

אפיון תערובות בטון המכילות אפר פחם כתלות במקור האפר

סקר מספר 4

ממצאים ומסקנות

בסקר זה נבדקו התכונות של תערובת בטון אופיינית עם אפר פחם (המשווקת בשוק הבנייה) כאשר מקור האפר הינו מחמישה מקורות שונים.

הרכב תערובת הבטון התבסס על דרישות התקן ת.י. 118 (2008) גיליון תיקון 4 לדרגת חשיפה 5 כאשר כמות הצמנט הינה הכמות המינימלית המותרת ויחס מים צמנט אינו עולה על הנדרש. תערובת זו הוגדרה כ"תערובת תקנית".

בנוסף נבדקו התכונות של תערובת בטון אופיינית עם אפר פחם מאותם חמישה מקורות אפר שונים. אולם על פי עקרון "התפקוד השקיל" כאשר המקדם ההידראולי של אפר הפחם נקבע כ- $K=0.4$ וכמות אפר הפחם שמחליפה צמנט לא עולה על 33% מכמות הצמנט האפקטיבית בתערובת. תערובת זו הוגדרה כ- "תערובת תפקוד שקיל".

תערובות אלו נבדקו מול תערובות ייחוס (רפרנס) כאשר בסדרה הראשונה הרכב תערובת הייחוס הינו ללא אפר פחם, והצמנט הוא CEM II AM S-L-V שהינו זהה לצמנט שבתערובות הנבדקות ואילו בסדרה השנייה תערובת הייחוס הינה ללא אפר פחם והצמנט הינו CEM I כנדרש בתקן.

התכונות שנבדקו הן: (1) חוזק הלחיצה ב- 48 שעות, 7 ימים, 28 יום

(2) חדירות לכלורידים

(3) תכולת האוויר

(4) אובדן סומך

הממצאים

תערובת שבה אפר הפחם משמש כחליף לחול בלבד

✓ התפתחות חוזק הלחיצה

בכל התערובות המכילות אפר פחם (100 ק"ג למ"ק) מהמקורות השונים התפתחות חוזק הלחיצה הייתה זהה פחות או יותר למעט התערובת שהכילה אפר פחם ממקור בשם La Loma מקולומביה. חוזק הלחיצה בתום 28 יום היה גבוה משמעותית משאר המקורות למרות שבשני המועדים הקודמים הוא היה בתחום חוזקי הלחיצה של שאר המקורות.

תחום חוזק הלחיצה ב 48 שעות נע בין 28.5-33.5 מגפ"ס

תחום חוזק הלחיצה ב 7 ימים נע בין 43.0-46.0 מגפ"ס

תחום חוזק הלחיצה ב 28 יום נע בין 66.5-68.5 מגפ"ס

חוזק הלחיצה ב 28 יום בתערובת הבטון ממקור La Loma הגיע ל 76.0 מגפ"ס

לעומת זאת תוצאות חוזק הלחיצה של תערובת הייחוס שהייתה ללא אפר פחם היו

בתום 48 שעות 28.0 מגפ"ס (ברף התחתון של תוצאות חוזק הבטון עם אפר פחם).

בתום 7 ימים 44.0 מגפ"ס (ברף התחתון של תוצאות חוזק הבטון עם אפר פחם).

בתום 28 יום 55.0 מגפ"ס (נמוכה בכ- 20% מתוצאות חוזק הבטון עם אפר פחם).

✓ חדירות לכלורידים

החדירות לכלורידים בשלוש תערובות בטון עם אפר פחם משלושה מקורות שונים: La Loma מקולומביה (1258 קולומב), KLP ו-Zibulo מדרום אפריקה, הייתה בתחום שבין 1258-1390 קולומב ואילו בשתי תערובות הבטון האחרות עם אפר פחם, מ-Newlands אוסטרליה ו-SKH רוסיה, הייתה החדירות גבוהה יותר: 1926 קולומב ו-1646 קולומב, בהתאמה.

לעומת זאת תוצאת החדירות לכלורידים של תערובת הייחוס שהייתה עם צמנט CEM II וללא אפר פחם הייתה 1390 קולומב. (גבוהה משתי תערובות עם שני מקורות אפר, זהה לאחת מהן ונמוכה משתי האחרות).

✓ תכולת אוויר

תכולת האוויר של התערובות עם אפר הפחם נעה בין 2.0% ל-3.2%. ככל שהתערובת דרשה כמות גבוהה יותר של המוסף הקרבוקסילי כדי להגיע לסומך ההתחלתי שנקבע הייתה תכולת האוויר גבוהה יותר (התערובת עם אפר הפחם מ-La Loma "דרשה" 4.05 ק"ג למ"ק של המוסף הקרבוקסילי ותכולת האוויר הייתה 3.2% אולם זה לא מנע את היותה התערובת העמידה ביותר לחדירות לכלורידים).

תערובת הייחוס עם צמנט CEM II וללא אפר פחם הייתה 1.8%. תערובת זו "דרשה" את כמות המוסף הקרבוקסילי הנמוכה ביותר (2.54 ק"ג למ"ק) כדי להגיע לסומך התחלתי של 5" אולם התערובת לא הייתה העמידה ביותר לחדירות לכלורידים.

✓ אובדן הסומך

על פי תכנית הסקר הסומך ההתחלתי של כל התערובות הן תערובת הייחוס והן התערובות עם אפר הפחם אמור היה להיות בין 5"-6" (130-160 מ"מ) וכך היה.

אובדן הסומך היה מהיר בכל התערובות ואחרי 60 דקות הגיע הסומך ל"1.0"-1.5" (25-30 מ"מ) מה שמעיד כנראה על כמות "מעכב" (retarder) נמוכה בהרכב המוסף הקרבוקסילי.

🔧 תערובת "תפקוד שקיל" (אפר הפחם מחליף חלקית גם את הצמנט וגם את החול)

✓ התפתחות חוזק הלחיצה

בתערובת "התפקוד השקיל" 65 ק"ג אפר פחם למ"ק החליפו 25 ק"ג צמנט והנותר 35 ק"ג החליפו חול. התפתחות החוזק של תערובת זו עם אפר פחם מחמשת המקורות הייתה זהה פחות או יותר כדלקמן:

תחום חוזק הלחיצה כעבור 48 שעות נע בין 24-28 מגפ"ס

תחום חוזק הלחיצה כעבור 7 ימים נע בין 39-42 מגפ"ס

תחום חוזק הלחיצה כעבור 28 יום נע בין 58-62 מגפ"ס

לעומת זאת, חוזק הלחיצה של תערובת הייחוס עם צמנט CEM I וללא אפר פחם הייתה גבוהה בכ- 15% מהתערובות עם CEM II מחמשת מקורות האפר.

חוזק הלחיצה כעבור 48 שעות- 29 מגפ"ס, כעבור 7 ימים- 46.5 מגפ"ס, כעבור 28 יום- 65.5 מגפ"ס.

✓ חדירות לכלורידים

החדירות לכלורידים בתערובות עם אפר פחם מארבעה מקורות נעה בין 2213-2751 קולומב, כאשר התערובת עם מקור אפר הפחם החמישי La Loma התבלטה לטובה- 1957 קולומב.

לעומת זאת, החדירות לכלורידים של תערובת הייחוס עם צמנט CEM I הייתה הגבוהה ביותר בצורה משמעותית- 3052 קולומב בכ- 57% מהתערובת עם אפר הפחם מהמקור La Loma, מה שמעורר את השאלה אם תערובת זו מתאימה להיות תערובת ייחוס.

✓ תכולת אוויר

תכולת האוויר בכל התערובות כולל תערובת הייחוס הייתה בין 1.8%-3.1%. במקרה הנדון התערובת עם מקור האפר מ- La Loma הייתה עם תכולת האוויר הנמוכה ביותר- 1.8%, וחדירות לכלורידים הנמוכה ביותר.

✓ אובדן הסומך

על פי תכנית הסקר הסומך ההתחלתי של כל התערובות הן תערובת הייחוס והן התערובות עם אפר הפחם אמור היה להיות בין 5"-6" (130-160 מ"מ) וכך היה.

אובדן הסומך היה מהיר בכל התערובות והסומך הגיע אחרי 60 דקות ל- 1.0"-1.5" (25-30 מ"מ) מה שמעיד כנראה על כמות "מעכב" (retarder) נמוכה בהרכב המוסף. הקרבוסיילי.

🚧 מסקנות

- ✓ חוזק הלחיצה של בטון "התערובת התקנית" בתום 28 יום היה גבוה בכ- 20% מחוזק הלחיצה של תערובת הייחוס (ב- 48 שעות ו- 7 ימים היה פחות או יותר זהה) - החלפת אפר פחם בחול מעלה את חוזק הלחיצה של הבטון; אין השפעה למקור אפר הפחם מארבעה מקורות מתוך החמישה.
- ✓ החדירות לכלורידים בתערובת התקנית הייתה נמוכה יותר או שווה לחדירות לכלורידים של תערובת הייחוס בכל חמשת המקורות- החלפת אפר פחם בחול מעלה את עמידות הבטון לחדירות הכלורידים
- ✓ יש לבחון מה הסיבה (כימית, מינרלוגית) שהתערובת עם אפר הפחם מהמקור La Loma נתנה משמעותית חוזק בטון גבוהה משאר התערובות וחדירות לכלורידים משמעותית נמוכה משאר התערובות.
- ✓ חוזק הלחיצה של תערובת ה"בטון השקיל" היה נמוך יותר מחוזק הלחיצה של תערובת הייחוס עם צמנט CEM I בכ- 15% (כנראה שהמקדם $K=0.4$ הינו גבוה מדי).
- ✓ לעומת זאת החדירות לכלורידים בכל התערובות הייתה נמוכה יותר מהחדירות לכלורידים של תערובת הייחוס עם CEM I - אפר פחם תורם להקטנת החדירות לכלורידים בתערובות הבטון. גם כאן "כיכבה" תערובת הבטון עם אפר הפחם מהמקור La Loma.
- ✓ מאחר והחדירות לכלורידים של תערובת הייחוס הייתה גבוהה משמעותית משאר התוצאות מתעוררת השאלה אם תערובת זו מתאימה לשמש כתערובת ייחוס.

בברכה

גדעון אירוס

ג.אירוס יועצים בע"מ