

בית האופרה של קופנהגן בעל מבנה גג יוצא-דופן

האנס אקסנר*

הביא לדפוס ותרגם: אינג' רמי בלס



תמונה מס' 1: בית האופרה החדש של קופנהגן שבנייתו הסתיימה ב-2005

נוספים הממוקמים על גבי קירות הבטון הפנימיים הנמצאים לאורך היקף גרעין הבטון העולה כלפי מעלה אל מעל מפלס הגג. תכנון זה יצר גג קונסולי משלושה כיוונים: 32 מטרים לכיוון מערב ו-21 מטרים לכיוון צפון ודרום. אורך הקונסול המקסימלי הוא 43 מטרים בכיוון אלכסוני, והוא נמדד מעמוד האולם הפינתי ועד לפינת הגג החיצונית. יתרה מכך, האדריכלים החליטו שלמבנה יהיו פני שטח חיצוניים חלקים ובחתך קונסטרוקטיבי הקטן ביותר האפשרי. בדרך כלל, הגובה הסטטי של מבנה קונסולי (cantilevered structure) הוא עשירית מהמפתח (span) המקסימלי של הקונסול. הגג של מבנה זה הינו בעל גובה סטטי הנמוך מכך ב-30% והוא תוכנן עם חתך מקסימאלי בגובה של 3 מ'.

אתגרים טכניים

כאשר מוקטן גובה החתך הקונסטרוקטיבי ב-30%, מופחתת גם קשיחות המבנה באופן משמעותי. עם זאת, על-ידי בניית הגג הקונסולי כקופסת פלדה סגורה, התקבלה קשיחות לכפיפה ולפיתול הגבוהה באופן משמעותי מזו המושגת במבנה סריג מסורתי. זוהי בעצם אותה טכניקה שבה משתמשים בתכנון גשרי פלדה, שם משתמשים בקשיחות גבוהה לפיתול, לדוגמה בגשרים תלויים על כבלים עם שדרת כבלים מרכזית. עובי לוחות הפלדה היוצרים את חתך הקופסא הוא דק מאוד

בית האופרה של קופנהגן (ראה צילום מס' 1), בירת דנמרק, זכה בשנת 2008 בפרס של האיגוד הבינלאומי להנדסת גשרים ומבנים (IABSE) כמבנה יוצא הדופן לשנת 2008, בעיקר הודות להכרה בתכנון החדשני והייחודי של מבנה הגג. זהו "הפרס הגדול" בעולם המבנים שלנו.

בניין האופרה הינו מבנה בעל גג קונסולי (canopy roof) מהגדולים בעולם, שמידותיו האופקיות הן 158X90 מטר, המתקרבות לגודלם של שלושה מגרשי כדורגל. תכנון חדשני פותח עבור מבנה הגג על מנת להבטיח הן את החוזק הנדרש, היציבות והתגובה הדינמית שלו, ובה בעת שייראה גם דקיק וקל. תפיסת תכנון השלד הראשי של מבנה הגג נלקחה ישירות מתכנון גשרי פלדה מודרניים.

דרישות ארכיטקטוניות

הגג הוקם כשני מבני גג נפרדים – הגג המזרחי והגג המערבי. אדריכלי הבניין דרשו שהגג המערבי יכלול קטע קונסולי גדול (cantilevered roof) במידות של 78X90 מטר. הגג כולו נתמך על-ידי עשרת עמודי האולם (foyer columns), הממוקמים מסביב למסדרון הקשתי, ועל ארבעה סמכים

* תרגום כתבה שפורסמה ב-Structural Engineering International בגיליון IABSE פברואר 2009.

מסבך שתפקידן היה לתמוך את קטע הגג החיצוני ביותר. לפתרון זה היה יתרון בכך שאפשר לקבל את כל הטורנסים במבנה באמצעות חיבורי ברגים בין מבנה הקופסא לקורות.

אנליזה סטטית

הגג תוכנן לעמוד בעומסי הרוח, עומס השלג והמשקל עצמי, וכמו כן גם במאמצים הפנימיים המתקבלים מהפרשי הטמפרטורה והשקיעות הדיפרנציאליות של עמודי האולם. עומס הרוח שנלקח בחשבון התבסס על התוצאות של בדיקת המבנה כולו במנהרת רוח.

בתכנון גג קונסולי יש חשיבות עליונה להקטין את המשקל העצמי של שלד הפלדה, מה שהוביל לאימוץ חתך של מבנה קופסא חלול. עובי פחי הפלדה נקבע כשישה מ"מ לאחר ביצוע ניתוח מדוקדק שקבע, שזהו אכן העובי המינימלי מנקודת המבט של הייצור, והוא אכן דק בצורה קיצונית עבור מבנה בסדר גודל כזה. לפיכך, ועל מנת לספק די חוזק וקשיחות למבנה הגג, נדרש היה לספק לפחים הדקים יחס תמירות (b/t) של לא יותר מ-70, והוא שקבע את המרחק בין ההקשחות שהותקנו למניעת קריסות מקומיות בפחים הדקים. בכדי לנתח את בעיות היציבות בלוחות הדקים והתמירים נדרש היה לפתח נוסחאות מקיפות חדשות לניתוח קומבינציות של מאמצים דו-ציריים, כולל מאמצים פוסט-קריטיים ולא רק של מאמצי קריסה תחיליים. נוסחאות אלו הובילו לשימוש בלוחות פלדה דקים באופן משמעותי במבנה הגג הקונסולי. פתרון הקופסא הוכיח את עצמו כפתרון האופטימלי, בשל קיומם של מאמצים בשני כיווני הלוחות בשילוב עם מאמצי גזירה שהתקבלו כתוצאה ממומנטי הפיתול הגדולים המטריחים את מבנה הגג.

על מנת להתמודד עם האנליזה הסטטית המסובכת נעשה שימוש בשתי תוכנות נפרדות לביצוע אנליזות מבניות תלת-מימדיות (3D), כולל שימוש בתוכנה שלישית שנועדה להתמודד עם הגיאומטריה המיוחדת של המבנה (ראה איור מס' 3). זוהי דוגמה מוקדמת לשימוש הנפוץ יותר עתה באנליזה תלת-מימדית בתכנון מבנים.

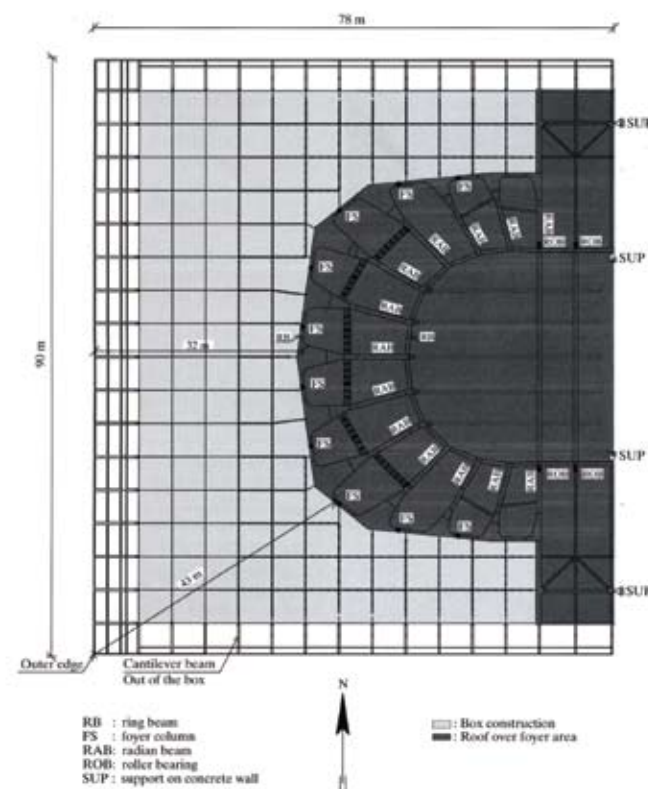
התנהגות דינאמית

הגידול בקשיחות לפיתול של מקטע הקופסא בהשוואה לקורות המסבך תרם רבות לשיפור התנהגות הדינאמית של המבנה ובכך להגבלת ההגברה הדינאמית של עומסי הרוח האנכיים.

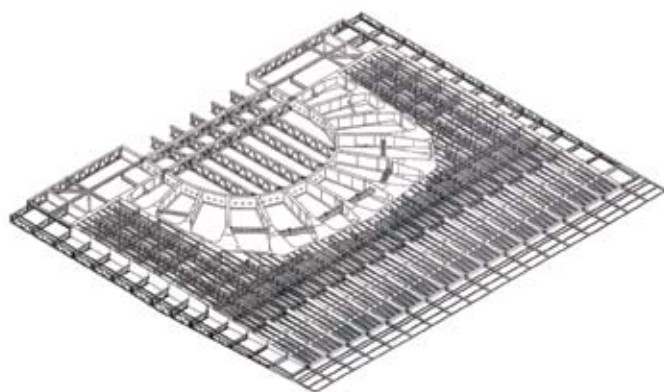
במבנים גדולים עם מודים (modes) עצמיים שולטים הקשורים בשקיעות גלובליות, חשוב להתחשב בזמני המחזור של הרוח כשמחשבים את התגובה הדינאמית. התכנון הדינאמי צריך לקחת בחשבון שהרוח אינה פועלת באותה עוצמה על כל המבנה בכל זמן נתון. בוצעה בדיקה במנהרת רוח שהראתה שבניית הגג הקונסולי כקורת קופסא סגורה מפחיתה את העומס הדינמי של הרוח לרמה מתקבלת על הדעת, ולכן לא היה צורך להשתמש בהתקני שיוך (damping devices).

הבדלי טמפרטורות

הוועדה ציינה במיוחד את העובדה שהמבנה אכן נע בתגובה לטמפרטורות הפנימיות והחיצוניות, דבר שהיה חדשני ביותר.



איור מס' 2: תוכנית הגג הקונסולי



איור מס' 3: מבנה הגג

בהשוואה לתכנון גשר טיפוסי, והוא הוגבל לשישה מ"מ בלבד בחלק העיקרי של מבנה הגג הקונסולי וגדל עד ל-15 מ"מ באיזור הנמצא על ידי עמודי האולם הראשיים התומכים את הגג.

לא ניתן היה לתכנן את הגג כקופסא סגורה (ראה איור 3) בכל שטח הגג עקב הפרשי טמפרטורות, ולכן הוא חולק לקטעים. קטע אחד נבנה כחתך קופסא כשהחלק הנותר נבנה ממספר קורות מסבך. קורת הטבעת החיצונית יוצרת את הסגירה הפנימית של הקופסא והקורות הרדיאליות תוכננו כך שהן תוכלנה לספוג את המאמצים הציריים האופקיים המתקבלים מפעולת מבנה הקופסא. מרפסות האולם תוכננו כנתמכות על-ידי מתלים אנכיים המעוגנים בקורות פלדה רוחביות הממוקמות בין הקורות הרדיאליות. מחוץ למבנה הקופסא ולאורך שלושת קצוות הגג תוכננו קורות

סיכום

בניין האופרה בקופנהגן חב את צורתו הייחודית לגג הקונסולי, המקדם בברכה ומגן על מי שמגיע למבנה. לגג מפתח יוצא דופן וחתך קונסטרוקטיבי דק במיוחד. האלגנטיות שלו התאפשרה באמצעות העקרונות המבניים שהושתתו על האמצעים העיקריים הבאים:

מבנה הפלדה הראשי בחתך קופסא הינו בעל חוזק גבוה לכפיפה ולפיתול ולכן הוא מאפשר למבנה הגג להתפרש החוצה גם אל הקצוות הרחוקים שלו תוך שימוש חסכוני בחומר.

הקשיחות הגבוהה של מבנה הקופסא מבטיחה את מבנה הגג הן מפני תנודות (ויברציות) שמקורן ברוח, והן מפני שקיעות הנראות לעין.

התכנון הקונסטרוקטיבי, הכולל שימוש במבנה קופסא מבחוץ ובקורות מסבך

בחלקי הגג הנמצאים בתחום פנים המבנה, מבטיח את האפשרות לקבלת תזוזות בלתי מרוסנות בתחום הגג הקונסולי ובכפוף לכך קבלת מאמצים נמוכים המתפתחים בשלד הפלדה במצב של טמפרטורות חיצוניות משתנות.

תכנון ההגנה מפני קורוזיה הביא רעיונות ומיומנויות מתחום בניית גשרי פלדה לתחום של תכנון מבנים, והצליח לאמצם תוך כדי התאמתם לאילוצים גיאומטריים ופונקציונליים שונים של הבניין, השונים מאלו של הגשרים.

הייחוד החדשני של שימוש בעקרונות הבאים מתחום של תכנון גשרים לתכנון מבנים לא אובחן קודם לכן בהיקף דומה.



תמונה מס' 4: החלל הפנימי של מבוא בניין האופרה

אחד האתגרים העיקריים בבניית הגג הגדול היה לאפשר לקונסטרוקציה של הגג לקבל את השינויים בטמפרטורה בין החלק של הגג הקונסולי וחלקו של הגג הנמצא מעל האולם. הפרשי הטמפרטורה המקסימליים נוצרים בחורף, כשהחלק של הגג הקונסולי נתון לטמפרטורות קיצוניות מקיפות מכל צדדיו החיצוניים ואילו גג האולם מושפע מטמפרטורות החימום מכיוון פנים הבניין. הפרשי טמפרטורה גדולים כל כך אינם טיפוסיים למבני גשרים. הבדלי טמפרטורות בלוח רציף בגודל כזה יגרמו למאמצים נורמליים בלוחות הדקים בסדר גודל השווה לזה של המאמצים הקריטיים. לכן, היה דרוש לשלב את מבנה הקופסא עם מערכת של קורות מסבך גמישות יותר מעל שטח האולם. החלק הקונסולי של הגג

יוצר צורת פרסה מסביב לשטח האולם. בחורף מתכווצת פרסה זו ולכן לוחצת את המבנה הפנימי הנמצא מעל האולם, מבחוץ כלפי פנים. הגישה הייתה למקם כמה שפחות קורות בכיוון דרום-צפון ולהניח סמכים ניידים בין חלקו של הגג הקונסולי לחלק של גג האולם העשוי קורות מסבך. הסמכים הניידים מסוגלים לשחרר את הדפורמציות הדיפרנציאליות האופקיות בכיוון צפון-דרום, ולהעביר את כוחות הלחיצה/מתיחה בכיוון האנכי.

התוצאה של שילוב עומס הטמפרטורה היא שהמבנה הנמצא מעל האולם נלחץ בכיוון צפון-דרום, הקורות הראשיות מוסטות בצורה אופקית וכל מבנה גג האולם נע לכיוון מזרח.

טיפול בפני השטח

קופסת הפלדה הסגורה מוגנת מפני שיתוך (קורוזיה) על-ידי מערכת מכאנית המופקדת על ייבוש הרטיבות והלחות הפנימית הנמצאת בחלל הקופסא, ובכך מונעת את הצורך לצבוע את השטחים הפנימיים של הקופסא החלולה. עיקרון זה של הגנה מפני קורוזיה משמש בהצלחה בגשרי פלדה בחתך קופסא במשך למעלה מ-35 שנה. למיטב ידיעתנו בניין האופרה בקופנהגן מייצג יישום ראשון של עיקרון זה במבנים (ראה איור מס' 4).

עובדות

בניין האופרה בקופנהגן נפתח ב-15 בינואר 2005. הוא תוכנן ונבנה בלוח זמנים קצר מאוד של ארבע שנים. שטחי הבניה הכוללים של בניין האופרה מסתכמים ב-41,000 מ"ר, כאשר מתוכם מיועדים לשימוש הקהל הרחב 7,000 מ"ר. הבניין מכיל אולם אודיטוריום מרכזי אחד ל-1,500 צופים, מבואה, במה ראשית ועוד חמש במות צדדיות ואחוריות, במה קטנה ל-200 איש, שישה חדרי חזרות עיקריים, חדרי חזרות פרטיים, חדרי הלבשה, משרדים, סדנאות, מזנון, ארכיונים, חנויות וחדרים למתקנים טכניים וחדרי מכונות.

מאגר נתונים על הפרויקט

לקוח, תורם ובונה: קרן א.פ. מולר וס. מקקיני מולר -

קופנהגן, דנמרק

בעלים: התיאטרון הדני הלאומי

אדריכל: הנניג לארסן, אדריכלים - קופנהגן

תכנון קונסטרוקציה: רמבול - דנמרק, וירום - דנמרק

קבלנים ראשיים: א. פיל ובנו - קופנהגן

שלד הפלדה

אודיטוריום 350 טון

אולם 1,000 טון

חלק הגג המזרחי 1,200 טון

חלק הגג המערבי 1,800 טון

המבנה העילי 1,000 טון

שוונות 1,000 טון

ס"ה שלד פלדה 6,350 טון

בטון

בטון יצוק במקום: 26,000 מ"ק

בטון באלמנטים טרומיים: 9,000 מ"ק (2,500 יחידות)

עלות כוללת: יותר מ-400 מיליון דולר

תאריך אכלוס: ינואר 2005