

תכנון עגני קרקע/סלע בשיטת מקדמי הבטחון

החלקיים

אינג' אליעזר שמיר

מבוא .1

עגני קרקע/סלע משמשים לייצוב מחפורות וחציבות עמוקות, גם בשטח הפתוח וגם בקרבת מבנים ומתקנים קיימים. העגנים יכולים להיות דרוכים או בלתי דרוכים, זמניים או קבועים, עשויים מוט עיגון או כבל עיגון - הכל בהתאם לתנאים ולצרכים.

תכנון העוגנים יבטיח מקדם בטחון מתאים בכל אחד משלבי הבצוע, וכן במצב הסופי, ובקביעת מקדם הבטחון הכולל, ילקחו בחשבון הגורמים הבאים:

- * מטרתו (תפקידו) של העוגן.
- * משך חיי העוגן (זמן תיפקודו).
- * תסבולת העוגן לשליפה במצב גבולי של הרס.
- * התנהגותו האלסטית של העוגן במצב גבולי של שרות.
- * חוזק החומרים ואביזרי העוגן במצב גבולי של הרס.

תכנון מבני פלדה, בטון מזוין ובטון דרוך, נעשה מזה כמה עשורים, בשיטת השבר, ultimate limit state design. תוך שימוש במערכת מקדמי בטחון חלקיים, המקנים מקדם בטחון כולל למבנה.

ההצעה החדשה לתקן האירופי EC - 7, ובעקבותיה ההצעה החדשה לת"י 940, מאמצת אף היא גישה דומה.

למרות ההשגות הרבות לגבי אימוץ גורף של שיטת מקדמי הבטחון החלקיים להנדסת הביסוס, הרי במקרה של עוגני קרקע, נראה כי אפשר, ואף נוח למדי, לאמץ שיטה זו, לפחות ככל שמדובר בתכנון העוגן עצמו.

גישה זו מאפשרת להתייחס למודל עוגן/קרקע/מבנה כאל מערכת אינטגרלית אחת, ובכך עשוייה לתרום להבנה טובה יותר של הנושא.

בהתאם לכך, תעשה הבחנה ברורה וחדה בין מצב גבולי של הרס ומצב גבולי של שרות, גם עבור שווי המשקל החצוני הכללי, וגם לכל אחד מן המרכיבים של העוגן, וכן ייקבע כושר העיגון הכולל של העגן לשליפה.

התכן יתבצע עפ"י מצב גבולי של הרס ומצב גבולי של שרות. שים לב כי מצב גבולי של הרס (שהוא למעשה מצב התכן) איננו זהה למצב ההרס האמיתי, אלא הוא מצב גבולי "וירטואלי" הנמצא בין מצב השרות לבין מצב ההרס האמיתי.

צרוף ההשפעות של כל מקדמי הבטחון החלקיים תוך התחשבות במשך חיי העוגן, יוצר את מקדם הבטחון הכולל של המערכת.

סיווג עוגנים עפ"י תיפקודם ותפיקדם

.2

מבחינים בין שתי קטגוריות עפ"י תיפקוד העוגן:

א. עוגנים שמאפשרים תזוזה מוגבלת (קטנה) של מסת הקרקע (הסלע) המעוגנת - סוג א' להלן.

ב. עוגנים שאינם מאפשרים תזוזה כלשהי של מסת הקרקע (הסלע) המעוגנת - סוג ב' להלן:

עוגנים מסוג א'

עוגנים המאפשרים תזוזה מוגבלת (קטנה) של מסת הקרקע (הסלע) המעוגנת, יהיו בדרך כלל במקרה של עיגונים לשמירה על יציבות מחפורות וחיבורות פתוחות בשיפועים חזקים או זקופים. כאן אין חשיבות אם לאחר העיגון מתרחשת תזוזה כלשהי, כל עוד היציבות הכללית נשמרת אין התמוטטות מקומית, בטיחות מערכת העיגון אינה נפגעת, מערכת העיגון אינה ניזוקה, ולא נוצר נזק עקיף לאלמנטים אחרים בשטח או לחוזק הכללי של הקרקע כתוצאה מהתזוזה. העוגנים יהיו בדרך כלל בלתי דרוכים, עשויים מוטות או כבלים, ואביזרי עיגון מתאימים.

עוגנים מסוג ב'

עוגנים המונעים תזוזה כלשהי של הקרקע (הסלע) המעוגן הם בדרך כלל המקרה של מערכות דיפון בקרבת בניינים, מתקנים ומערכות צנרת תת קרקעית הרגישים לתזוזות קרקע. בכל המקרים האלה תזוזה אופקית של הקרקע גורמת גם לשקיעה אנכית, וצרוף שתי התזוזות הנ"ל גורם לנזקים למבנים ולמערכות התת קרקעיות. תפקיד העיגון למנוע לחלוטין את התזוזה האופקית. מערכת העיגון תגרום ל"כליאה" (confinement) של הקרקע, ובכך תמנע את התזוזה והשקיעות. עוגנים מסוג זה ישמשו גם במקרה שבו רוצים להבטיח גושי סלע גדולים, אשר יציבותם מתקבלת בדרך כלל ע"י מישורי חיכוך אנכיים ואופקיים. במקרה זה העיגונים יבטיחו את קיום כוחות החיכוך הנדרשים לייצוב הגוש המועד לתזוזה. יש לזכור כי במקרה כנ"ל אפילו תזוזה קטנה של הגוש עלולה להפר את הנעילה ההדדית (interlocking) הקיימת במסלע כולו, ולגרום למצב אי יציבות.

העיוגונים האלה יכולים להיות אפקיים, אנכיים או משופעים ותפקידם לחבר את הגוש אל המסלע היציב שמאחוריו מתחתיו או בצידו. החבור מבטיח קיום כח לחיצה תמידי המבטיח פוטנציאל של התנגדות מספקת לחכוך. ככל המקרים הנ"ל העיוגונים יהיו עוגנים דרוכים בדריכה מלאה, ועשויים מוטות עיגון או כבלים, ואביזרי עיגון מתאימים.

3. סיווג עוגנים עפ"י משך תיפקודם ואורך החיים

מבחינים בשתי קטגוריות של עוגנים כדלקמן:

א. עוגנים זמניים

ב. עוגנים קבועים

עוגנים זמניים הם אלה אשר ישמשו בתפקידם כעוגנים במשך תקופה של שנתיים לכל היותר, (בין אם לאחר מכן פורקו וסולקו מהאתר, או שנשארו במקומם). כל שאר העוגנים ייחשבו כעוגנים קבועים.

4. מקדמי בטחון חלקיים לעומסי התכן

מקדמי בטחון חלקיים לעומס יקחו בחשבון את האמור להלן:

- א. אי וודאות של החישוב הסטטי בכל הנוגע להסתברות ההופעה של העומסים החיצוניים ולגודלם, לפרמטרים של הקרקע (הסלע) הקובעים את לחצי הקרקע ופילוגם.
- ב. התפקיד העיקרי של העוגן עפ"י סיווגו לפי סעיף 2 לעיל (מתיר תזוזה מוגבלת, או שאינו מתיר תזוזה כלל). הביטוי הכללי למקדם הבטחון הכללי לעומס יהיה:

$$(1) \quad \gamma_{LT} = \gamma_L \cdot \gamma_n$$

כאשר γ_L = מקדם בטחון חלקי לעומס המבטא את האמור בסעיף א' לעיל.

γ_n = מקדם התנהגות המבטח את אופן תפקוד העוגן עפ"י סעיף ב' לעיל.

מוצע כי המקדם γ_n ישתנה בתחום $1.0 < \gamma_n < 1.5$, ויקבע ע"י המתכנן עפ"י מידת החשיבות שיש ליחס (במקרה הספציפי) להבטחת אי התזוזה של מסת הקרקע/הסלע הנתמכת.

$\gamma_n = 1.0$ יהיה עבור מערכות שבהן מותרת תזוזה מוגבלת (סעיף 2 א' לעיל).

$\gamma_n = 1.5-1.25$ יהיה עבור מערכות שבהן אסורה תזוזה לחלוטין (סעיף 2 ב' לעיל).

הערך $\gamma_n = 1.5$ ישמש רק כאשר במקרה של תזוזה צפוי נזק כבד למבנים או מערכות סמוכות עקב תזוזה קלה מאוד של מערכת העיגון.

עפ"י המלצות FIP יקבעו מקדמי הבטחון החלקיים γ_L עפ"י סיווג העוגנים לפי משך תפקודם (סעיף 3 לעיל).

$\gamma_L = 1.6$ לעוגנים זמנים

$\gamma_L = 2.0$ לעוגנים קבועים

עפ"י הנ"ל עומס התכן במצב גבולי של הרס

$$(2) \quad S_d = \gamma_{LT} \cdot S$$

S = העומס האמיתי המחושב (או המופעל כעומס חצוני) על העוגן.
העוגן ידרך עד לעומס העבודה שלו.

$$(3) \quad S_w = \gamma_n \cdot S$$

לפיכך S_w הוא גם עומס התכן במצב בגבולי של שרות.

5. תכן העוגן ואביזרי העיגון למצב גבולי של הרס

העוגן כולל את מוט העיגון עצמו ואת פלטת העיגון ואביזרי העיגון.
שווי המשקל של העוגן בתכן למצב גבולי של הרס הוא:

$$(4) \quad S_d = \gamma_{LT} \cdot S \leq \frac{S_k}{\gamma_m}$$

כאן:

γ_{LT} = מקדם בטחון כללי לעומס

S = העומס האמיתי המחושב (או המופעל) על העוגן (או על כל אחד מחלקיו או על

אביזרי העיגון)

S_k = חוזק אופייני בשבר של העוגן או אביזר העיגון הרלבנטי. לפלדת דריכה יהיה

החוזק

עבור 0.1% עיבור משתייר.

S_d = עומס תכן למצב גבולי של הרס.

γ_m = מקדם בטחון חלקי של החומר. עפ"י ת"י 466 יהיה עבור פלדה $\gamma_m = 1.15$.

להבהרה נוספת, יודגש כאן כי מצב גבולי של הרס איננו מצב ההרס ממש. מצב גבולי של הרס הוא מצב תכנוני (וירטואלי) שבו מתקיימים במבנה מאמצים או כוחות תכן שגודלם שווה למאמצי

(כוחות) השבר האופיינים (הנומינליים) מחולקים במקדמי הבטחון החלקיים של החומר γ_m .

מקדם הבטחון החלקי γ_m מביא לידי ביטוי את הגורמים הבאים:

* שיטת הבדיקה (הניסוי) של החומר, שבו נקבעת תסבולת השבר האמיתית שלו S_u .

* הפיזור הסטטיסטי של הבדיקות והניסויים הנ"ל, אשר על פיו נקבע החוזק האופייני בשבר S_k .

* באיזו מידה מייצגים תנאי הבדיקה (או הניסוי), שיטת הפעלת הכוחות בניסוי ומדידת התוצאות, הציוד והמכשור, הגאומטריה של הבדיקה וכיוב'. את צורות הפעולה והתפקוד של החומר האמור במסגרת המבנה במציאות, ובסוג ההטחה הרלבנטי.

* באיזו מידה המודל החישובי (או אלגוריתם החישוב) מייצגים את הפעולה האמיתית, בפועל של הרכיב הנדון במבנה, ומצב הידע התאורטי לגבי צורת ההטחה הרלבנטית.

מקדמי הבטחון γ_m יכולים להיות מקדמים שונים עבור אותו חומר כאשר מדובר בצורות הטרחה שונות.

למשל בטון יקבל מקדמי γ_m שונים עבור הטרחות לחיצה בכפיפה, לחיצה צירית, מתיחה, וגזירה, למרות שמדובר באותו חומר.

6. מקדמי בטחון חלקיים לתסבולת שליפה במצב גבולי של הרס

תסבולת השליפה של העוגן מושפעת בעיקר מהגורמים הבאים:

* מידות גאומטריות של ה"קפסולה" (אורך/עומק, קוטר וגודל ראש העיגון התחתון (bulb)).

* מיקום ועומק של החלק המעוגן (הקבוע) של העוגן, מעבר למישורי ההחלקה, וביחס לפני השטח.

* הפרמטרים המבטאים את תכונות הקרקע (חוזק גזירה, קוהזיה, משקל מרחבי).

* הידבקות (bond) בין החלק המעגן של העוגן לבין החומר העוטף אותו.

הכוחות, הפועלים על מוט העיגון, מועברים לקרקע/לסלע הסובב אותו, לאורך הקטע המוגדר כאורך העיגון (להבדיל מהאורך החופשי). אורך העיגון ימצא בתחומי מסת הקרקע היציבה, מעבר למישורי ההחלקה, או בתחומי מסת הסלע היציב, לפי המקרה.

מנגנון העברת הכוחות הוא מנגנון חכוך/הידבקות).

לפיכך, תסבולת השליפה של העוגן תלויה באופן מוחלט גם בחומרי הדייס של העוגן, בטכניקת ההזרקה, בטיב הבצוע, ביציבות הקרקע (הסלע) בתוך קדח העיגון, במידת הסידוק, בפרוזויות, בתכונות החוזק והידבקות של חמר הדייס.

כל עוד ההידבקות בין מוט העיגון לקפסולת הדייס מובטחת, וכל עוד הקשר בין קפסולת העוגן לחומר האופף אותה, אינו נכשל, נקבעת תסבולת השליפה של העוגן עפ"י יכולתו להעביר את הכוחות אל מסת קרקע/סלע יציבה הנמצאת בעומק העוגן.

לשם פשטות ניתן להניח כי מדובר במסת קרקע בעלת צורת קונוס הפוך המשמש כגוש עיגון. הממדים של גוש זה צריכים להיות גדולים מספיק כדי לספק משקל מספיק וחוזק גזירה מספיק להתנגד לכוחות הפועלים, תוך הבטחת מקדם בטחון מתאים.

לפיכך, תסבולת השליפה של העוגן תהיה התמיכה מבין :

א. תסבולת הידבקות/חיכוך בין קפסולת העיגון לחומר האופף אותה.

ב. כשל גזירה של קונוס העיגון.

מאחר ובדרך כלל מדובר בעוגנים אנכיים או משופעים $30^\circ - 60^\circ$ ביחס לאופק, הרי מקרה א' ייצג את רוב המקרים שבהם מדובר בעוגנים בקרקע, ללא ראש עיגון תחתון (bulb).

מצד שני, כאשר מדובר בעוגנים בקרקע, עם ראש עיגון תחתון (bulb) וכן כשמדובר בעוגנים בסלע, יש לבדוק את מקרה א' ואת מקרה ב' גם יחד.

לקביעת תסבולת השליפה יש להשתמש במתודולוגיות של הנדסת קרקע, אך כדי להדגים את העיקרון נראה כאן את המקרה של מצב גבולי של הרס להידבקות/חכוך. (מקרה א' לעיל).

תסבולת ההרס (ultimate) לשליפה של קפסולת עיגון ללא ראש עיגון תחתון הוא :

$$(5) \quad P_k = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau \quad (\text{בסלע})$$

$$(6) \quad P_k = (\gamma \cdot d \cdot K \cdot \tan(\varphi + Ca) \cdot \pi \cdot D \cdot L) \quad (\text{בקרקע})$$

כאן :

$$P_k = \text{תסבולת אופיינית לשליפה}$$

$$D = \text{קוטר קפסולת העיגון}$$

$$L = \text{אורך קפסולת העיגון (אורך ההידבקות והעיגון)}$$

$$\tau = \text{חוזק אופייני להידבקות בין הקפסולה לבין הסלע העוטף אותה}$$

$$\tau = 0.3 (f_{ck})^{1/2}$$

כאשר f_{ck} הוא החוזק האופייני של בטון בלחיצה (Mpa)

$$\begin{aligned} \gamma &= \text{משקל מרחבי של הקרקע (במקרה של מצב מטובע יש להתשמש ב: } \gamma_{\text{sub}}) \\ \varphi &= \text{זווית חכוך פנימית של הקרקע.} \\ D &= \text{עומק הקפסולה מתחת לפני הקרקע.} \\ K &= \text{מקדם לחץ עפר צידי. במקרה של דייס מוזרק ניתן לקחת } k_0 \text{ (מצב במנוחה) במקרים} \\ &\text{אחרים יש לקחת } K_a \text{ (אקטיבי).} \\ Ca &= \text{אדהזיה בין הקפסולה לקרקע (ניתן להשתמש בסדר גודל 80\% מהקוהזיה).} \end{aligned}$$

כאמור בסעיף 5 לעיל, אנו מתכננים את העוגן למצב גבולי של הרס, אשר נבדל ממצב ההרס, בכך שבו נלקחים בחשבון מקדמי בטחון חלקיים לחומר. עפ"י ההצעה לתקן האירופאי EC-7 מקדמי הבטחון לחומר (לקרקע) יהיו:

$\tan \varphi$	C	Cu
1.25	1.6	1.4

כאשר:

$$C = \text{קוהזיה}$$

$$\varphi = \text{זווית חכוך פנימית}$$

$$Cu = \text{חוזק גזירה (לא מנוקז)}$$

מאחר וההידבקות בין הדייס לסלע נשלטת בעקר ע"י תכונות הדייס, מוצע לקחת בחשבון

$$\gamma_m = 1.85 \text{ (לפי ת"י 466).}$$

$$(7) \quad \tau_d = 0.3 \left(\frac{f_{ck}}{1.85} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{חוזק תכן להידבקות:}$$

בהתאם לכך מתקבלים ערכי חוזק התכן לשליפה במצב גבולי של הרס כדלקמן:

$$(8) \quad Pd = \pi \cdot D \cdot L \cdot 0.3 \left(\frac{f_{ck}}{1.85} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(בסלע)}$$

$$(9) \quad Pd = \left(\gamma \cdot d \cdot K \cdot \frac{\tan \varphi}{1.25} + \frac{Ca}{1.6} \right) \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad \text{(בקרקע)}$$

כמו כן, כדי לקיים את דרישת הבטיחות הכוללת צריך להתקיים:

$$(10) \quad Pd \geq Sd = \gamma_{LT} \cdot S$$

מקובל לבדוק כל עוגן דרוך ע"י כך שמבצעים בו דריכת יתר זמנית, לכוח גדול יותר מכוח העבודה. כוח זה נקרא כוח הבדיקה.
עפ"י המלצות FIP יהיה :

לעגנים זמניים $\gamma_p=1.25$

לעגנים קבועים $\gamma_p=1.5$

כוח הבדיקה מתקבל :

$$(11) \quad S_p = \gamma_p \cdot \gamma_n \cdot S$$

S, γ_n - ראה נוסחא (3).

מאחר וכוח הבדיקה הוא זמני, (עפ"י הגדרתו), ניתן לבדוק את המצב הגבולי להרס, בעת פעולת כח הבדיקה, עם מקדם בטחון חלקי לעמס, קטן יותר (מופחת). ניתן להראות כי כל עוד מתמלא תנאי שיווי המשקל של מצב גבולי של הרס לפי (4) לעיל, וכוחות הבדיקה יחושבו לפי מקדמי γ_p הנ"ל, מובטח מקדם בטחון חלקי $\gamma_L = 1.33$ למצב גבולי של הרס בפעולות כוח הבדיקה לעוגנים קבועים, או $\gamma_L = 1.28$ לעוגנים זמניים.

אם כוח הבדיקה יקבע ע"י מקדמי γ_p שונים מהנ"ל, יש לבדוק את המצב הגבולי להרס בפעולת כוח הבדיקה עפ"י.

$$(12) \quad S_{pd} = \gamma_L \cdot S_p \leq \frac{S_k}{\gamma_m}$$

כאשר $\gamma_L = 1.3$

8. סיכום

תכן עוגני קרקע/סלע ע"י מקדמי בטחון חלקיים כולל בדיקה של כמה תצורות כנ"ל. לכל תצורה יש לבדוק את מצב התכן, שהוא מצב גבולי של הרס, (ואשר איננו זהה למצב ההרס האמיתי).

כל העמסים והכוחות יוכפלו במקדמי בטחון חלקיים γ_n, γ_L , וכל התסבולות יחולקו במקדם בטחון

חלקי לחומר γ_m .

א. מצב גבולי של הרס בשליפה :

שווי משקל כולל של העוגן במצב גבולי של הרס

$$(13) \quad \gamma_L \cdot \gamma_n \cdot S \leq Pd$$

ב. מצב גבולי של הרס של העוגן או אביזר העיגון
שווי משקל במצב גבולי של הרס

$$(14) \quad \gamma_L \cdot \gamma_n \cdot S \leq \frac{S_k}{\gamma_m}$$

ג. מצב גבולי של הרס בעת פעולת כוח הבדיקה:
שווי משקל למצב גבולי של הרס

$$(15) \quad \gamma_L \cdot S_p \leq \frac{S_k}{\gamma_m} \quad (S_p = \gamma_n \cdot \gamma_p \cdot S \text{ : כאשר})$$

סוג מקדם הבטחון החלקי	הגורם המוכפל	מקדמי בטחון חלקיים		מצב כח בדיקה
		עוגנים זמניים	עוגנים קבועים	
γ_L מקדם לעמס	עומס אמיתי	1.6	2.0	1.33
γ_n מקדם התנהגות	עומס אמיתי	מותרת תזוזה מוגבלת בלבד		1.0
		אסורה תזוזה כלשהי		1.25-1.5
γ_m מקדמים לחומר	$\tan \varphi$ זווית חכוך פנימית	$\frac{1}{1.25}$	$\frac{1}{1.25}$	$\frac{1}{1.25}$
	C קוהזיה	$\frac{1}{1.6}$	$\frac{1}{1.6}$	$\frac{1}{1.6}$
	Cu חוזק גזירה לא מנוקז	$\frac{1}{1.4}$	$\frac{1}{1.4}$	$\frac{1}{1.4}$
	f_s חוזק שבר 0.1% לפלדה	$\frac{1}{1.15}$	$\frac{1}{1.15}$	$\frac{1}{1.15}$
	τ הידבקות בין מוט עיגון לדייס של הקפסולה	$\frac{1}{1.85}$	$\frac{1}{1.85}$	$\frac{1}{1.85}$
γ_p מקדם לכח בדיקה	עומס אמיתי	1.25	1.5	-----