

שמואל גפן - הנדסת קרקע בע"מ

SAMUEL GEFFEN - SOILS ENGINEERING LTD.

GEOTECHNICAL CONSULTING יעוץ בהנדסת קרקע וביסוס

SOIL MECHANICS, ENGINEERING GEOLOGY, AIR PHOTO ANALYSIS

תאריך: 09/11/2005

עב' מס': 03D96/4

הנדון: אתר חיריה - איטום המטמנה

דו"ח ניתוח תוצאות של בדיקות מעבדה

1. המחקר ומטרתו

המחקר שלהלן הוזמן על ידי מנהלת אפר הפחם. מטרת המחקר הנה איטום פני מטמנת חיריה באמצעות חרסית פלסטית, וזאת אחרי הקטנה ונטרול של תכונות התפיחה וההתכווצות שלה על ידי ערבובה עם אפר פחם מרחף (להלן "אפר פחם"). בדיקות מעבדתיות לימדו כי ניתן לערבב אפר פחם עם חרסית תוך כדי שמירה טובה על תכונות האיטום של החרסית שהוא חומר בעל מוליכות הידראולית נמוכה - ונטרול פוטנציאל הסדיקה. כידוע, התפיחה וההתכווצות של החרסית קורות בעיקר עקב שינויים בתכולת הרטיבות וכמעט ולא בגלל שינויים בלחץ המופעל עליה. זוהי תופעה עונתית בעיקרה, אך לא רק עונתית.

מחקר זה מתייחס לאפר פחם שסופק על ידי מנהלת אפר הפחם, ממקורות שונים, ולחרסית מאתר נחל שפירים העובר בסמוך לאתר מטמנת חיריה.

הבדיקות נערכו בחומרים ובתערובות שיפורטו בהמשך. את מכלול התוצאות של כל הבדיקות אפשר לראות בחוברת שהוצאה לאור על ידי המבדקה לבניין ותשתיות של מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ. תאריך פרסום הדו"ח הוא ספטמבר 2005, והוא חתום על ידי הגברת דניאלה הרשקוביץ' (M.Sc.) - מהנדסת אחראית על מעבדת התשתיות. הנחיות לביצוע ניסויי המעבדה ניתנו על ידי משרדנו בצורה שוטפת.

על אף שמטרתו העיקרית של המחקר הייתה חקר השימוש בתערובות לאיטום, נערכו גם מבחני חוזק אחדים. המבחנים בוצעו במספר מדגמים כדי לבדוק את יכולת העיבוד בשטח תחת פעולת מכוניות/מכבשים/משאיות פיזור.

השימוש באפר פחם מרחף (Fly Ash) למטרות איטום נמצא במקורות ספרות שונים; אך לצד איזכור האיטום מודגש בהם השימוש בתערובות אלה לחיזוק תשתיות דרכים. הסיבה לכך היא התכונות הפוצולניות (צמנטציה) של האפר.

אפר הפחם הנו פסולת הנותרת לאחר שרפת פחם בתחנות כוח.

19, NAHAL KANE ST. KFAR-SABA, נחל קנה 19, כפר סבא 44245

TEL: 09-7670643, 054-4822401 TEL/FAX: 09-7653167 טל': 09-7670643, 054-4822401 טל' /פקס':

E-MAIL: sgeffen@zahav.net.il

9.11.05

הניסיון המקצועי - בארץ ובחול - של איטום בחרסית המעורבת באפר פחם הוא מוגבל. עבודה קודמת נעשתה בהנחיית משרדנו; נושא העבודה ההיא היה איטום מאצרות באמצעות ערבוב שני החומרים שלעיל. יישומו של האיטום הנ"ל בוצע באתר בתי הזיקוק באשדוד – מסוף תזקיקים [גפן, 2003]. גם באותה העבודה נעשו בדיקות מעבדה, אך זאת לצד בדיקות שדה; הבדיקות נעשו על חרסית מקיבוץ רבדים ועל אפר פחם ממקור דרום-אפריקני, אפר פחם אשר נלקח מתחנת הכוח שבאשקלון.

2. סקר ספרות

[Cocka, 2001] ערך ניסויים בחרסית המכילה מונטמורילוניט (מרבית החרסיתות בארץ מקורן במינרל זה). זוהי חרסית בעלת פוטנציאל תפיחה והתכווצות ניכר. במקרים רבים גורמות התפיחה והתכווצות - בעיקר באזורים צחיחים (Semiarid) - לסדקים בכבישים, במבנים, בסוללות, במאגרי מים ובמאגרים למטרות אחרות.

אחת השיטות הידועות להקטנת שינויי נפח החרסית ולייצובה הוא עירוב החרסית בסיד ובצמנט [Kehew, 1995]. שיטה זו היא בעלת תשומות כלכליות נכבדות, שכן בדרך כלל יש צורך בהובלת החומרים המוספים לאתר ועלות חומרי הגלם היא גבוהה. לעומת זאת, הייצור ההולך וגדל של אפר פחם מרחף – עקב הגדלת הדרישה לאנרגיה בתחנות הכוח – יצר דרישה למצוא שימושים הנדסיים לאפר זה.

המוליכות ההידראולית של אפר פחם מסוגי C ו-F נבדקה במספר מחקרים; נערכו בדיקות מעבדתיות בכמה מדגמים מהודקים ובדיקות באתר [Palmer et al, 1999]. דווח על קושי להגיע למוליכות הידראולית בסדר גודל של 10^{-9} מ"שנייה. בבדיקות המוליכות שנערכו כעת נמדדו לרוב תוצאות גבוהות יותר, תוצאות אשר הצביעו על נוכחות סדקים ועל זרימה מקרוסקופית.

המחקרים מציינים כי יש לשים לב לנושא העירוב האחיד וההדוק באתר. במספר עבודות שנערכו בכמה ממדינות ארצות-הברית נתקבלו ערכי מוליכות הידראולית של אפר פחם מרחף המעורב בחומרים גרנולריים הנעים בין 10^{-7} מ"שנייה ל- 10^{-8} מ"שנייה. לאחר התגובה הפוצולנית של האפר התקבלו ערכי מוליכות הידראולית של 10^{-8} מ"שנייה עד ל- 10^{-9} מ"שנייה.

בארץ נערכה עבודה [ר. קרון, א. מצגר, מ. בן חור, 2000] לבחינת יכולת החדירות של אפר פחם בסוללת ג'סר א-זרקה. החוקרים הניחו כי קיימת ירידה ביכולת החידור עם הזמן ותלות של מקדם החידור בדרגת ההידוק, אולם הם ציינו כי מסקנות אלה מבוססות על הנחות המחייבות הוכחה. הבדיקות במחקר שלעיל התייחסו ליכולת החידור הקיימת באפר פחם בלבד ולא בתערובות.

היציבות המבנית וחוזק התערובת של חרסית ושל אפר פחם נבדקו בארץ בעיקר על ידי ד"ר מריו הופמן בפרוייקט חוצה ישראל - כביש 57 [יונה, 2000]. המחקרים כללו

9.11.05

בדיקות מעבדה ושדה. ד"ר הופמן דיווח כי הקשיחות של סוללות הכוללות אפר פחם גדולה מקשיחות הסוללות שנבנו מחומרי סלילה קונבנציונליים, ולדעתו התגובה הפוצולנית גורמת להקשחה נוספת עם הזמן.

מבחינה ארוזיבית מהווה אפר הפחם קרקע בעלת פוטנציאל ארוזיה ניכר בעיקר עבור מים זורמים [לפי Gray and Sotir, 1996]. עירובה של החרסית בעלת פוטנציאל הארוזיה הבינוני-נמוך באפר הפחם המרחף אינו משנה את סימול החרסית מבחינת שיטת המיון האחידה. שיטת המיון האחידה מהווה מדד לקביעת ארוזיביות של קרקע; לכן ניתן לקבוע כי התערובת (חרסית + אפר פחם) הנה בעלת פוטנציאל ארוזיה נמוך, וזאת בהתאם לדעת החוקרים שצוינו לעיל.

3. איטום פני אתר פסולת (Capping)

בכל העולם המערבי, ואולי גם בעולם המזרחי, לאחר הפסקת מילויים של אתרי פסולת נהוג לכסותם בשכבה אוטמת. על שכבה זו למנוע חדירת מי גשם (בעיקר) ויציאת גז בלחץ נמוך, וזאת בהנחה שהגז מוצא באופן מסודר ועקבי באמצעים אחרים. דרישה נוספת משכבת האיטום היא לאפשר גידול צמחייה אשר תגן מפני ארוזיה ותעודד פיתוח נוף.

שיטות האיטום המוכרות בעולם הן רבות למדי, אך אחת מהן נחשבת ליעילה ולזולה ביותר. הכוונה היא לכיסוי בשכבת חרסית; זהו חומר בעל מקדם חלחול נמוך מאוד (10^{-10} מ"שנייה, ואף פחות מכך) - נמוך כמו שכבת בטון כמעט, אך עלותו נמוכה הרבה יותר. מדד הפלסטיות של החרסית מצביע במידה רבה על מקדם החלחול שלה.

בעולם קיימים מחקרים העוסקים בתכונות מכניות של חרסית מעורבת באפר פחם; אך כאמור לעיל לרוב מוזכר שם נושא האיטום כבדרך אגב, והקטנת התפיחה והסידוק מצוינת רק במרומו. רוב המחקרים שנעשו בארץ ובחו"ל התייחסו לשימושים אחרים בתערובות הללו - בעיקר לשיפור החוזק של תערובות חרסית המשמשות בכבישים ובסוללות, לרוב בתוספת של סיד או צמנט. המחקר הנוכחי מבוסס על המידע הספרותי הקיים בנושא עירוב חרסית ואפר פחם, כמו גם על הניסיון שהצטבר בעבודה קודמת אשר צוינה לעיל. מערכות מקיפות של בדיקות מעבדה תוכננו כעת על בסיס המידע הקיים.

החרסיתות המכילות מונטמורילוניט מהוות את רוב החרסיתות בארץ; הן תופחות בעת הרטבתן ומתכווצות ונסדקות מאוד בעת התייבשותן. תכונת הפלסטיות הטובה המאפיינת סוג חרסית זה הנה לרועץ (בארץ ובאזורים אקלימיים דומים), וזאת בגלל התפיחה וההתכווצות הרבה של החרסית.

לאור האמור לעיל, התכונות הרצויות של שכבה אוטמת העשויה חרסית - או חרסית ששופרה באמצעות ערבובה עם חומרים אחרים - תהיינה כדלקמן:

- חומר האיטום יהיה בעל מקדם חלחול נמוך ככל האפשר.
- השימוש יהיה בתערובות אינרטיות, תערובות שאינן תופחות ואינן מתכווצות עקב שינויים בתכולת הרטיבות (הרטבה בחורף וייבוש בקיץ).
- השימוש יהיה בתערובות "גמישות" ככל האפשר, כאלה המאפשרות שינויי צורה במשך הזמן ותיקון במהיר.
- עלות התערובת תהיה נמוכה ויהיה נוח לפזרה אותה מעל לערמת הפסולת.

החרסיתות הנמצאות בקרבת האתר הן אטימות למדי, ויתרון העיקרי בכך שהן זמינות בכמות מספקת; פלסטיותן אכן נמוכה, אך הן עדיין מתאימות לאיטום.

המחקר המתואר להלן הנו יישומי, כלומר על בדיקות המעבדה להתאים במידה רבה לעבודה בשדה ולהראות תוצאות זהות (עד כמה שהדבר אפשרי). בעבודת איטום אחרת שנעשתה לפני כשנתיים [גפן, 2003] נמצא כי היו קשיים ביחס ליישום בשדה. לעומת זאת היו התוצאות של בדיקות התפיחה והחלחול שנערכו בשכבת האיטום טובות למדי, ואף טובות מאלו שהושגו במעבדה. קשיי היישום נלמדו – הן מעבודה זו והן מעבודה אחרת שנערכה על ידי ד"ר מריו הופמן (עבור כביש חוצה ישראל, כביש 6) - ויש סיכוי סביר כי ניתן ליישם את הכיסוי של ערמת הפסולת באמצעות ביצוע משופר של העבודה.

לשם האיטום אין בדרך כלל צורך בשיפור תכונות החוזק של החרסיתות, אלא אם תוספת החוזק משפרת גם את תכונות החלחול. ייתכן שהגדלת החוזק של שכבה אוטמת היא מיותרת ואולי אף מזיקה מבחינת החלחול, וזאת כי השכבה קשיחה ונשברת ביתר קלות אם מתרחשות תנועות בהר הפסולת שגובהו כ-60 מ'.

4. חומרים ותכנית הבדיקות

החרסית שנבחרה לביצוע הבדיקות הנה חרסית מקומית מאתר הסמוך לחיריה, והיא נלקחה משם בהיותה זמינה. נטילת החרסית בוצעה בשני מועדים ולא מאותו מקום במדויק, כך שלמעשה נעשה שימוש בשתי חרסיתות בעלות תכונות שונות זו מזו; עם זאת, שתיהן מייצגות את החרסית הנמצאת ליד אתר חיריה. תכנית הבדיקות כללה מערכות ניסוי רבות, כי גם מדגמי אפר הפחם הוחלפו באמצע העבודה. נעשה שימוש בשלושה סוגים של אפר פחם ממקור דרום-אפריקני ובסוג אחד של אפר פחם ממקור קולומביאני; כאמור, נעשה שימוש בשני סוגים של חרסית. התכונות הבסיסיות של החרסיתות רשומות בעמוד 2 של דו"ח מבדקת הטכניון. באותו העמוד רשומים גם ההרכבים הכימיים של ארבעת סוגי אפר הפחם שנעשה בהם שימוש במחקר זה.

החרסיתות ששימשו לבדיקות נבדלות זו מזו בעיקר בגבולות הסמך (אך שתיהן חרסיתות רזות) ובתכולת הדקים. התכונות העיקריות של אפרי הפחם מוצגות בטבלה מספר 1 שלהלן (הלקוחה מתוך דו"ח הטכניון). אפשר לראות כי רוב ההבדלים הנם בין סוגי האפר הדרום-אפריקני לבין האפר שמקורו קולומביאני.

טבלה מס' 1

הרכב כימי עיקרי של אפר פחם מרחף שעורבב עם חרסית 1 וחרסית 2

תכולה (באחוזים)		יסוד כימי עיקרי
קולומביה	דרום-אפריקה משלושה מקורות	
59	40-45	SiO ₂
23	31-33	Al ₂ O ₃
7.5	2.6-4	F ₂ O ₃
2.5	10-12	CaO
1.3	3-6	Loss On Ignition

כפי שצוין בסעיף 3 שלעיל, רוב החרסיתות בארץ מכילות מונטמורילוניט - חרסית בעלת פוטנציאל גבוה לשינוי נפח עקב שינויי רטיבות בקרקע; במחזורי אקלים של ייבוש והרטבה נסדקת החרסית עם התייבשותה ותופחת עם הרטבתה. אם נוצרים סדקים, אובדת יכולת האיטום של החרסית. במחקר זה נעשה ניסיון לבחון את התנהגותה של חרסית המעורבת באפר גם בעת מחזורי ייבוש והרטבה, כלומר לבדוק את התערובת בשעת התכווצות או תפיחה. נבדקו אחוזי אפר הפחם בתערובת מ-0% עד ל-100% - ראוי עמודים 4 עד 6 בדו"ח הטכניון.

תערובות שלא הראו תפיחה והתכווצות נבדקו לקביעת מקדם מוליכות הידראולי. בדיקות החלחול נערכו לאחר אשפת המדגמים - חלקם עברו הידוק וחלקם לא עברו הידוק. כל המדגמים הוכנו בגלילים בקוטר של 6", גלילים המשמשים לבדיקות קונבנציונליות של תסבולות קרקע וחומרי סלילה (מ.ת.ק. = CBR). בבדיקות שנעשו על החרסיתות ועל התערובות נבחנו גבולות הסמך (Atterberg Limits) ודירוגים; בדיקות הידוק וחלחול נערכו לפי תקני ASTM המשמעותיים, והם מופיעים בעמוד 1 של דו"ח הטכניון.

המדגמים הוכנו בתנאים שונים מבחינת תכולת הרטיבות ההתחלתית שלהם - חלקם הוכנו ברטיבות גבוהה, בעיקר אלה שלא הודקו. נבדקו גם מדגמים בודדים לבחינת חוזק התערובות בבדיקת מ.ת.ק. מעבדתית.

בבדיקות נבחנו הגורמים שלהלן:

- א. בדיקות אינדיקטיביות שונות שימשו לקביעת גבולות סמך ומשקל יחסי
- ב. יחסי צפיפות-רטיבות בגלילים שהודקו בדרגות אנרגיה שונות, לרבות גלילים ללא הידוק (בשפיכה, לאחר הערבוב של החומרים בתוספת מים)
- ג. שיעור תפיחה בגלילי מ.ת.ק. – כאלה שעברו הידוק וכאלה ללא הידוק
- ד. חדירות הידראולית למי ברז לקבלת מקדמי חלחול, וזאת בהנחה שגם באתר ייעשה שימוש במי ברז

ה. בדיקות מ.ת.ק. אחדות המשמשות כבדיקות חוזק
ו. בדיקות כימיות ומטרולוגיות.

הבדיקות המופיעות בסעיפים א'-ה' בוצעו במעבדת מוסד הטכניון למחקר ופיתוח, ואילו הבדיקות המוזכרות בסעיף ו' בוצעו על ידי המכון הגיאולוגי. תוצאות כל הבדיקות מרוכזות בדו"ח הטכניון על נספחיו.
כל התערובות עורבבו עם מי ברז כדי לדמות את העבודה למתרחש באתר.

5. תוצאות הבדיקות

חומרים

טבלה מספר 2 (טבלה 3 בדו"ח הטכניון) מתארת את כל הרכבי החומרים שנבדקו:

טבלה מס' 2

חרסית 2				חרסית 1			
אופן הכנת הגלילים	הרכב		כינוי התערובת	אופן הכנת הגלילים	הרכב		כינוי התערובת
	אחוז אפר פחם	אחוז חרסית			אחוז אפר פחם	אחוז חרסית	
הידוק	0	100	A2	הידוק	0	100	A
עם אפר פחם דרום-אפריקני 2				עם אפר פחם דרום-אפריקני 1 א'			
שפיכה	20	80	C3	הידוק	5	95	A'
שפיכה	25	75	C33	הידוק	15	85	B
שפיכה	30	70	D3	הידוק	20	80	C
שפיכה	35	65	D33	הידוק	30	70	D
שפיכה	40	60	E3	הידוק	40	60	E
עם אפר קולומביאני				הידוק	60	40	F
הידוק/שפיכה	20	80	K	הידוק	80	20	G
שפיכה	25	75	K/L	הידוק	100	0	H
הידוק/שפיכה	30	70	L	עם אפר פחם דרום-אפריקני 1 ב'			
שפיכה	35	65	M	הידוק	15	85	B-2
הידוק/שפיכה	40	60	N	הידוק/שפיכה	20	80	C-2
				הידוק/שפיכה	30	70	D-2
				הידוק	40	60	E-2

חרסיתות

הבדיקות האינדיקטיביות בחרסיתות שנלקחו מאתר חיריה מוצגות בצורה מפורטת בדו"ח הטכניון. הממצאים מראים כי החרסיתות רזות ומוגדרות כ-CL לפי שיטת המיון האחידה. כ-52% עד 60% מהחומר הדק עובר דרך נפה מספר 200. כלומר על אף שהחרסיתות רזות וחוליות למדי, נמצא כי יש להן תפיחה והתכווצות ניכרות - בעיקר לאחר הידוקן.

אפר פחם מרחף

לשם ביצוע הבדיקות במערכות הניסוי הובאו סוגים של אפר פחם משני מקורות: דרום-אפריקה וקולומביה. סופק אפר מארבע אצוות שונות – שלוש אצוות היו דרום-אפריקניות, ואחת הגיעה ממקור קולומביאני. את תוצאות הבדיקות הכימיות של ארבעת סוגי האפר ניתן לראות בצורה מפורטת בעמוד 2 בחוברת הטכניון, ובצורה מקוצרת בטבלה מספר 1 שלעיל.

ההרכב הכימי של האפר שונה למדי בין מדגם למדגם; אולם נראה כי למרות ההבדלים הכימיים הקיימים בתוך כל קבוצה, תוצאותיהן של חלק גדול מהבדיקות אינן שונות מבחינת מקדמי האיטום - אם כי נבדלות מאוד זו מזו בתכונות החוזק. כאמור לעיל, בדיקת נתון החוזק לא הייתה בין מטרות המחקר; אך תוצאות החוזק עשויות להועיל, ולכן הן נכללו בחוות-דעת זו.

תערובות

כפי שמצוין בטבלאות מספר 1 ו-2 בדו"ח של הטכניון בוצעו בדיקות אינדיקטיביות בתערובות המכילות אפר פחם בשיעורים של בין 0% ל-100%. תוצאות הבדיקות האינדיקטיביות של כלל התערובות מוצגות בחלוקה לסוגי החרסית ולסוגי האפר השונים, והן מופיעות בדו"ח של הטכניון בפרק "ריכוז בדיקות אינדיקטיביות" (בטבלאות 4A, 4B ו-4C ובדיאגרמות המוצגות בתרשים מספר 1).

ניתן להסיק מטבלאות 4A-4C ומתרשים מספר 1 כי הוספת האפר באחוזים שונים אינה משנה כמעט את גבול הנזילות. לעומת זאת ברור כי תוספת האפר מגדילה את גבול הפלסטיות, ובכך מקטינה את מדד הפלסטיות בצורה ניכרת. לשינוי זה יש כנראה השפעה מכרעת על תכונות התפיחה וההתכווצות, והדבר יפורט בהמשך. ניתן עוד להיווכח כי בתערובת בעלת תכולת אפר העולה על 60%, התערובת הנה לא פלסטית לחלוטין - כפי שאפר הפחם עצמו איננו פלסטי. השוואה בין אפר פחם דרום-אפריקני לאפר פחם קולומביאני מראה כי מהאפר הקולומביאני מתקבלות תערובות בעלות פלסטיות נמוכה יותר - כאשר מוסיפים לאותה החרסית אחוזים שונים של אפר פחם. הסיבה לכך נעוצה בהבדלים הקיימים בהרכב הכימי של שני סוגי האפר.

9.11.05

בטבלאות שלעיל צוין גם המשקל היחסי כפונקציה של הרכב התערובת. אפשר לראות כי לכל הרכב תערובת יש מאפיין הייחודי לו.

6. צפיפות-רטיבות ותפיחה

צפיפות-רטיבות

(ראו בפרק "ריכוז בדיקות יחסי צפיפות-רטיבות" בדו"ח הטכניון)

מוצקי האפר קלים ממוצקי החרסית; לכן בתערובות שאחוז האפר בהן עולה, יורד המשקל היחסי (Gs) של התערובת - כפי שניתן לראות בתרשימים המופיעים בטבלאות 5A ו-5B בדו"ח הטכניון. הבדיקות נערכו בתערובות שונות ובהידוקים שנעשו בדרגות אנרגיה של 10 ושל 25 הקשות לשכבה. התרשים מבוסס על הצפיפויות המרביות שהושגו. 94% מהצפיפות המרבית שהושגה ב-25 הקשות זהה באפרי הפחם הדרום-אפריקניים לצפיפות המרבית שהושגה ב-10 הקשות. נתון זה חשוב, כי בעתיד ניתן יהיה להקטין את מספר הבדיקות שיידרשו.

בגלילים שהכילו מערכות מ.ת.ק. בוצעו בדיקות צפיפות-רטיבות תוך כדי מדידת התפיחה לאחר השריה במים, וזאת על מנת לקבוע את הרגישות להגדלה בתכולת הרטיבות של השכבה ששימשה להידוק. לרוב מבצעים את הבדיקות של יחסי צפיפות-רטיבות במערכות המ.ת.ק. בשלוש דרגות אנרגיה - 56 הקשות לשכבה, 25 הקשות לשכבה ו-10 הקשות לשכבה. מאחר שידוע כי צפיפויות גבוהות גורמות לתפיחה מוגברת, בוצע ההידוק ב-56 הקשות במדגמים בודדים בלבד. בנוסף לכך, גם הידוק של שכבות בעלות תכולת רטיבות נמוכות גורם לתפיחה מוגברת בחרסיתות. את התוצאות אפשר לראות בתרשים מספר 2 בחוברת הטכניון (חמישה עמודים). במדגם הבודד שהודק ב-56 הקשות, מדגם אשר הכיל תוספת של 30% אפר פחם דרום-אפריקני מסוג 1 א', נוטרלה התפיחה כל עוד תכולת הרטיבות היו גבוהות מכ-18%.

באותן הבדיקות הוברר כי בתכולות רטיבות גבוהות - ההבדל בצפיפויות שניתן להגיע אליהן בשלוש דרגות האנרגיה אינו רב, או איננו קיים כלל; על כן אין משמעות מעשית להשקעת אנרגיה גבוהה בהידוק, מכיוון שמתקבלת אותה הצפיפות גם לאחר השקעת אנרגיה נמוכה או בינונית. עקב כך נערכו מרבית הבדיקות הצפיפות-רטיבות בשתי דרגות האנרגיה הנמוכות, דהיינו 10 הקשות ו-25 הקשות לשכבה. בתכולות רטיבות גבוהות אף פוחתת התפיחה, או אפילו מתאפסת. חלק מהבדיקות נערכו במדגמים שלא הודקו כלל, אך היו בדרגות רטיבות גבוהות למדי.

כפי שניתן להיווכח מעיון בתוצאות הבדיקות, הרטיבות האופטימלית הגורמת לצפיפות מרבית של התערובות עולה ככל שאחוז האפר בתערובת עולה ושיעורו הוא מעל ל-14% בחרסית בלבד ועד ל-46% באפר בלבד. הצפיפות המרבית קטנה כמובן עם עליית אחוז האפר בתערובת, וזאת מאחר שהמשקל היחסי של אפר

9.11.05

הפחם נמוך הרבה יותר מזה של החרסית - 2.36 לעומת 2.7. מתוך תרשים מספר 3 המופיע בדו"ח הטכניון אפשר לקבוע בקירוב רב את הצפיפות היבשה המרבית של כל תערובת במצב של הידוק (לפי שתי אנרגיות).

השתנות הצפיפות היבשה, כלומר פילוג הצפיפות, אינה דומה בין תערובת אפר הפחם הדרום-אפריקני לבין אפר הפחם הקולומביאני; ייתכן שניתן ליחס זאת להבדלים הקיימים בין התכונות של החומרים, אך מיעוט הבדיקות שנערכו באפר קולומביאני לא מאפשרים להסיק מסקנות חד-משמעיות.

תפיחה ראשונית

כפי שצוין בפרקים הקודמים, החרסית המתייבשת נסדקת; מקדם המוליכות שלה עולה בכמה סדרי גודל, והיא אינה יכולה לשמש עוד כחומר איטום. על מנת לבדוק במעבדה תכונה זו בצורה כמותית נמדד שיעור התפיחה של התערובות השונות במערכת מ.ת.ק. ככל ששיעור התפיחה גבוה יותר כך פוטנציאל הסדיקה של התערובת גדול יותר. בחרסית 1 מאתר חיריה – מהודקת - התקבלה תפיחה מרבית של למעלה מ-4.5%. התפיחה התייצבה במשך הזמן, אך לא נפסקה לגמרי גם לאחר 50 שעות של השריה במים. התפיחה הגבוהה התקבלה בשכבות בעלות תכולת רטיבות של עד 14% ובהידוק של 25 הקשות.

כדי להגיע לאיפוס התפיחה נבדקו גם תערובות B, C, D ו-E – תערובות המכילות 15%, 20%, 30% ו-40% של אפר פחם.

מהתבוננות בטבלאות 6A ו-6B המציגות יחסי צפיפות-רטיבות ותפיחה בתערובות אלה ניתן להבין כי התפיחה התאפסה לחלוטין בתכולות רטיבות גבוהות. אין ספק כי אפר הפחם משפיע באופן פעיל על יכולת התפיחה הראשונית של החרסית. ככל שאחוז האפר בתערובת עולה, כך קטנה התפיחה (ראו נספח 1 בדו"ח הטכניון – בדיקות שיעור תפיחה ויחסי צפיפות-רטיבות). נתון חשוב נוסף הוא גורם הזמן.

בתערובות האפר והחרסית נמצא כי לא רק שיעור התפיחה קטן, אלא שהתפיחה נפסקת לחלוטין לאחר זמן קצר. משך זמן זה הוא למעשה קצר יותר מאשר זמן העבודה והיישום באתר, כלומר התפיחה נפסקת עוד בטרם הסתיימו העבודות באתר. בתערובת C התקבלה תפיחה מרבית של 1.35%, אך גם תפיחה זו נפסקה לאחר כשעתיים (במדגם מעבדתי). בתערובות העשירות יותר באפר פחם, למשל תערובת D, הגיע שיעור התפיחה המרבי ל-0.41% בלבד והוא נפסק לגמרי לאחר כשלוש שעות (ראו דיאגרמות בעמודים 17 ו-18 בחוברת). הדוגמאות שלעיל מתייחסות לאנרגיית הידוק של 25 הקשות, אולם המגמה נכונה עוד יותר עבור אנרגיה נמוכה של 10 הקשות. יש להדגיש כי הוספת 20% ויותר של אפר פחם דרום-אפריקני או קולומביאני איפסה את התפיחה בכל דרגות האנרגיה ובכל תכולות הרטיבות שנבדקו. מדגמי החרסית שלא הוספנו

9.11.05

להם אפר פחם ואשר הודקו בתכולות רטיבות נמוכות, המשיכו לתפוח גם לאחר 40-50 שעות השריה - וזאת על אף שאלו חרסיות רזות.

תפיחה חוזרת

התפיחה לאחר ייבוש בתנאי חום של 50° חשובה לנו, וזאת מכיוון שהיא מהווה הדמיה (סימולציה) לתנאים הקיימים באתר (בקנה מידה גדול) לאחר יישום השכבה האוטמת. התערובות אכן יובשו בתנור בטמפרטורה של 50° , ולאחר מכן הן הושרו שוב במים; נמדדה התפיחה החוזרת של המדגמים בגלילי ההידוק. מהתוצאות המוצגות עולה כי בחרסית נקייה לא התאפסה לגמרי התפיחה החוזרת, וזאת על אף שהמדגמים שנבדקו הודקו בתכולות רטיבות די גבוהות; תוספת של אפר פחם - אפילו 15% בלבד - גרמה להפסקה מוחלטת של התפיחה והתפיחה החוזרת. בכל השלבים תפחה חרסית 1 הפלסטית יותר מאשר חרסית 2.

את השפעת הזמן על התפיחה אפשר לראות בתעודות ובשרטוטים המופיעים בנספח 1 של דו"ח הטכניון. פירוט לגבי מדגמים שהוכנו ללא הידוק נמצא ב"תעודות בדיקות שיעור תפיחה"; פירוט זה הכולל את השפעת הזמן (אם הייתה) מופיע בדו"ח הטכניון בעמודים 59-63.

שיעורי הידוק - סיכום

מתוך מהלך ביצוע הבדיקות שלעיל ניתן להסיק את המסקנות שלהלן:

- א. רטיבות התחלתית גבוהה מקטינה או אפילו מאפסת את שיעור התפיחה הראשוני והמשני גם יחד.
- ב. תוספת אפר פחם, אפילו בשיעור נמוך של 15%, מקטינה את שיעור התפיחה הראשונית והחוזרת גם יחד.
- ג. הידוק הנעשה לשכבות בעלות תכולות רטיבות גבוהות נותן תוצאות דומות (מבחינת הצפיפויות המתקבלות) בין כל דרגות האנרגיה הנהוגות בבדיקות מ.ת.ק. למעשה התקרבות לרוויה מפריעה להשגת צפיפויות גבוהות בכל אנרגיות ההידוק המקובלות.
- ד. לצורך הכנה במעבדה של מדגמים ללא הידוק נדרשת תכולת רטיבות גבוהה יותר מאשר במדגמים מהודקים, והצפיפויות המתקבלות נמוכות רק במעט מאלה של המדגמים המהודקים.
- ה. מבחינה כלכלית עדיף הידוק באנרגיה נמוכה או ללא השקעת אנרגיה על פני השקעת אנרגיה והידוק - זאת אם כל שרוצים הוא להבטיח כי לא תהיה תפיחה. אין להסיק מכך מסקנות ביחס לחוזק התערובות, כי כנראה כושר האיטום לא תלוי בתכונה הפוצולנית של אפר הפחם; כלומר, יש מקום לבחינת יישום של תערובות בעלות תכולת רטיבות גבוהה המצריכות אנרגיית הידוק נמוכה. בחשבון הכלכלי יש לכלול גם עלויות של אספקת המים.

9.11.05

בתערובות של החרסיות עם סוגי אפר פחם דרום-אפריקני C-2, D-2, C-3, D-3 – תערובות שהוכנו ללא הידוק - התקבלו ערכי צפיפויות יבשות שנתו בין 1368 ק"ג/מ"ק לבין 1461 ק"ג/מ"ק. תכולות הרטיבות בעת הכנת המדגמים היו 40% עד 44%. השימוש באפר פחם באחוזים גבוהים יותר העלה מאוד את תכולת הרטיבות הנדרשת של המדגמים - על מנת שיהיו נזילים במידה סבירה. הצפיפות היבשה בתערובות של חרסית עם אפר הפחם הדרום-אפריקני, כמו גם הצפיפות היבשה של חרסית בלבד שעברה הידוק, הייתה גבוהה הרבה יותר - כפי שאפשר לראות בטבלאות 5A ו-5B המופיעות בתרשים מספר 2 בדו"ח הטכניון. להלן טבלת הצפיפויות המרביות שהתקבלו לאחר הידוק בכל התערובות:

טבלה מס' 3: צפיפויות מרביות (מתוך דו"ח הטכניון)

צפיפות מרבית, ק"ג/מ"ק		הרכב המדגם		מספר מדגם וסוג אפר הפחם והחרסית
10 הקשות	25 הקשות	אחוז חרסית	אחוז אפר פחם	
1705	1830	100	0	A חרסית 1
1695	1820	100	0	A-2 חרסית 2
1670	1790	80	20	C-2 חרסית 1 ואפר פחם דרום-אפריקני 1 ב'
1685	1770	85	15	B-2 כנ"ל
1685	1815	80	20	K חרסית 2 ואפר פחם קולומביאני

הצפיפות הנמוכה ביותר הושגה במדגם של אפר פחם דרום-אפריקני 1 א', צפיפות יבשה של 1054 ק"ג/מ"ק. במדגמים הקולומביאניים הצפיפויות ירדו מאוד ככל שעלה אחוז האפר בתערובת - צפיפות יבשה של 55 ק"ג/מ"ק במדגם שהכיל בין 20% ל-30% אפר פחם, וצפיפות יבשה של 110 ק"ג/מ"ק במדגם שהכיל בין 30% ל-40% אפר פחם. לרוב הייתה תכולת הרטיבות בהכנת המדגמים של תערובות אלה גבוהה, בין 39% ל-41%.

התוצאות שלעיל אפשרו את התכנון של בדיקות החלחול, בדיקות שהן מטרת מחקר זה.

7. מקדם מוליכות הידראולי – כללי

7.1 בדיקות שנערכו

מקדמי החדירות ההידראולית נבדקו ברוב התערובות. מאחר שנעשה שימוש במספר סוגים של אפר פחם ובשני סוגי חרסיתות, היה הכרח לבדוק את מקדמי המוליכות בכל אחת מהקבוצות. כל הבדיקות בוצעו בעומד קבוע, לפי תקן ASTM D5084. אולם יש לציין כי חלק מהבדיקות שנערכו בתחילת הניסויים - בעיקר הבדיקות של חרסית 1 ואפר פחם דרום-אפריקני 1 - בוצעו בערבוב ידני, ערבוב שאיננו רצוי בחומרים המכילים גושים (החרסית) והתגבשויות (אפר הפחם); המשך הערבוב נעשה במערבל חשמלי, ועל ידי כך הושגה אחידות רבה יותר. דבר זה משתקף בתוצאות תרשים 5A לעומת התוצאות המופיעות בתרשימים 5B, 5C ו-5D.

7.2 מקדמי מוליכות הידראולית לפי הרכב התערובת

(ראו "תעודות בדיקות בדו"ח למים" בחוברת הטכניון, נספח 2)
מספר בדיקות חדירות הידראולית בוצעו במדגמי החרסית שהובאו למעבדה. החרסית הנקיייה הודקה לצפיפות יבשה שנעה בין 1671 ק"ג/מ"ק ל-1795 ק"ג/מ"ק - צפיפות יבשה המהווה בין 92% ל-98% מהצפיפות המרבית שהושגה במעבדה ב-25 הקשות. מקדם החדירות שנמצא היה 10^{-8} ס"מ/שנייה בקירוב. הבדיקות נעשו לאחר אשפחה במים במשך שבעה ימים.

תוספת של אפר הפחם הדרום-אפריקני – כמו גם של אפר הפחם הקולומביאני - באחוזים שונים הגדילה כצפוי את מקדם החדירות. מקדם החדירות במדגמים של אפר פחם בלבד (מדגמי H) אשר הודקו לצפיפות של 97% ומעלה מהצפיפות המרבית נע בין $1.7 \cdot 10^{-7}$ מ"מ/שנייה ל- $5.1 \cdot 10^{-7}$ מ"מ/שנייה. תוצאות אלו מתאימות לטין; ואכן אפר הפחם הוא בדירוג של טין, והתוצאות מתאימות לתוצאות של בדיקות שצוינו בספרות.

ערך מרבי של $5 \cdot 10^{-9}$ מ"מ/שנייה נקבע באופן שרירותי כסף עליון מתאים, ערך אשר מעבר לו התערובת אינה יכולה לשמש ביעילות כחומר איטום לפני המטמנה. בבדיקות חלחול נמצא כי בתערובות המכילות עד ל-40% אפר פחם והשאר חרסית מקומית (תערובת מסוג E) מתקבל מקדם חדירות הקטן לרוב מהסף שלעיל. מקדם החדירות כפונקציה של הרכב התערובת במדגמים המכילים עד 40% אפר פחם מדגמי A-E, כמו גם שאר התוצאות, מוצג בטבלאות ובשרטוטים המופיעים בדו"ח הטכניון בפרק על בדיקות חדירות למים (217 עמודים). מלבד הפירוט הכללי אפשר לראות גם את השפעת הזמן על מקדם החלחול, מקדם שהוא לא אחיד ומשתנה בין מדגם למדגם. הסיבה לכך נעוצה בהפרה היחסית המתקבלת בעת הוצאת המדגמים מגליל המ.ת.ק. לגליל החלחול.

7.3 מקדמי חדירות הידראולית לפי מנת חללים או תכולת רטיבות

בטבלאות 7E-7A ובתרשימים הרלוונטיים (עמודים 24-31) מרוכזות כל בדיקות החלחול שנעשו בתערובות השונות לפי פרמטרים שונים. מקדמי החדירות מוצגים שם כפונקציה של מנת החללים או של תכולת הרטיבות (ההבדל בין מנת החללים לתכולת הרטיבות הוא זניח ואינו משמעותי ביחס להבנת התוצאות); פרמטרים אלה מוצגים גם בצורת דיאגרמות המשורטטות על סקאלה חצי לוגריתמית בתרשימים 5 ו-6 (A עד D). המדגמים שנלקחו היו מכל הסוגים – לאחר הידוק וללא הידוק - אך בעלי תכולות רטיבות מבוקרות, כך שבכל מקרה בוטל כושר התפיחה הראשוני (גם אם המדגמים נלקחו לאחר ייבוש). לפיכך הבדיקות נערכו בתכולות רטיבות די גבוהות, ולכן הבדלי הצפיפות בין מדגמים לאחר הידוק לבין מדגמים ללא הידוק היו קטנים.

התרשימים 5A, 6A ו-7A מראים פיזור רב של מקדמי החדירות, כמו גם פיזור רב של מנות החללים ותכולות הרטיבות. כפי שהוסבר לעיל בסעיף 7.1, אלה היו התערובות הראשונות שנעשה בהן ערבוב ידני (ערבוב זה אינו מספק בשום אופן).

ביחס למדגמי החרסית הנקייה (מסוג 1) המוצגים בתרשימים 5, 6, ו-7 (A, B) ו-C ניתן לראות כי הערכים שהתקבלו ב-12 מבדיקות החלחול היו נמוכים מ- $5 \cdot 10^{-9}$ מ"שנייה, ואילו הערכים שהתקבלו ב-19 מהבדיקות היו גבוהים יותר - חלקם גבוה כמעט בשני סדרי גודל ($4 \cdot 10^{-7}$), וזאת על אף שכל הבדיקות נערכו בהידוק. כאמור, יש להתייחס לתוצאות אלו בזהירות מסוימת; בבדיקות שנערכו באותה החרסית, אך כשהיא מעורבת על ידי מערבול חשמלי באפר פחם דרום-אפריקני 1 ב' (ראו תרשים B), נתקבל בעקביות מקדם חדירות בעל ערך הנמוך מ- $5 \cdot 10^{-9}$ מ"שנייה (רק בבדיקה אחת התקבל ערך של 10^{-8} מ"שנייה). תוצאות אלו הושגו בתערובות שונות המכילות אפר פחם דרום-אפריקני משני סוגים (1 ב' ו-2), או בתערובות המכילות אפר פחם קולומביאני – לאחר הידוק וללא הידוק (ראה ציון "שפיכה" בדיאגרמות).

יש לשים לב לכך שהוצאת המדגמים מהגלילים לבדיקות חלחול גורמת תמיד להגדלת הערך של מקדמי החלחול, ולכן הערך $5 \cdot 10^{-9}$ מ"שנייה שנקבע כ"עובר" איננו שרירותי לגמרי. המקדם ההידראולי האמתי הוא כנראה נמוך יותר.

7.4 מקדמי חדירות הידראולית לפי מנת צפיפות התערובת

כפי שצוין בסעיף 7.3 לעיל, השפעת הצפיפות על מקדמי החלחול לא הייתה גבוהה במדגמים שהתפיחה נוטרלה בהם.

בתרשימים 7B, 7C ו-7D אפשר לראות כי מקדמי החלחול נמוכים בכל הצפיפויות. לעומת זאת תערובת המכילה 40% אפר פחם דרום-אפריקני 1 ב' ו-2,

9.11.05

כמו גם תערובת המכילה אפר קולומביאני, מגדילה את ערכם של מקדמי החלחול המתקבלים מעבר לגבול שנקבע - $5 \cdot 10^{-9}$ מ"מ/שנייה; גם תערובת המכילה 30% אפר פחם היא גבולית. כל הבדיקות שנערכו בתערובות המכילות 25% אפר פחם ומטה (אפר פחם מכל הסוגים, לרבות אפר הפחם הקולומביאני) הראו תוצאות טובות מבחינת החלחול.

8. חוזק תערובות

מטרת המחקר לא התמקדה בחוזק התערובות; בכל זאת הוחלט תוך כדי התקדמות העבודה וקבלת תוצאות שיעורי ההידוק לבצע בדיקות חוזק במערכת C.B.R. (מ.ת.ק.), בדיקות המשמשות מזה שנים רבות להערכת חוזק שכבות בכבישים ובתשתית. הבדיקה מהווה חלק אינטגרלי משיטות התכנון הקיימות בארץ. בדיקה זו אינה יכולה לשמש תחליף לבדיקות חוזק מרחבי (Triaxial), בדיקות הבוחנות את הגזירות הדרושות לתכנון יציבות מדרונות וסוללות; אולם עקב זמינותה של הבדיקה (בדיקות ההידוק נערכו בגלילי מ.ת.ק.), תוצאותיה מהוות מדד ליכולת נשיאת עומסים על ידי התערובות.

נערכו בדיקות על תערובות שהוכנו ללא הידוק לפי הפירוט הבא:

א. חרסית מסוג 2 + אפר פחם דרום-אפריקני מסוג 2

ב. חרסית מסוג 2 + אפר פחם קולומביאני.

התערובות עברו אשפחה באוויר לח ובמים לפני בדיקתן. בטבלאות 6A ו-6B המופיעות בדו"ח הטכניון בפרק "ריכוז בדיקות CBR" מפורטות תוצאות הבדיקות - יחד עם הרכב התערובות, הצפיפות ותכולת הרטיבות של המדגמים. התוצאות מראות על הבדלי חוזק ניכרים בין החומרים השונים. בתערובות שהכילו את אפר הפחם הדרום-אפריקני התקבלו ערכים הקטנים לרוב מ-1%, כך שלמעשה חוזק תערובת זו הוא אפסי. בתערובות שהכילו אפר פחם קולומביאני התקבלו ערכים של 20%-50%; אלה הם ערכים גבוהים, והמשמעות היא שהתערובת יכולה לשאת בנקל עומסי תנועת מכוניות ומשאיות. בתרשים מספר 4 אפשר לראות כי החוזק לא עולה עם הצפיפות בתערובות המכילות אפר פחם דרום-אפריקני, אך הוא משתפר מאוד עם עליית הצפיפות בתערובת המכילה אפר פחם קולומביאני.

הבדיקות בוצעו בתכולות רטיבות שונות כמפורט בטבלה שלהלן:

תחום תכולות רטיבות (באחוזים)	הרכב התערובת
39-42	חרסית 2 + אפר פחם דרום-אפריקני
33-37	חרסית 2 + אפר פחם קולומביאני

ייתכן שגם לתכולת הרטיבות של המדגמים הייתה השפעה על החוזק, אך דבר זה לא נבדק.

9.11.05

למעשה לא רצוי להסיק מסקנות מרחיקות לכת ביחס להבדלי החוזק בין סוגי האפר על סמך הבדיקות המעטות שנעשו. ייתכן כי השפעת ההרכב הכימי של סוגי האפר השונים על חוזק התערובות היא גדולה.

ניתוח נוסף של תוצאות בדיקות המ.ת.ק. במדגמי החרסית והאפר הקולומביאני מלמד על מגמה של ירידת החוזק עם העלייה בתכולת הרטיבות ועם הירידה בצפיפות היבשה של המדגם.

9. ביצוע באתר

את תוצאות המעבדה יש לאמת באתר, אך תחילה יהיה צורך לתכנן את הביצוע.

השמת העבודה באתר הנה משימה שיש לתת לה תשומת לב רבה. על הביצוע להיעשות רק לאחר שיישקלו היטב המאפיינים שלהלן:

- א. איך לפורר את החרסית ובאילו תכולות רטיבות
- ב. כני"ל ביחס לאפר הפחם
- ג. כיצד לערבב את שני החומרים ובאילו תכולות רטיבות
- ד. מה הם מקדמי המוליכות ההידראולית באתר בשיטות ערבוב שונות
- ה. כיצד לבצע את התאמות ערבוב החומרים לגודל האתר ולאספקת המים וכיצד לתכנן את פיזור השכבות
- ו. כיצד לתכנן מחדש את עובי השכבות הרצוי לפי מקדמי החדירות ההידראוליים שיתקבלו באתר
- ז. בחינה כלכלית של הביצוע בשיטות ההשמה השונות, כמו למשל עירוב החומרים ללא הידוק (בשפיכה) – עירוב המצריך כמויות מים גדולות יותר.

לא כל הסעיפים שלעיל נובעים מהבדיקות אשר נעשו במעבדה, אך יש לתת עליהם את הדעת על מנת שהעבודה באתר תוכתר בהצלחה ובעלויות נמוכות.

10. סיכום

מטרת המחקר הנה איטום פני מטמנת חיריה באמצעות חרסית פלסטית, וזאת לאחר שיפור תכונות התפיחה וההתכווצות שלה על ידי ערבובה עם אפר פחם מרחף. בדיקות מעבדתיות לימדו כי קיימת אפשרות לערבב אפר פחם עם חרסית, וזאת תוך כדי שמירה טובה על תכונות האיטום של החרסית (חומר שהוא בעל מוליכות הידראולית נמוכה) לצד נטרול פוטנציאל הסדיקה שלה.

הניסיון המקצועי בארץ ובחו"ל של איטום בחרסית המעורבת באפר פחם הוא מוגבל. ניסיון זה מבוסס בעיקר על עבודה קודמת שנעשתה בהנחיית משרדנו, עבודה שעסקה באיטום מאצרות באמצעות ערבוב שני החומרים שלעיל.

9.11.05

החרסית שנבחרה לביצוע הבדיקות היא חרסית מקומית שנלקחה מאתר הסמוך לחיריה, וזאת בהיותה זמינה. נטילת המדגמים בוצעה בשני מועדים ולא מאותו מקום במדויק; כלומר למעשה נעשה שימוש בשתי חרסיות בעלות תכונות שונות זו מזו, אך שתיהן מייצגות את החרסית הנמצאת ליד אתר חיריה. תכנית הבדיקות כללה מערכות ניסוי רבות, וזאת גם בגלל העובדה שמדגמי אפר הפחם הוחלפו באמצע העבודה. לפיכך נבחנו שלושה סוגי אפר פחם ממקור דרום-אפריקני וסוג אחד של אפר פחם ממקור קולומביאני (וכאמור, שני סוגים של חרסית). החרסיות ששימשו לבדיקות נבדלות זו מזו בעיקר בגבולות הסמך (אך שתיהן חרסיות רזות) ובתכולת הדקים. במחקר זה נעשה ניסיון לבחון את התנהגותה של חרסית המעורבת באפר פחם גם לאחר שהתערובת עברה מחזורי ייבוש והרטבה. בבדיקות נעו אחוזי אפר הפחם בתערובת בין 0% ל-100%. תערובות שלא ניכרה בהן תפיחה והתכווצות נבדקו לקביעת מקדם מוליכות הידראולי. הבדיקות נערכו לאחר אשפת המדגמים - חלקם עברו הידוק וחלקם נבחנו ללא הידוק.

הממצאים מלמדים כי החרסיות רזות ומוגדרות כ-CL לפי שיטת המיון האחידה. כמות החומר הדק העוברת דרך נפה מספר 200 היא כ-52% עד 60% מהחומר. למרות היות החרסיות רזות וחוליות למדי נמצא כי יש להן כושר תפיחה והתכווצות ניכרים - בעיקר לאחר הידוק. ההרכב הכימי של האפר שונה למדי בין מדגם למדגם; אולם נראה כי למרות ההבדלים הכימיים הקיימים בתוך כל קבוצה, הרי שבחלק גדול מהבדיקות מלמדות התוצאות כי אין שוני בערכי מקדמי האיטום (אם כי יש הבדל רב ביותר בתכונות החוזק).

דומה כי הבדיקות מוכיחות שהוספת עד 40 אחוזי אפר פחם אינה משנה כמעט את גבול הנזילות. לעומת זאת הוספת האפר פועלת בבירור להגדלת גבול הפלסטיות, כלומר היא מקטינה את אינדקס הפלסטיות בצורה ניכרת. לשינוי זה יש כנראה השפעה מכרעת על תכונות התפיחה וההתכווצות. ניתן להיווכח כי בתערובות בעלת תכולת אפר העולה על 60%, התערובת אינה פלסטית כלל. מהשוואה בין אפר פחם דרום-אפריקני לבין אפר פחם קולומביאני עולה כי הוספת האפר הקולומביאני גורמת לקבלת תערובות בעלות פלסטיות נמוכה יותר (מוסיפים אותו לאותה החרסית, באחוזי אפר פחם זהים לאלה שהוספו מאפר הפחם הדרום-אפריקני). העובדה נעוצה בהבדלים הקיימים בהרכב הכימי של שני סוגי האפר.

בבדיקת הצפיפות-רטיבות הוברר כי בתכולות רטיבות גבוהות ההבדל בצפיפויות שניתן להגיע אליהן בשלוש דרגות האנרגיה אינו רב, או איננו קיים כלל. על כן אין משמעות מעשית להשקעת אנרגיה גבוהה בהידוק, מכיוון שמתקבלת אותה הצפיפות גם בדרגת אנרגיה נמוכה. הרטיבות האופטימלית הגורמת לצפיפות מרבית של התערובות עולה ככל שאחוז האפר עולה - מ-14% בחרסית בלבד עד ל-46% באפר בלבד. הצפיפות המרבית בערכה המוחלט קטנה כמובן עם עליית אחוז האפר בתערובת, וזאת מאחר שהמשקל היחסי של אפר הפחם נמוך הרבה יותר מזה של החרסית - 2.36 לעומת 2.7.

9.11.05

מתוצאות הבדיקה ניתן גם להסיק כי אפר הפחם משפיע באופן פעיל על יכולת התפיחה הראשונית של החרסית; ככל שאחוז האפר בתערובת עולה, כך קטנה התפיחה. נתון חשוב נוסף המשפיע על התפיחה הוא גורם הזמן. בתערובות האפר והחרסית נמצא כי לא רק ששיעור התפיחה קטן, אלא שהתפיחה נפסקת לחלוטין לאחר זמן קצר; משך זמן זה הוא למעשה קצר יותר מאשר זמן העבודה והיישום באתר, כלומר התפיחה נפסקת עוד בטרם הסתיימו העבודות באתר. הוספת 20% ומעלה של אפר פחם דרום-אפריקני או קולומביאני איפסה את התפיחה בכל האנרגיות ובכל תכולות הרטיבות שנבדקו.

הניסויים אכן הוכיחו כי ניתן להגיע לתערובות ללא תפיחה כלל וכלל, ותוצאה זו נותרת קבועה (Irreversible) גם לאחר ייבוש בטמפרטורה של 50°C (בדומה לקיץ ישראלי).

תוספת אפר הפחם באחוזים שונים הגדילה כצפוי את מקדם החדירות. במדגמים של אפר פחם בלבד אשר הודקו לצפיפות של 97% ומעלה מהצפיפות המרבית, ערכו של מקדם החדירות נע בין $1.7 \cdot 10^{-7}$ מ"מ/שנייה ל- $5.1 \cdot 10^{-7}$ מ"מ/שנייה.

בבדיקות חלחול נמצא כי בתערובות המכילות 20%–35% אפר פחם והשאר חרסית מקומית, לרוב מתקבל ערך הקטן מהסף של $5 \cdot 10^{-9}$ מ"מ/שני שנקבע כמדד למקדם חדירות "עובר".

בתערובת שהכילה 40% אפר פחם דרום-אפריקני מהסוגים 1 ב' ו-2, כמו גם בתערובת שהכילה אפר פחם קולומביאני, ערך מקדמי החלחול היה מעל לגבול שנקבע ($5 \cdot 10^{-7}$ ס"מ/שנייה); גם בתערובת שהכילה 35% אפר פחם התקבל ערך גבולי. כל הבדיקות שנערכו בתערובות המכילות 25% ומטה של אפר פחם משלושת הסוגים הראו תוצאות טובות מבחינת החלחול, אך לא תמיד הן היו טובות מבחינת התפיחה. לא נמצאו הבדלים מהותיים במקדמי החלחול בין ארבעת סוגי אפר הפחם, וזאת למרות השוני בהרכבם הכימי.

כתוצאה מהניסויים ניתן לקבוע בצורה החלטית מה הם הגבולות להשגת התוצאות הרצויות מבחינת התפיחה וההתכווצות, ובעקבות זאת ניתן להגיע לערכי חלחול (או איטום) רצויים - $1 \cdot 10^{-9}$ מ"מ/שנייה, או ערכים קרובים לערך זה (הוצע לקבל מקדמים עד $5 \cdot 10^{-9}$ מ"מ/שנייה, וזאת בהתחשב בכך שהוצאת המדגמים לבדיקות גורמת להפרת המדגמים ואתה להגדלת מקדם החלחול).

התוצאות של בדיקות החוזק מראות על הבדלים ניכרים בין החומרים השונים. בתערובות אפר הפחם הדרום-אפריקני התקבלו ערכים קטנים מאוד, לרוב קטנים מ-1% - למעשה חוזק תערובת זו הוא אפסי. בתערובות המכילות אפר פחם קולומביאני התקבלו ערכים של 20%–50%, ערכים שהם גבוהים למדי. אולם יש

9.11.05

להתייחס למסקנות אלו בספקנות עקב ביצוע הבדיקות בתכולות רטיבות שונות. מניתוח נוסף של תוצאות המ.ת.ק. במדגמי החרסית והאפר הקולומביאני מתקבלת מגמה של ירידת החוזק עם העלייה בתכולת הרטיבות, כמו גם עם הירידה בצפיפות היבשה של המדגם.

דומה כי בנושא החוזק מתגלה במלואו ההבדל הכימי בין אפר הפחם הקולומביאני לבין אפר הפחם הדרום-אפריקני (לרבות הפוצולניות השונה של החומרים הללו). באפר הפחם הקולומביאני נראית עליית חוזק משמעותית עם עליית הצפיפות (תוספת הידוק).

אינג' אילן בירנבאום

אינג' שמואל גפן

רשימת מקורות

- B.G. Palmer, T.B. Edil and C.H. Benson, *Journal of Hazardous Materials* 76 (2000), pp. 193-216.
- "Coal Fly Ash", *User Guideline: Stabilized Base*, U.S. Department of Transportation/Federal Highway Administration.
- Donald H. Gray and Robbin B. Sotir, *Practical Guide for Erosion Control* (1996).
- יונה יעוץ וניהול הנדסי בע"מ, "הערכה מבנית של סוללות אפר פחם בכביש 57" (הוגש למע"צ מחוז תל-אביב), 2000.
- "Fly Ash for Soil Improvement", Kevan D. Sharp (ed.), *Geotechnical Special Publication* 36 (1993).
- שמואל גפן - הנדסת קרקע בע"מ, "אשדוד מסוף תזקיקים: איטום מאצרות באמצעות אפר פחם" (הוגש לבז"א), מאי 2003.
- ר. קרן, א. מצגר, מ. בן חור, "בחינת יכולת החידור של אפר פחם מרחף בסוללות ג'סר א-זרקא" (הוגש למנהלת אפר הפחם), אוקטובר 2000.
- A.E. Kehew, *Geology for Engineers and Environmental Scientists*, 1995.
- E. Cocka, "Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127, 7(2001).