

חומרים מרוכבים – Composite Materials

מהו חו"מ, סוגים, תכנון, יישומים

ד"ר דורון שלו

דורון שלו הנדסה בע"מ

Doron Shalev eng. LTD.



תוכן עניינים

- מהו חומר מרוכב
- סווג – מהמיקרו למקרו
- יישומים בהנדסה אזרחית
- ניסויים – כפיפה, גזירה
- חיזוק לרעידות אדמה

מהו חומר מרוכב (Composite Material)

- חומר הומוגני הנוצר בתהליך הרכבה סינטטית של שניים או יותר חומרים.
 - חומר מילוי משוריין בתוך מטריצת מליטה,
 - לקבלת תכונות מכאניות רצוניות מוכתבות על פי צורך שימוש הנדסי.
- החומר החדש הינו:
 - חזק יותר,
 - קל יותר
 - עמיד יותר
- משמש תחליף לחומרים איזוטרופיים שכיחים בשימוש כגון מתכות, בטון וכד'.

מאז ומתמיד – שילוב חומרים לקבלת מוצר משופר

- בתנ"ך:

"...לתת תבן לעם ללבון הלבנים כתמול שלשום הם ילכו
וקוששו להם תבן...". שמות, ה'.

- יום יום בהנדסה אזרחית:

- מוטות פלדה בתוך בטון - בטון מזוין
- כבלי פלדה דרוכים בחוזק גבוה בתוך בטון - בטון דרוך

עיקרון בניית החומר החדש תוך שילוב חומרי גלם

- שימוש בסיבים בעלי חוזק גדול במיוחד בכיוון הצירי.
- החוזק בכיוון ניצב לציר הסיב – נמוך מאד.
- הסיבים בקוטר של כ 125 מיקרון (שמינית מילימטר)
- מניחים את הסיבים אחד ליד השני, מוטבלים בשרף אפוקסי לקבלת "דף" (שכבה) בעובי 125 מיקרון בעל חוזק רב בכיוון אורך הסיבים.
- לאחר מכן ניתן להדביק שכבות אחת על גבי השנייה בשתי תצורות:
 - כולן באותו כיוון
 - בכיוונים שונים
- מתקבל "חומר חדש", אנאיזוטרופי – כלומר התכונות של החומר שונות לכל כיוון!! (לא כמו פלדה, בטון, אלומיניום וכד').

עיקרון בניית החומר החדש (המשך)

● מושגי היסוד בהגדרת בניית החומר המרוכב:

- שכבה בודדת. כל הסיבים באותו כיוון. Layer, ply
- פס של חומר בעל כיוון אחיד של סיבים נקרא – uni-directional tape
- הדבקה של שכבות בכיוונים ניצבים נקראת - bi-directional ply
- ניתן לייצר אריגה של סיבים בשתי וערב ממש כמו בד טקסטיל - fabric
- לוח (פלטה) אשר בה מודבקות מספר שכבות (ללא קשר לכיווני הסיבים) נקראת - laminate

עיקרון בניית החומר החדש (המשך)

● המוטיבציה לשימוש בחומרים מרוכבים ולסידור שכבות בכיוונים שונים:

- ניתן לארגן את כיווני הסיבים (אשר מספקים חוזק מוגבר בכיוונים) לפי התפקוד הצפוי של האלמנט!
- מבצעים בכך אלמנט אופטימלי לשימוש הייעודי.
- מתקבל אלמנט במשקל הקל ביותר האפשרי. הן מפני המשקל הקל של מרכיבי החומר המרוכב והן מפני אופטימליות החוזק.

עיקרון בניית החומר החדש (המשך)

- מאחר והחומר המרוכב הינו אנאיזוטרופי ומאחר והוא מורכב משכבות מודבקות:
 - יש צורך לחשב את התכונות המכאניות של התוצר האנאיזוטרופי.
 - כלומר יש צורך לחשב את E_{11} , E_{22} , G_{12} , ν_{12} (לא כמו שני הקבועים של חומר איזוטרופי – E , G).
 - קריטריון הכשל אינו "מאמץ מותר" מאחר והקריטריון אמור להיות תלוי בכל הכיוונים.
- קריטריון הכשל הוא פולינום לא לינארי תלוי כיוונים מאחר ותכונות החומר המרוכב שונות לכל כיוון!!

קריטריון כשל חומרים מרוכבים. מודל תלת ממדי.

3D failure criterion:

$$i, j = 1..6 \quad F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1$$

In 2D :

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1$$

Where:

$$F_1 X_c + F_{11} X_c^2 = 1 \quad F_1 X_t + F_{11} X_t^2 = 1$$

$$\Rightarrow F_1 = 1/X_t \quad F_{11} = -1/(X_t X_c) \quad F_1 = 1/Y_t \quad F_{11} = -1/(Y_t Y_c)$$

$$F_{66} = 1/S^2$$

$$F_6 = 0$$

Also:

$$F_{12} = 1/(2 \sigma^2) [1 - (1/X_t + 1/X_c + 1/Y_t + 1/Y_c) \sigma + (1/X_t X_c + 1/Y_t Y_c) \sigma^2]$$

$$F_{12} = -0.5$$

$$\text{Bond shear} = 2.5 \text{ Kg/mm}^2$$

התפתחות שימוש בחומרים:

- חומרים איזוטרופיים - תכונות החומר שוות לכל כיוון
- חומרים מרוכבים - "תפירת" תכונות על פי תפקוד צפוי
- חומרים חכמים - שינוי תכונות החומר/המבנה לפי תפקוד בזמן אמת

הרעיון המרכזי - סיכום

- סיבים בעלי חוזק גבוה בכיוון צירי משוקעים בתוך שרף מליטה על בסיס אפוקסי
- המוצר הבסיסי:
 - טייפ חד כיווני (unidirectional tape) – כל הסיבים באותו כיוון. עובי בסיסי: 0.125 מ"מ
 - בד דו-כיווני (fabric, cloth) – סיבים שזורים בשני כיוונים. עובי בסיסי: 0.25 מ"מ
- מן המוצר הבסיסי (טייפ או בד) ניתן לייצר חומר רב שכבתי מותאם לתפקוד צפוי.

התוצאה:

- חומר גלם בעל תכונות חוזק וקשיחות לפי "הזמנה".
- ההזמנה תואמת את התפקוד המיועד.
- לדוגמא:
 - ע"מ לחזק או לייצר קורה לכפיפה נשתמש בלוח בעל סיבים מונחים בעיקר בכיוון האורכי.
 - לחיזוק או לייצור של פלטה – נשתמש בבד (דו כיווני).
 - ע"מ לחזק או לייצר צינור נשתמש בבד דו כיווני תוך ליפוף שכבות בהתוויה אלכסונית לעזרת גזירה/פיתול ובנוסף בטייפ חד כיווני בכיוון אורך הצינור.

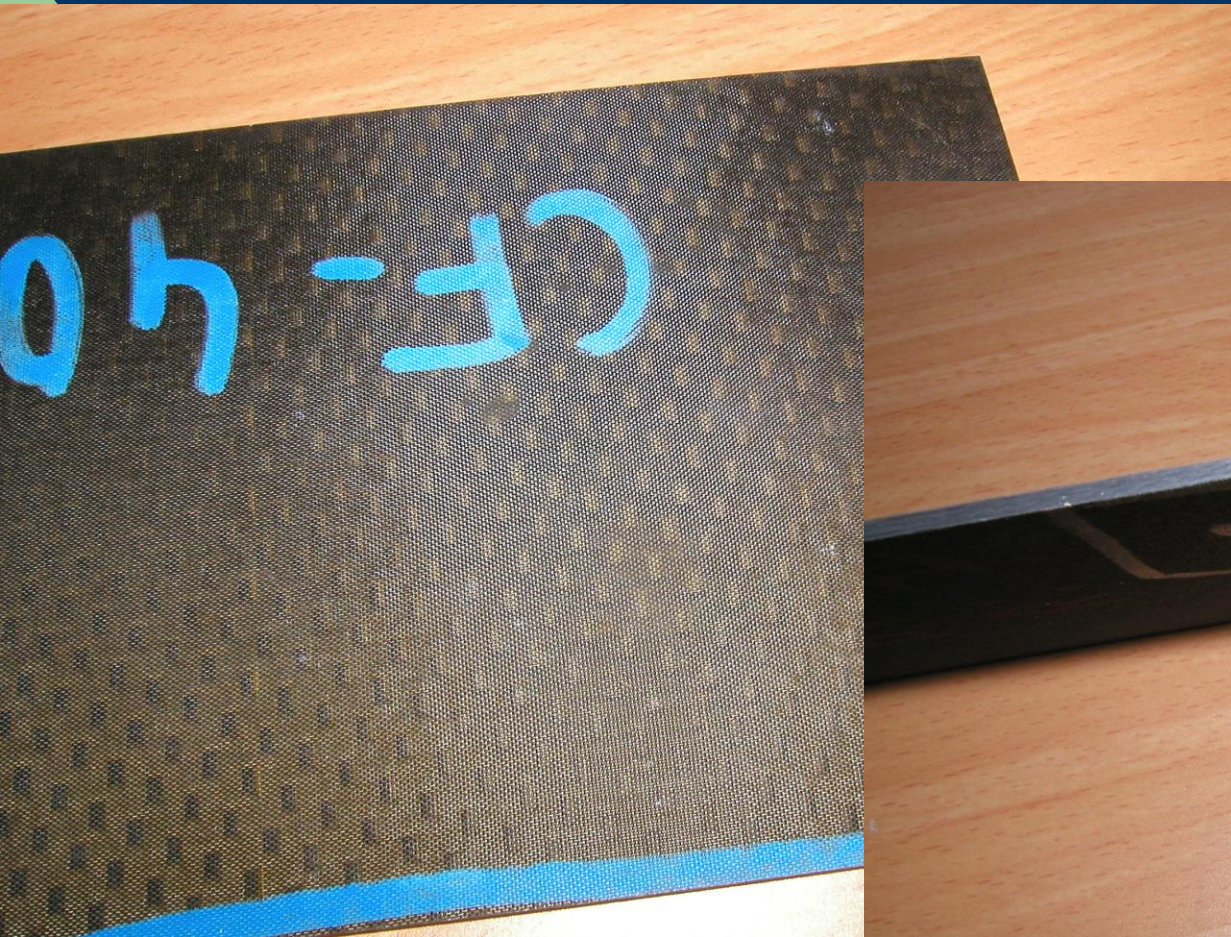
שכבה בודדת. עובי 125 מיקרון. סיבים מונחים אחד ליד השני.



להרשמות – עובי השכבה הבודדת



פלטה מורכבת ממספר שכבות רב כיווניות.



בד מחומר גלם, טרם הטבלתו בשרף אפוקסי.



שכלול ל"תגבור" תכונות

- ניתן לייצר מבנה מוקשח ע"י הגדלת מומנט אינרציה.
- שתי שכבות מופרדות ע"י חלת דבש מחומר פולימרי או מתכתי אשר אליה מודבקים מעטים משני הצדדים, עשויים מחומרים מרוכבים





ניתן לעצב אזור במבנה תוך התאמה לצרכים מקומיים – החדרת אינסרט כהכנה למחבר כלשהו



תכונות המרכיבים – סיבים ומטריצה

סיווג סיבים:

סיבים סינטטיים אורגניים

- על בסיס פולימרים **טרמופלסטיים** (ניתנים לעיצוב ושינויי צורה חוזרים תוך חימום) כגון: ניילון, פוליאסטר, פוליפרופילן
- על בסיס פולימרים **טרמוסטטיים** (לא ניתן לעיצוב מחודש) כגון: ארמיד (קוולאר)

סיבים סינטטיים אנאורגניים

- זכוכית, בורון, פחמן, אלומיניום, סיליקון

תכונות סוגי סיבים שונים (חומר אנאיזוטרופי)

חומר	צפיפות [ton/m ³]	מודול יאנג (אורכי) [MPa]	חוזק מתיחה [MPa]
polyester	1.36	13,800	1100
E-Glass	2.52	72,300	3450
Kevlar 49	1.44	124,000	2760
T300	1.72	379,000	2240
Boron	2.35	455,000	2070
ST37	7.85	210,000	180
B30	2.40	30,000	1.90

תכונות מטריצה, שרף מליטה (חומר איזוטרופי)

חומר	צפיפות [ton/m ³]	מודול יאנג [MPa]	חוזק מתיחה [MPa]
Polyester	1.12	3,450	69
Epoxi	2.63	3,450	69
B30	2.40	30,000	1.90

תכונות התוצאה – שכבה בודדת: טייפ , בד

Concret B30	Steel Fe360	CFRP AW193 Fabric	CFRP T300 Fabric	GFRP E-Glass Tape	CFRP AS4 Tape	CFRP T300 Tape	
30,000	21,000	62,200	74,000	38,600	138,000	181,000	E_{11}
30,000	21,000	6,220	74,000	8,270	8,960	10,300	E_{22}
0.30	0.3	0.04	0.05	0.26	0.30	0.28	ν_{12}
11,540	8,077	365	4,550	4,140	7,100	7,170	G_{12}
2.4	7.8	1.8	1.5	1.8	1.6	1.6	ρ
1.9	180	623	499	1,062	1,447	1,500	X_t
16	145	171	352	610	1,447	1,500	X_c
1.9	180	623	458	31	52	40	Y_t
16	145	246	352	118	206	246	Y_c
1	90	51	46	72	93	68	S

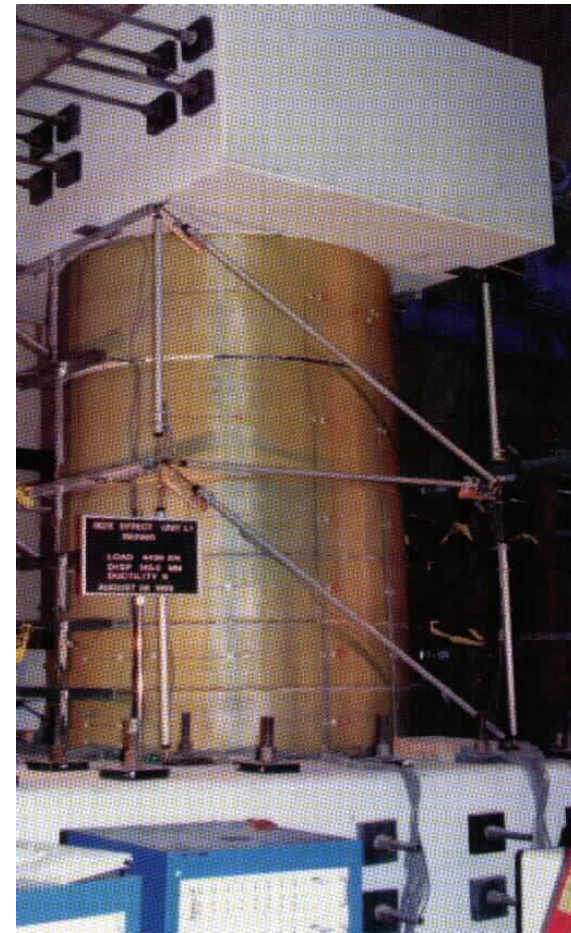
יישומים בהנדסה אזרחית:

- שימוש כאלמנטים מבניים בתכנון מכון – נדיר!
- חיזוק:
 - תיקון נזקים
 - שיפור תסבולת (להגדלת עומסים)
 - חיזוק לרעידות אדמה (כולל קירות בני)
 - ניתן לדרך מוטות
 - יריעות לחיזוק כבישים תחת שכבת אספלט

שימוש כאלמנט מבני מלכתחילה



תיקון עמודים - יריעות



עוד עמודים



בריכת מים - יריעות



תסבולת תקרה - פסים



הגדלת תסבולת גשר – במקור רכב קל, לאחר החיזוק רכב כבד



חיזוק קורות



גזירה ומומנט שלילי

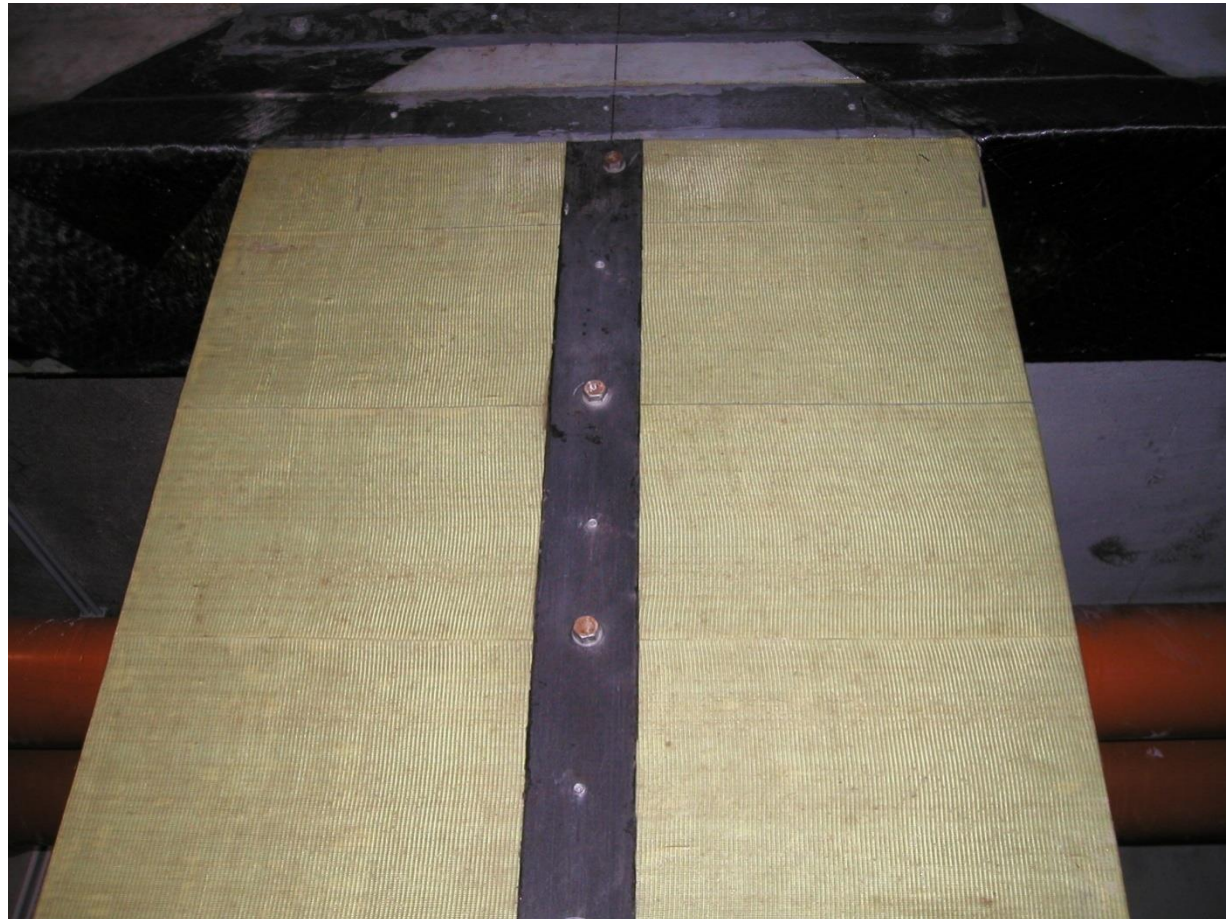




חיזוק חיצוני – קורה ועמוד



עיגון יריעות חיזוק עמודים



עיגון בקורות



הגדלת מומנט אינרציה



תכנון מבנה הנדסה אזרחית עשוי כולו חו"מ

קמפוס 2 של חב' APPLE

- ממוקם ליד ההנהלה הראשית. Cupertino, CA
- כולל מבנה המכונה "התיאטרון"
- משמש להכרזות של מוצרים חדשים
- מבנה זכוכית עגול ללא עמודים בקוטר של 45 מ' מקורה בגג חומרים מרוכבים. מיועד ל 1000 איש.
- הגג שוקל 80 טון. מורכב מ"פרוסות עוגה" באורך כ 22.5 מ'

מבט חוץ





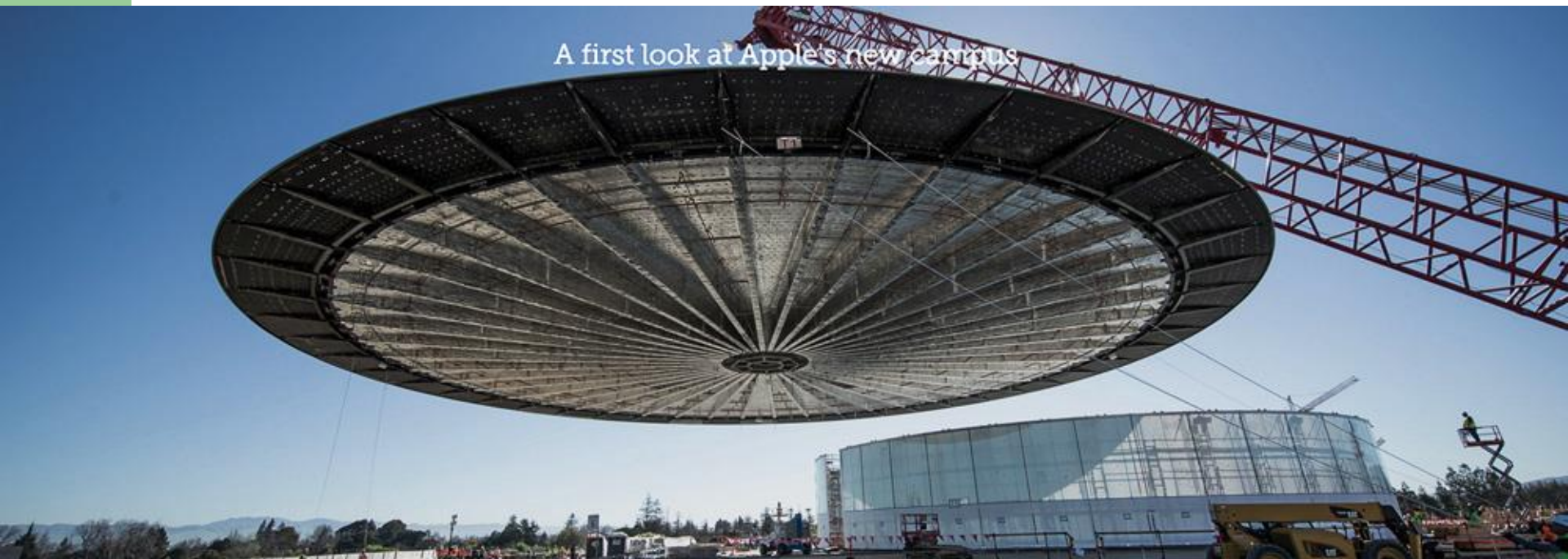
מבט חוץ



מבט פנים



התקנת הגג



סרטי הדגמה

- סרט ניסוי קורה בכפיפה
- סרט ניסוי גזירה בקורה
- סרט חיזוק קיר לבנים לר"א



תודה על תשומת הלב



