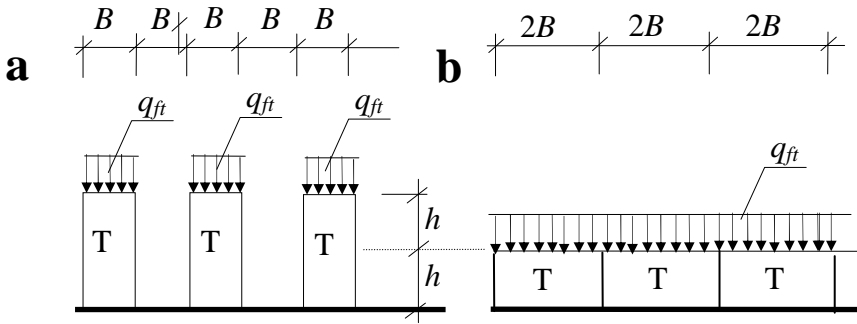
Przedstawiona prognoza obejmuje deformacje powodowane międzyściładnikową migracją wody porowej w nasypie. Na to nakładać się mogą odkształcenia związane z wymianą dodatkowej masy m_{wd} wody między nasypem i otoczeniem (na przykład, zależnie od pogody) oraz odkształcenia związane ze ściśliwością mechaniczną gruntów składowych. Te odkształcenia uwzględniać można tak, jak w przypadku nasypów wykonywanych metodami tradycyjnymi.

7. Redukcja energii formowania nasypu

Oszacowania oszczędności energii potrzebnej do wykonania warstwy nasypu o grubości h dokonano obliczając orientacyjne wartości pracy wkładanej w wykonanie takiej warstwy w dwóch wariantach technologii:

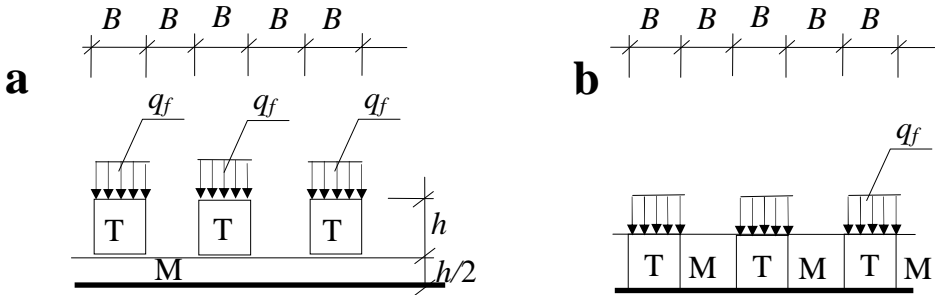
- warstwa wykonana technologią zgniatania gruntu twardego - praca L_n ,
- warstwa wykonana technologią wtfaczania - praca L_m .

W wariantcie pierwszym przyjęto, że warstwa o miąższości h powstaje przez zgniatanie długich beleczek gruntowych (zbudowanych z gruntu twardego) o szerokości B i wysokości $2h$, rozmieszczonych w rozstawie osiowym $2B$ (rys. 5). W rezultacie zgniatania beleczki zmieniają wysokość na h szerokość zaś na $2B$ (pole pionowego przekroju poprzecznego beleczki pozostaje bez zmiany i równe $2Bh$).



Rys. 5. Schemat formowania warstwy przez zgniatanie gruntu twardego (T),
a - stan początkowy, b - stan końcowy

Fig. 5. Diagram of the layer formed by hard soil (T) squashing,
a – initial state, b - final state



Rys. 6. Schemat formowania warstwy przez wtlaczanie brył gruntu twardego (T)
w podłoże z gruntu miękkiego (M);
a - stan początkowy, b - stan końcowy

Fig. 6. Diagram of the layer formed by grouting hard soil lumps (T) into soft soil (M);
a - initial state, b - final state

Potrzebne do takiego zgniatania naprężenie przykładane do górnej powierzchni beleczek (jak w płaskim stanie odkształcenia) można przyjąć za stałe w procesie zmniejszania się wysokości beleczek (jako naprężenie zmieniające stan beleczki ze sprężystego na plastyczny (wg hipotezy Coulomba - Mohra) i równe

$$q_{ft} = 2 c_t \operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \Phi_t), \quad (40)$$

gdzie:

c_t i Φ_t - spójność i kąt tarcia wewnętrznego gruntu twardego. Siła przykładana do zespołu n beleczek w miarę wzrostu powierzchni przekroju poziomego wzrasta liniowo od wartości nBq_{ft} (przy zerowym przemieszczeniu płyty zgniatającej) do wartości $n \cdot 2Bq_{ft}$ (przy przemieszczeniu maksymalnym równym h). Ze względu na tę liniowość pracę tej siły można obliczać posługując się jej wartością średnią.

Wtedy praca wykonana przy tej operacji zgniatania wynosi

$$L_t = 1,5 n B q_{ft} h . \quad (41)$$

W wariancie drugim przyjęto, że warstwa o miąższości h powstaje przez wtlóczenie w podłoże z gruntu miękkiego długich beleczek (wykonanych z gruntu twardego) o szerokości B i wysokości h rozmieszczonych w rozstawie osiowym $2B$ (rys. 6). Miąższość wstępnie rozeslanej warstwy gruntu miękkiego powinna zapewnić wypełnienie przerw między beleczkami, gdy zostaną one wtlócone aż do podłoża warstwy miękkiej. Łatwo sprawdzić, że ze zrównania objętości gruntu miękkiego przed i po wtlóczeniu wynika potrzebna miąższość podścielanej warstwy równa $0,5h$.

Naprężenie wtlaczające q_{fm} przykładane do górnej powierzchni beleczek rośnie od wartości $c_m N_{Cm}$ (przy przemieszczeniu zerowym płyty wtlaczającej i zerowym zagłębieniu z podstaw beleczek poniżej powierzchni gruntu miękkiego) do wartości $c_m N_{Cm} + \gamma_m N_{Dm}$ przy zagłębieniu z , więc wzrost jego jest liniowy ze względu na zagłębienie z i można w obliczeniu pracy posłużyć się wartością średnią tego naprężenia równą

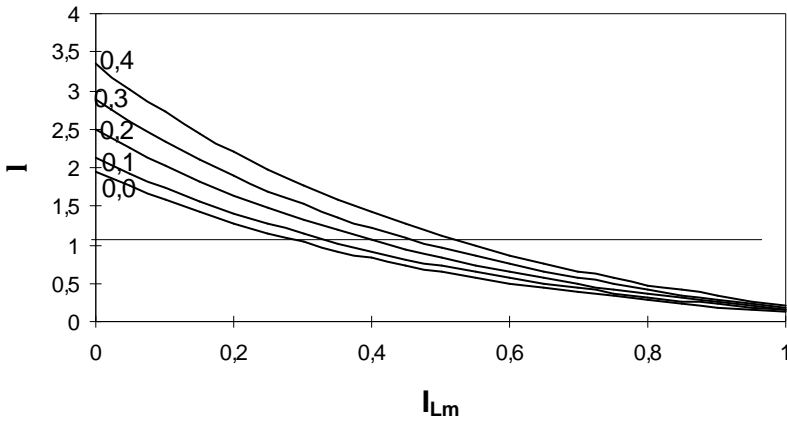
$$q_{fms} = c_m N_{Cm} + 0,5 \cdot \gamma_m h N_{Dm}, \quad (42)$$

gdzie:

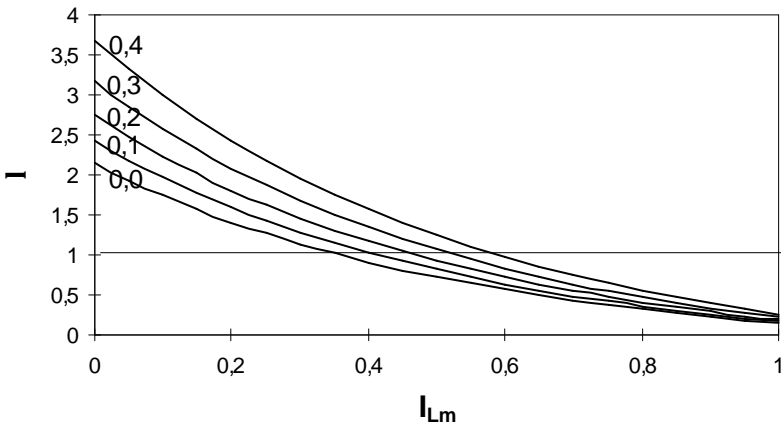
c_m i γ_m - spójność i ciężar objętościowy gruntu miękkiego, N_{Cm} i N_{Dm} - czynniki nośności podłoża wg PN-81/B- 03020. Siła przykładana do zespołu n beleczek wtlaczanych też rośnie, a jej wartość średnia wynosi nBq_{fms} . Przemieszczenie maksymalne płyty wtlaczającej równe jest miąższości warstewki miękkiej, tj. $0,5h$. Stąd praca wykonana według technologii wtlaczania przy uformowaniu warstwy o miąższości h wynosi:

$$L_m = 0,5h n B q_{fms} = 0,5 n B h (c_m N_{Cm} + 0,5 \cdot \gamma_m h N_{Dm}). \quad (43)$$

redukcja energii, $h=0,2$ m, $I_{Lt}=0,0 - 0,4$



redukcja energii, $h=1,0$ m, $I_{Lt}=0,0 - 0,4$



Rys. 7. Redukcja energii formowania nasypu
Fig. 7. Embankment forming energy reduction

Stosunek l prac L_t i L_m określa teoretyczną redukcję energii formowania warstwy związaną z zastąpieniem technologii zgniatania przez technologię włączania. Zgodnie ze wzorami (41) i (43):

$$l = L_m / L_t = \frac{q_{fms}}{3 q_{ft}} = \frac{c_m N_{Cm} + 0,5 \gamma_m h N_{Dm}}{6 c_t \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi_t}{2} \right)}. \quad (44)$$

Redukcja energii zależy od nośności słabego podłoża i od wytrzymałości na ściskanie brył gruntu twardego, a w konsekwencji od parametrów wytrzymałościowych obu składników i od ciężaru objętościowego składnika miękkiego.

W celu oszacowania liczbowej wartości redukcji energii wykonano obliczenia dla dość często spotykanego w Polsce gruntu spoistego w typie genetycznym B według PN-81/B-03020 (grunt morenowy nieskonsolidowany lub inny grunt spoisty skonsolidowany). Wykorzystując podane w przywołanej normie tabelaryczne i graficzne zależności między parametrami gruntu spoistego i jego stopniem plastyczności otrzymano następujące równania regresji:

$$\Phi = 22 - 18,7 I_L$$

$$c = 40 - 33,3 I_L$$

$$\gamma = 22 - 4 I_L$$

Przyjęto także:

$$N_D = e^{\pi \operatorname{tg} \Phi} \operatorname{tg}^2 (45^\circ + 0,5 \Phi)$$

$$N_C = (N_D - 1) \operatorname{ctg} \Phi$$

Wykorzystanie powyższych wyrażeń pozwala na wyrażenie ze wzoru (44) redukcji energii jako funkcji trzech zmiennych: stopnia plastyczności I_{Lm} gruntu miękkiego, stopnia plastyczności I_{Lt} gruntu twardego i miąższości h warstwy gruntu. Wyniki obliczeń redukcji energii l dla dwóch wartości miąższości warstwy h (0,2 m i 1,0 m) pokazano na rys. 7. Oczywiście, oszczędności występują przy $l < 1$. Jak z tych wykresów wynika, miąższość warstwy formowanej nie wpływa na redukcję energii w sposób znaczący a przy dużych stopniach plastyczności gruntu miękkiego technologia HS wymaga energii zagęszczania stanowiącej zaledwie około 20% energii potrzebnej w technologii zginiatania.

8. Przykład

Do budowy nasypu technologią włączania wykorzystuje się glinę piaszczystą typu B wg PN-81/B-03020 w dwóch porcjach: jedna twarda, o $I_{Lt} = 0,1$, druga miękka - o $I_{Lm} = 0,7$. Zamierza się uzyskać następujące parametry wytrzymałościowe nasypu po ustabilizowaniu migracji wody porowej:

- kąt tarcia wewnętrzznego 17° ,
- spójność 30 kPa.

Zakłada się, że masa wody w mieszance będzie równa sumie mas wody porowej w składnikach.

Poszukuje się proporcji składników, stopnia potrzebnego spulchnienia gruntu twardego przy rozgarnianiu po nasypie, oszacowania odkształcenia nasypu wskutek wyrównania wilgotności oraz oszacowania stopnia redukcji energii formowania nasypu w zależności od miąższości formowanej warstwy.

8.1. Proporcja składników

Wartości parametrów wytrzymałościowych odpowiadają stopniowi plastyczności mieszanki $I_L = 0,25$. Według Rys. 2 glinie piaszczystej odpowiada $1/r = 1,2$. Ze wzoru (27):

$$\mu = 1,2 \cdot (0,25 - 0,1) / (0,7 - 0,25) = 0,4.$$

Zgodnie ze wzorem (24) oznacza to, że w mieszance ma być gruntu miękkiego 40% w stosunku objętościowym do gruntu twardego, lub inaczej, że w mieszance ma być początkowo 29% gruntu miękkiego o stopniu plastyczności 0,7 i 71% gruntu twardego o stopniu plastyczności 0,1.

8.2. Stopień spulchnienia

Zgodnie ze wzorem (17) grunt twardy należy rozgarnąć do stopnia spulchnienia $s = \mu + 1 = 1,4$.

8.3. Odkształcenie nasypu

Orientacyjnie można przewidywać zmianę objętości powodowaną wymianą wody porowej wg wzoru (37):

$$v = (1,09 + 0,9 \cdot 0,4) / (1 + 0,4) = 1,04.$$

Oznacza to, że objętość nasypu wzrośnie o 4% objętości początkowej w rezultacie przewagi pęcznienia gruntu twardego nad skurczem gruntu miękkiego. Zmiany objętościowe nie zaszłyby, gdyby μ miało wartość wg wzoru (39):

$$\mu_{gr} = (1,09 - 1) / (1 - 0,90) = 0,90,$$

tn. gdyby gruntu miękkiego wbudowano w ilości objętościowej 90% gruntu twardego. Oczywiście taka zmiana proporcji objętościowej składników nieko-

rzystnie zmieni parametry wytrzymałościowe mieszanki i przy danym tempie budowy obniży bezpieczeństwo budowli ziemnej.

8.4. Redukcja energii

Parametry gruntów potrzebne do skorzystania ze wzorów (40) - (44) są następujące:

- dla gruntu twardego wg PN-81/B-03020: $\Phi_t = 20^\circ$, $c_t = 36$ kPa,
- dla gruntu miękkiego zmienione niekorzystnie wskutek rozdrabniania:

$$\Phi_m = 6^\circ, c_m = 5 \text{ kPa}, \gamma_m = 20 \text{ kN/m}^3, N_{Cm} = 6,81, N_{Dm} = 1,72$$

Ze wzorów (40) i (42):

$$q_{ft} = 2 \cdot 36 \cdot \text{tg}(45^\circ + 0,5 \cdot 20^\circ) = 102,8, \text{ kPa},$$

$$q_{fm_s} = 5 \cdot 6,81 + 0,5 \cdot 20 \cdot 1,72 \cdot h = 34,05 + 17,2 \cdot h, \text{ kPa}.$$

Ze wzoru (44):

$$l = (34,05 + 17,2 h) / (3 \cdot 102,8) = 0,11 + 0,056 h.$$

Zależność stopnia redukcji energii l od miąższości h formowanej warstwy jest liniowo rosnąca. Wynika z niej, że dla miąższości h zawierających się w przedziale 0÷2 m redukcja energii wzrasta od 11% do 22%, tj. zastępując technologię zgmatania technologią włączania uzyskuje się oszczędność energii od 89% przy b. cienkiej warstwie do 78% przy warstwie o dwumetrowej grubości.

9. Weryfikacja doświadczalna wyników teoretycznych

Obecnie zakończono pierwszą serię badań laboratoryjnych weryfikujących i precyzujących przewidywania teorii. Badania te dotyczyły dwóch zagadnień:

- redukcji energii formowania nasypu w porównaniu z technologią konwencjonalną,
- tempa wyrównywania wilgotności i plastyczności między twardym i miękkim składnikiem mieszanki gruntu spoistego tego samego rodzaju.

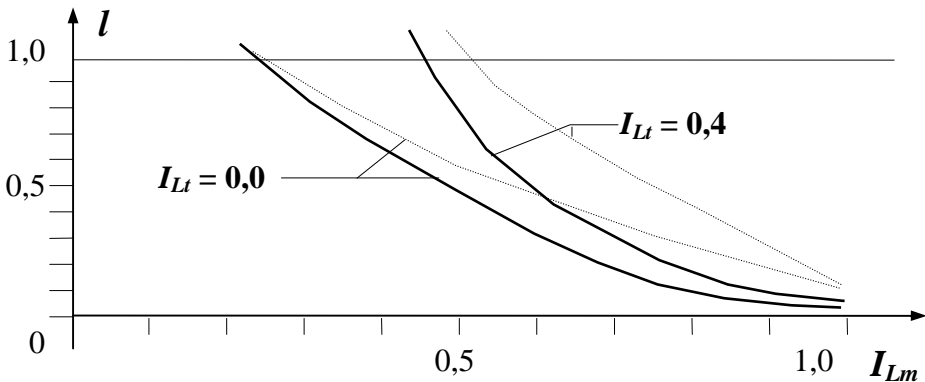
9.1. Redukcja energii

Badaniom poddano morenową brązową glinę zwięzłą piaszczystą z ostatniego zlodowacenia z rejonu koszalińskiego. Z gliny tej przygotowywano próbki o różnej wilgotności i plastyczności od stanu półzwarłego do płynnego, ale ze względu na potrzebę uzyskania wyników w bardzo krótkim czasie stan

gruntu określano makroskopowo za pomocą liczby wałeczkowań zgodnie z PN-86/B-04481.

W celu określenia pracy potrzebnej do uformowania warstwy gruntu o miąższości h w technologii konwencjonalnej, tj. przez zgniatanie gruntu twardego za pomocą maszyny zagęszczającej, formowano w laboratorium beleczki o szerokości 1 cm i wysokości $2h$ z gruntu w stanie półzwartym, twaroplastycznym i plastycznym i poddawano je szybkiemu zgniataniu (z prędkością ok. 1 mm/s) do momentu osiągnięcia przez nie połowy pierwotnej wysokości. Pracę zgniatania L_g obliczano jako iloczyn średniej wartości P_g siły zgniatającej i drogi h tłoka zgniatającego.

W celu określenia pracy potrzebnej do uformowania warstwy gruntu o miąższości h w technologii H-S, tj. przez wtlaczanie, z gruntu w stanie plastycznym, miękkoplastycznym i płynnym formowano w małym pojemniku warstwy podłoża o miąższości $0,5 h$ i wtlaczano w każdą z takich warstw (z prędkością ok. 1 mm/s) beleczkę drewnianą o szerokości 1 cm aż do spągu warstwy, notując podnoszenie się powierzchni gruntu przy beleczce aż do osiągnięcia przez tę warstwę miąższości h . Pracę wtlaczania L_t obliczano jako iloczyn średniej wartości P_t siły wtlaczającej i drogi $0,5 h$ tłoka wtlaczającego.



Rys. 8. Redukcja energii doświadczalna (linia ciągła) na tle redukcji teoretycznej (linia kreskowa) dla dwóch stopni plastyczności I_{Lt} gruntu wtlaczanego

Fig. 8. Experimental (full line) and theoretical (dashed line) energy reduction for two values of the grouted soil liquidity index I_{Lt}

Redukcję energii l zdefiniowano jako stosunek pracy wtlaczania do pracy zgniatania. rys. 8 ilustruje porównanie teoretycznych (por. rozdział 7) i doświadczalnych wartości redukcji l w zależności od stopnia plastyczności I_{Lm} gruntu (miękkiego) warstwy podkładowej dla dwóch wartości (0,0 i 0,4) stopnia plastyczności I_{Lt} gruntu wtlaczanego (twardego). Doświadczenie potwierdza

wyniki analizy teoretycznej pod względem jakościowym, ale wykazuje znacznie silniejszą redukcję (mniejsze wartości l).

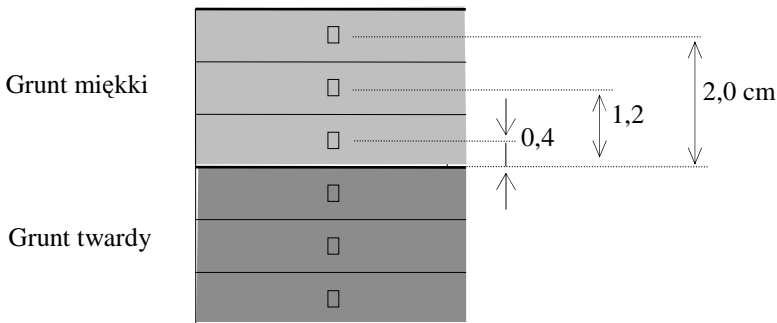
9.2. Tempo homogenizacji wilgotnościowej

Ten aspekt proponowanej technologii H-S zlecono do zbadania laboratoryjnego w ramach prac dyplomowych [7]. Badaniom poddano różne gliny z ostatniego zlodowacenia z rejonu koszalińskiego. Z gliny przygotowywano próbki o różnej wilgotności i plastyczności od stanu półzwartego do płynnego, dążąc do otrzymania wilgotności w równomiernie rozrzuconych w przedziale od granicy plastyczności w_p do granicy płynności w_L . Posługiwano się wyrażeniem

$$w = w_p + k (w_L - w_p), \quad (45)$$

w którym współczynnikowi k (ma on sens stopnia plastyczności) nadawano wartości 0, 0,1, 0,25, 0,4, 0,6, 0,9 i 1. Aktualna wilgotność gruntu i obliczona wzorem (45) pozwalały na obliczenie ilości wody, którą trzeba było dodać lub usunąć z gruntu, aby otrzymać grunt o wilgotności odpowiadającej przyjętej wartości współczynnika k . Po dodaniu tej ilości wody i po wymieszaniu badano wilgotność mieszaniny w celu sprecyzowania rzeczywistej wartości tego współczynnika.

Przygotowane w ten sposób próbki gruntu łączono parami w rozmaite kombinacje wartości współczynnika k a następnie umieszczano w jednym pojemniku cylindrycznym (por. rys. 9) o wysokości ok. 5,0 cm próbkę gruntu miękkiego (o dużej wilgotności) zetkniętą z próbką gruntu twardego (o wilgotności mniejszej). Dla każdej kombinacji gruntu twardego i miękkiego przygotowywano trzy egzemplarze takiego samego zestawu przeznaczone do otwarcia i zbadania wilgotności po różnych okresach czasu stykania się gruntów w szczelnym pojemniku.

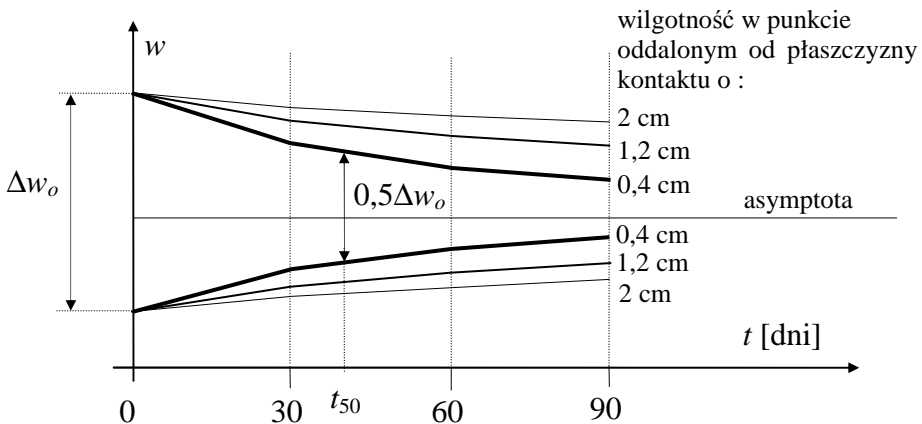


Rys. 9. Miejsca poboru próbek gruntu z pojemnika

Fig. 9. Places of soil sampling from the container

Pojemniki z gruntami przechowywano w warunkach ograniczających do minimum wymianę wody porowej z otoczeniem, a następnie otwierano w około miesięcznych odstępach czasu i poddawano badaniom wilgotności gruntu w sześciu miejscach, po trzy miejsca w każdej połowce zestawu. Miejsca te lokalizowano w osiowej strefie próbki w odległości 0,4, 1,2 i 2,0 cm od płaszczyzny kontaktu obu gruntów (rys. 9).

Pomiary wilgotności pozwoliły na skonstruowanie wykresów zmiany wilgotności w wymienionych odległościach od płaszczyzny kontaktu wraz z upływem czasu. Niezależnie od początkowych różnic wilgotności Δw_o między miękkim i twardym składnikiem zestawu gruntów w pojemniku wszystkie wykresy miały ten sam charakter wg rys. 10.



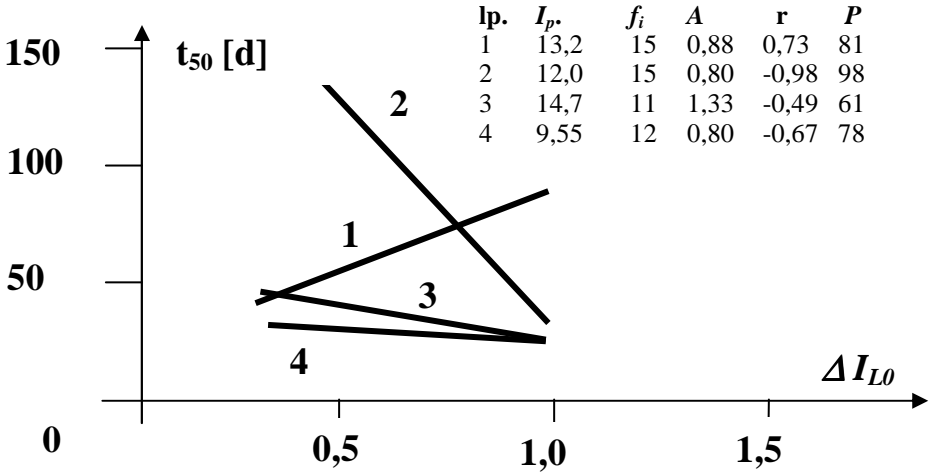
Rys. 10. Zależność wilgotności od czasu i od odległości od płaszczyzny kontaktu gruntu miękkiego (nad asymptotą) z gruntem twardym (pod asymptotą)

Fig. 10. Interrelation between moisture and time and the distance from the contact plane of the soft soil (above the asymptote) and the hard soil (under the asymptote)

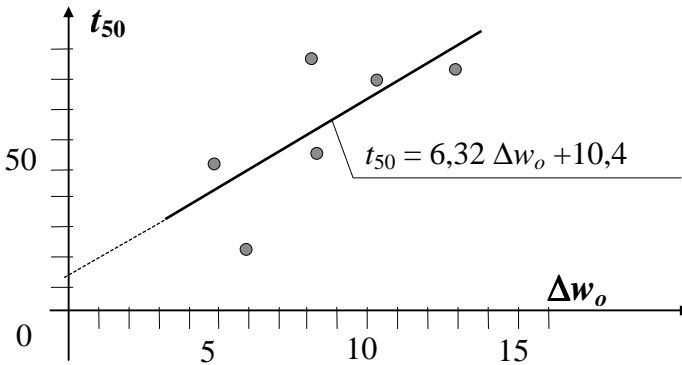
Na wykresach typu rys. 10 można było odnaleźć czas t_{50} 50-procentowej homogenizacji wilgotnościowej (tj. czas, w ciągu którego różnica wilgotności między gruntem miękkim i twardym zmniejszy się do 50% początkowej różnicy Δw_o wilgotności między tymi gruntami) z reguły tylko dla próbek pobieranych z miejsc najbliższych płaszczyźnie kontaktu (oddalonych od niej o 0,4 cm). Dla próbek bardziej oddległych od płaszczyzny kontaktu czas przeznaczony na badania nie wystarczył do spadku początkowej różnicy wilgotności o 50%.

Jednakże dla próbek najbliższych płaszczyźnie kontaktu na podstawie wyników badań zmian wilgotności w czasie dla sześciu kombinacji wilgotności początkowej gruntu miękkiego i twardego można było ustalić korelację i regresję między początkową różnicą stopnia plastyczności ΔI_{L0} (łatwo obliczyć na Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska ————— 187

podstawie wartości Δw_o) i czasem t_{50} . Związki między tymi wielkościami otrzymane dla czterech rodzajów gruntu spoistego przedstawia rys. 11, natomiast przykładowy (dla gruntu nr 1) wykres związku czasu t_{50} i różnicy wilgotności Δw_o przedstawia rys. 12.



Rys. 11. Czas 50% homogenizacji w funkcji początkowej różnicy stopnia plastyczności
Fig. 11. Initial liquidity index difference – 50% homogeneity time relationship



Rys. 12. Związek między Δw_o i czasem t_{50} dla gruntu nr 1 (punkty - dane doświadczalne, linia gruba - wykres regresji)

Fig. 12. Interrelation between Δw_o and time t_{50} for soil No 1 (dots - experimental data, thick line - regression graph)

W tabelce na rys. 11 podano parametry badanych gruntów: I_p – wskaźnik plastyczności, f_i – zawartość frakcji ilowej, A – aktywność koloidalna, r – współczynnik korelacji, P – poziom istotności współczynnika r (%) dla czterech różnych rodzajów gruntu spoistego wg [7].

Tylko dla gruntu nr 1 korelacja jest dodatnia (ze współczynnikiem $r^2 = 0,52$), dla pozostałych gruntów otrzymano korelację ujemną. Oznacza to, że zostało w sposób doświadczalny ustalone, iż czas 50-procentowej homogenizacji wilgotnościowej dla większości zbadanych gruntów skraca się wraz ze wzrostem różnicy wilgotności między stykającymi się składnikami gruntu, przy czym stopień pewności tego ustalenia jest statystycznie dość mocny. Niestety, nie udało się dotychczas wyjaśnić przyczyn radykalnie odmiennych typów korelacji w zbiorze gruntów o nie tak bardzo różniących się parametrach (przedstawionych w tabelce na rys. 11).

10. Podsumowanie

1. Proponowana technologia H-S (hard-soft) stwarza realne możliwości znacznego obniżenia kosztów wykonywania nasypów, ale w odniesieniu do konkretnego gruntu wymaga przeprowadzenia odpowiednich badań, przynajmniej w laboratorium. Analiza teoretyczna wykazuje możliwość znaczącego obniżenia energii zagęszczania nasypu z gruntu spoistego przez odpowiednie przekładanie porcji gruntu o małej plastyczności porcjami o dużej plastyczności. Redukcja energii wynikająca z zastąpienia technologii zgniatania technologią wtlaczania wyznaczona w warunkach laboratoryjnych potwierdza przewidywania teoretyczne pod względem jakościowym, ale okazuje się znacznie większa pod względem ilościowym.
2. Harmonogram wznoszenia nasypu powinien uwzględniać czas potrzebny na wyrównanie wilgotności lub plastyczności pomiędzy gruntami składowymi, tak aby wytrzymałość wyrównana zapewniała stateczność nasypu. Wyrównywanie wilgotności i plastyczności między składnikami nasypu zachodzi zbyt wolno z punktu widzenia potrzeb wykonawstwa nasypów, które mają być szybko oddane do eksploatacji. Należy przypuszczać, że ten proces homogenizacji przebiega szybciej w gruntach małospoistych, ale wymaga to potwierdzenia doświadczalnego. W obecnym stanie danych doświadczalnych należy ograniczyć stosowanie technologii H-S do nasypów, które nie będą musiały przenosić dużego obciążenia wkrótce po wykonaniu.
3. Stateczność nasypu należy oceniać na podstawie obliczeń opartych nie na wartościach średnich parametrów wytrzymałościowych gruntu twardego i gruntu miękkiego, ale na wartościach parametrów wytrzymałościowych gruntu miękkiego rosnących w miarę upływu czasu od wbudowania tego gruntu w nasyp.

4. Z ustalonych doświadczalnie redukcji energii i regresji czasu 50-procentowej homogenizacji z początkową różnicą wilgotności składników nasypu wynika, że jeśli celem będzie znaczna redukcja energii, to zapłacić za to trzeba będzie dłuższym czasem wyrównywania plastyczności (i wytrzymałości) składników.
5. Wartości parametrów geotechnicznych odnoszących się do konkretnych gruntów, m.in. wykorzystane w przykładzie obliczeniowym ilustrującym wywody teoretyczne, przyjmowane były według PN-81/B-03020. W przypadku realizacji nasypu według proponowanej technologii parametry wykorzystywanych gruntów należy wyznaczać doświadczalnie, najlepiej w odpowiednim laboratorium polowym.
6. Poza analizą pozostały takie ważne elementy projektowania, jak grubość poszczególnych warstw, czas wyrównywania potencjałów wilgotnościowych, sposób uwzględniania prognozowanego na okres budowy stanu pogody, rodzaj maszyny zagęszczającej, ilość przejazdów, dostosowanie przekroju poprzecznego nasypu do tempa budowy, organizacja magazynu gruntu miękkiego (ewentualnie gruntu twardego, jeśli na miejscu jest miękki), zagadnienia kosztów.
7. Proponowana technologia wydaje się racjonalna w takich warunkach, w których świeżo wznoszony nasyp nie będzie poddany znaczącemu obciążeniu powierzchniowemu na swej koronie lub znaczącym oddziaływaniom dynamicznym, więc m.in. w warunkach pracy wałów przeciwpowodziowych, wałów ograniczających kwatery na polderach, wylewiskach, składowiskach odpadów a także w warunkach pracy dróg przekazywanych do położenia nawierzchni w odpowiednio długim okresie czasu od wykonania nasypu.

Literatura

1. **Hauryłkiewicz J.:** Hard - soft technology of cohesive soil embankments. Proc. of the Semin. on Problems of Environ. Geoeng., Szczecin, maj 1997, p.79-82.
2. **Hauryłkiewicz J.:** Nasypy z gruntu spoistego o zróżnicowanej plastyczności; niektóre elementy projektowania. Mat. V Międzynarod. Konf. N.-T. „Gospodarka Odpadami Komunalnymi”, Kołobrzeg, czerwiec 1997, s. 369-374.
3. **Hauryłkiewicz J.:** Elementy prognozy stateczności i odkształcenia nasypów z gruntu spoistego o zróżnicowanej plastyczności. Mat. III Ogólnopols. Konf. Nauk. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”, Ustronie Morskie, czerwiec 1997, s.131-136.
4. **Hauryłkiewicz J.:** Nasypy z gruntu spoistego o zróżnicowanej plastyczności; redukcja energii zagęszczania. Mat. 44 Konf. KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, wrzesień 1998, t. VII, s. 161-167.

5. **Hauryłkiewicz J.:** Energia zagęszczania nasypów z gruntu spoistego o zróżnicowanej plastyczności; doświadczalna weryfikacja teorii. Mat. I Międzynarod. Konf. Nauk. „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”, Poznań, wrzesień 1998, s. 312-317.
6. **Hauryłkiewicz J.:** Technologia H-S wykonywania nasypów w świetle wstępnych doświadczeń. Mat. IV Ogólnopols. Konf. Nauk. „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska” Ustronie Morskie, maj 1999, s.439-447.
7. **Kozieja W., Łodziewska B., Piskulska R., Wasilewski M., Wróbel A.:** Technologia wykonywania nasypów z gruntu spoistego o zróżnicowanej wilgotności. Badania laboratoryjne migracji wody porowej między składnikami glin. magisterskie prace dyplomowe, Koszalin, 1998 (arch. Katedry Geotechniki Politechniki Koszalińskiej)
8. **Wiłun Z.:** Zarys geotechniki. WK i Ł, Warszawa, 1987.

Theory and Practice of Embankments Building from Cohesive Soil of Different Plasticity

Abstract

Cohesive soil is not a convenient material for embankments constructing because of high compacting energy required, especially - as it usually happens - when soil is in a state of low plasticity. Big lumps of hard cohesive soil are then given onto the constructing place. The first portion of energy is traditionally needed for crushing the lumps because of their inadequate shapes and of great caverns between the lumps. The second portion of energy is used in the course of compaction for getting adequate shape of even layer and for removing the caverns. Such technology is called here the crush - compact (CC) technology.

The paper presents possibilities of new technology implementation. This technology is called here hard - soft (H-S) technology.

This way of embankment constructing consists of incorporating two kinds of cohesive soil alternately: the layer of soft soil (i.e. soil of high plasticity) is put first and lumps of the hard soil (i.e. soil of low plasticity) are then placed on the soft layer and grouted into it with appropriate machines. The soft soil fills the caves between hard lumps and no energy is required for crushing the lumps and for forming hard layer later. Only one pass of the compacting machine is usually needed. Thus energy and embankment constructing time are essentially reduced. In the course of time the components become of more and more even plasticity.

Five design topics appear connected with this technology, however: 1° stabilised plasticity of the mixture, 2° volumetric relations between hard and soft parts of the soil, 3° forecast of stability, 4° forecast of deformation, 5° evaluation of the energy reduction. These topics have been theoretically solved and referred here.

- 1° One can determine stabilised plasticity of the mixture by means of the liquidity index I_L of the mixture that appears to be weighed average of components liquidity indices where masses of the soil skeleton in hard soil and in soft soil respectively are the weights.
- 2° Volumetric relation between soft (V_s) and hard (V_h) parts of the soil should ensure the caves between hard lumps be filled with soft soil. One can find that from this point of view, if we define $V_s/V_h = \mu$ and $\rho_{ds}/\rho_{dh} = r$ then mentioned above volumetric relation $\mu = \frac{1}{r} \cdot \frac{I_L - I_{Lh}}{I_{Ls} - I_L}$, where: ρ_{ds} , ρ_{dh} - dry density (skeleton volumetric density) of soft soil and of hard soil respectively, I_{Ls} , I_{Lh} - their liquidity indices. For most common cohesive soils in Poland the quantity $1/r$ may be taken according to plasticity index I_P in form $1/r = I_P + 1$, so it ranges between approximately 1.0 and 1.5.
- 3° Forecast of embankment stability should base on strength parameters of soft soil, but should take into account increase of these parameters values p (the angle of internal friction, cohesion) in course of time from values p_s corresponding to I_{Ls} (liquidity index of the soft soil) to values p_m corresponding to I_L (liquidity index of the mixture of the hard and soft soils). The formula of increasing the strength parameter p may be proposed as follows $p = p_m - (p_m - p_s) \exp(-bt)$, where: t - time, b - rate parameter, experimentally determined.
- 4° Forecast of embankment deformation should take into account some different sources of the deformation: overburden pressure, surface load and so on, deformations from these sources can be assessed in usual way, but pore water migration may essentially affect the embankment deformation as well. When pore water migrates from soft part into embankment incorporated soil to the hard part, both parts change their volumes: shrinkage appears in the soft soil and swelling in the hard one. These changes superimpose on each other and the resulting change can be defined as $v = (V_s + V_h)/V_m$, where: V_s , V_h , V_m are: original volume of the soft component, original volume of the hard component, final volume of the mixture, respectively. One can prove that v may be determined as follows: $v = (r_h + r_s \mu)/(1 + \mu)$, $r_h =$

ρ_{dh}/ρ_{dm} ($r_h > 1$), $r_s = \rho_{ds}/\rho_{dm}$ ($r_s < 1$) where: μ - volume relation pointed above at 2°, ρ_{ds} , ρ_{dh} , ρ_{dm} - dry density of soft soil, of hard soil and of the mixture respectively. The quantities r_h and r_s determine also the rate of swelling and rate of shrinkage respectively. It can be also proved that by pore water migration affected volume change does not appear if μ takes the critical value $\mu_{cr} = (r_h - 1)/(1 - r_s)$. Hence, if $\mu < \mu_{cr}$, then $v > 1$ and embankment swelling appears, if $\mu > \mu_{cr}$, then $v < 1$ and shrinkage appears.

Following values of r_h and of r_s for approximate calculations may be assumed:

Plasticity index I_p	r_h	r_s
0.02 – 0.1	1.04	0.95
0.1 – 0.2	1.09	0.90
0.2 – 0.3	1.11	0.88
> 0.3	1.14	0.85

5° Energy reduction results mainly from excluding crushing and compacting of hard soil lumps. It may be defined as $l = L_{HS} / L_{CC}$, where: L_{HS} , L_{CC} - work needed for constructing certain embankment layer using hard - soft technology and using crush - compact technology respectively. The value of quantity l ranges from about 0.08 to 1.00 dependent on the relation between shear strength of the soft and of the hard part of incorporated soil. The lower is the soft soil strength compared with strength of the hard soil the less is the power consumption needed for embankment construction. For example, when hard and soft parts of soil have liquidity index of 0.1 and 0.7 respectively, and thickness of formed layer is of 2.0 m, then l equals to 0.22. Thus HS technology in this case needs energy only of 22% of the energy required with CC technology.

Experimental confirmation and specification have been achieved regarding energy reduction (Fig. 8) and plasticity evening rate (Figs. 10, 11, 12).

HS technology will be useful especially when embankment is not considerable statically or dynamically loaded just after its construction.