

## סנדאי מדיאטק (Sendai mediatheque), יפן

פרופסור מוצורו סאסאקי (mutsuro sasaki), אוניברסיטת נאגויה, נאגויה (nagoya), יפן

\* תרגם והביא לדפוס אינג' רמי בלס



תמונה 1. מראה חיצוני

### **מבוא**

בניין סנדאי מדיאטק מגלם תפיסה חדשה במבנים מרחביים. הקומפלקס כולל גלריה לאומנות, ספרייה, ומרכז תקשורת. הבניין שגובהו 32 מטר, בנוי בתשעה מפלסים, שניים מהם תת-קרקעיים ושבעה מפלסים הבנויים מעל מפלס הרחוב. כל הקומות הן בצורת רבוע במידות של 50/50 מ'. שטח הרצפות הכולל מגיע ל-21,500 מ"ר. המבנה מורכב משני מרכיבים עיקריים: לוחות ושפופרות: הלוחות הנם שש תקרות מסיביות שטוחות (slabs), והשפופרות הינן 13 עמודים, דמויי עצים, החודרים אנכית דרך הלוחות. שפופרות אלו מהוות את רכיבי המבנה הגמישים אשר משמשים הן כפירים אנכיים למעליות הבניין והן

כחללים אנכיים למעבר הצנרת של המערכות השונות של הבניין ,



תמונה 2. מראה פנימי

מערכת המבנה המינימלית והנקייה הוצעה כמודל חדש של הארכיטקטורה העתידית. המערכת הסטרוקטורלית אשר הוצעה מבוססת על שלושה מרכיבים עיקריים :

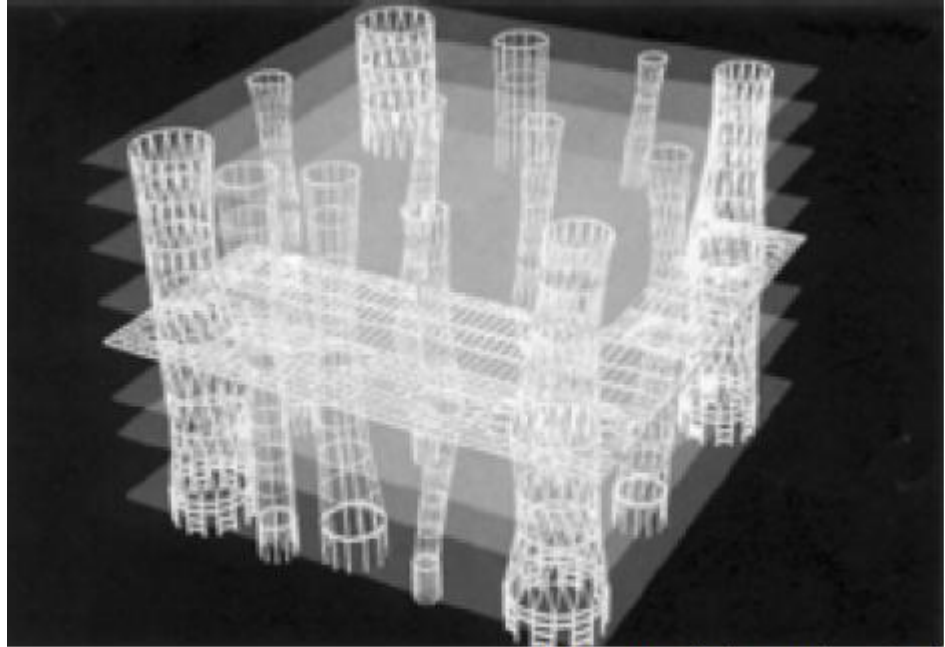
1. עמודי המבנה עשויים משפופרות אנכיות שקופות הבנויות בצורת מבנה סריג הכולל עמודים אנכיים הנוטים לכוונים שונים וטבעות אופקיות העשויות מצינורות פלדה קטני קוטר .
2. תקרות מסיביות דקות במיוחד הכוללות רכיבי פלדה מרובדים בחתך כריך -  
( Sandwiched Structure ) עם יציקת בטון משלימה .
3. מערכת לספיגת אנרגיה בזמן רעידות אדמה אשר הותקנה בקומת המרתף .

## סקירת תכנון המבנה

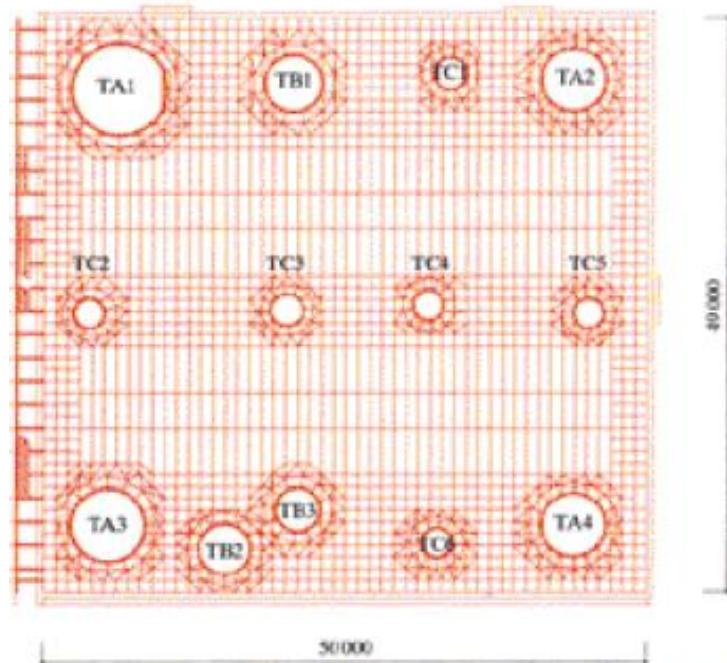
### שפופרות העמודים : מבנה ראשי

שפופרות העמודים ( פירים עצמאיים ממסגרות פלדה ) הן מבנים חופשיים המורכבים מרכיבי פלדה עדינים . הן נועדו להעניק למבנה כולו מראה של שקיפות ועדינות ברמה מרבית . שלוש עשרה השפופרות ( כל אחת מהן בעלת ממדים שונים ) , ממלאות תפקיד של פירים עצמאיים (shafts) . קוטרן נע בין 2 מטר עד 9 מטר. צינורות הפלדה אשר מהם בנויות השפופרות , אשר תומכות את רצפות המבנה ויוצרות את המבנה העיקרי המתוכנן לקבל את העומסים האופקיים בזמן רעידות האדמה , הנם בעלי קוטר קטן ודופן עבה

(פלדה עמידה באש בקטרים של 140 - 240 מ"מ ועובי דופן של 9 - 39 מ"מ) ,



איור 3. מודל הנדסי של שלד המבנה בשלמותו



איור 4. תוכנית קומה טיפוסית

ארבע מבין שפופרות העמודים, TA1 עד TA4, בעלות הקוטר הגדול, משמשות כזיזים תומכים גדולים (Cantilevers) דמויי מגדלים, המתנגדים לכוחות הפועלים בעת רעידות האדמה. שפופרות אלו נותנות גמישות לקומת המרתף הראשונה באמצעות מסגרות קשיחות אשר משתנות למבנה קליפה בצורת פרבולואיד היפרבולי העשוי ממסבכים (trusses) חד-שכבתיים קשיחים במבנה שמעל פני הקרקע. ארבעת השפופרות מבטיחות קשיחות וחוזק מבני רב וגם יוצרות מבנה ראשי נוח מבחינה ארכיטקטונית ובעל שקיפות גבוהה. בדרך כלל, קשיחותם האופקית (החוזק לכפיפה) של הצינורות פרופורציונלית לקוטרם במעלה הרביעית,

ולכן רק צינורות בעלי דופן עבה יכולים לסייע במניעת נזק במקרה של רעידת-אדמה. ארבע שפופרות העמודים הראשיות ממוקמות בארבע הפינות של כל קומה, ובמקום המתאים מבחינה גיאומטרית שנועד למנוע פיתול שמקורו באקסצנטריות.

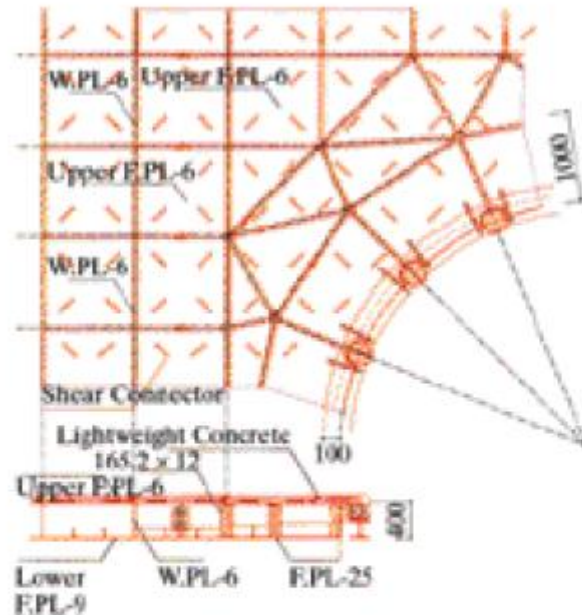
תשע השפופרות הנותרות, TB1 עד TB3 ו- TC1 עד TC6, הן בעלות קוטר קטן יותר, ולפיכך אינן משתתפות במידה משמעותית בהתנגדות לכוחות האופקיים. הן ממוקמות היטב בתוך פנים הקומה ומשמשות כתמיכות לעומסים האנכיים. שפופרות אלו בנויות מרכיבים אנכיים ואופקיים בלבד (ללא אלכסונים). עקב קשיי הייצור והעלות הגבוהה של השפופרות המורכבות ממסבכים תלת-ממדיים, הן משמשות לבניית המגדלים TA1 עד TA4 בלבד – אלה הרכיבים היוצרים את המבנה הראשי המבטיח עמידה מול הכוחות הפועלים בעת רעידות האדמה. השפופרות האחרות, TB1 עד TB3 ו- TC1 עד TC6, מורכבות מאגדי צינורות מקבילים ופשוטים אשר מוקפים באמצעם בחישוקים, דמויי טבעות, שנועדו להבטיח פעולה משותפת של העמודים השונים ולמנוע קריסה כוללת של השפופרת כולה. שפופרות אחדות בעלות קוטר קטן מפזרות ביעילות את משקל הרצפה ומונעות קריסה כוללת העלולה להתפתח עקב צורתן המפותלת.

עמודי השפופרות עשויים מצינורות פלדה עבי דופן ללא תפר, בעלי קוטר קטן וביצועים מעולים. צינורות ללא תפר מיוצרים בשיטה מיוחדת, אשר בזכותה אינם צוברים מאמצים פנימיים ואין בהם תפרים. פלדה מסוג SN490C (בחוזק של 4900 ק"ג סמ"ר) משמשת לייצור פחיות המילוי והפילוס (shimming plates). פחיות פלדה אלה מצטיינות בעמידות כנגד מאמצים רוחביים (המופיעים בניצב לכוון פעולת הכוח) ומבטיחות את הבטיחות בצמתי החיבור. להבטחת העמידות בשריפה, נעשה שימוש בפלדה בעלת עמידות גבוהה מפני אש. כל הצינורות המרכיבים את שפופרות העמודים מחוברים בנקודות המפגש של הצירים, בכדי למנוע כל אקסצנטריות בצמתי החיבור. בשל צורתם המורכבת, תוכננו מחברים אלה בתחילה מפלדה יצוקה, אך פתרון זה היה יקר מדי עקב המספר הרב של תצורות החיבור. בחיבורים שבין צינורות הפלדה לבין פחיות המילוי תוכננו מרווחים צרים המסתירים את הפחיות באופן שהן אינן נראות מבחוץ. הצינורות הנחתכים בזוויות חדות ומחוברים בריתוך, מובטחים מבחינה טכנית בזכות אורך הריתוך הגדול המושג על ידי החיתוך האלכסוני.

#### **לוחות: מבנה הרצפה**

הלוחות (תקרות שטוחות מפלדה) צריכים היו להיות דקים ככל האפשר בהתחשב במפתח של כ- 20 מטר. בזכות יעילות החתך המעולה, נבחר מבנה בחתך כריך מרוכב (Composite Section) העשוי מפחי פלדה מרותכים, בגובה כולל של 400 מ"מ. באזור הנמצא בקרבת שפופרות העמודים, מורכב החתך מפח פלדה עליון ותחתון בעובי של 25 מ"מ הקטן עד 16 מ"מ באזורים המרוחקים מהם. לוחות פלדה אנכיים בעובי של  $12 \div 6$  מ"מ המסודרים בהתאם בגריד של כל 100/100 ס"מ, משמשים כדפנות החתך. יציקת

בטון קל בעובי 70 מ"מ על גבי הפח העליון של התקרה, משלימה את מבנה החתך המרוכב. שיתוף הפעולה בין החומרים השונים מובטח באמצעות מחברי הגזירה (Shear Studs) המרותכים אל הפח העליון. מבנה לוחות הפלדה המרובד מחולק לשלושה אזורים על פי התפלגות המאמצים בכלל המבנה המרובע נטול-הקורות במידות של 50/50 מ', הנתמך חופשית על ידי 13 שפופרות העמודים: "אזור הדיסק" – שבו מקיפים לוחות הפלדה את העמודים, אזור רצועת העמודים - שבו המרחקים בין השפופרות קטנים יחסית, ואזור ללא עמודים – הנמצא בין רצועות העמודים. החלוקה לאזורים מאפשרת יצירת מבנה חסכוני בחתך כריך העשוי מלוחות פלדה מרותכים, המשלב הגיון הנדסי חדשני ודינאמי עם עלות מינימאלית



איור 5. מבנה התקרה העשוי מלוחות פלדה מרובדים - תקרת כריך  
 Upper F.PL-6 - פח עליון בעובי 6 מ"מ  
 Shear Connection - מחבר גזירה  
 Lightweight Concrete - בטון קל  
 Lower F.PL-9 - פח תחתון בעובי 9 מ"מ

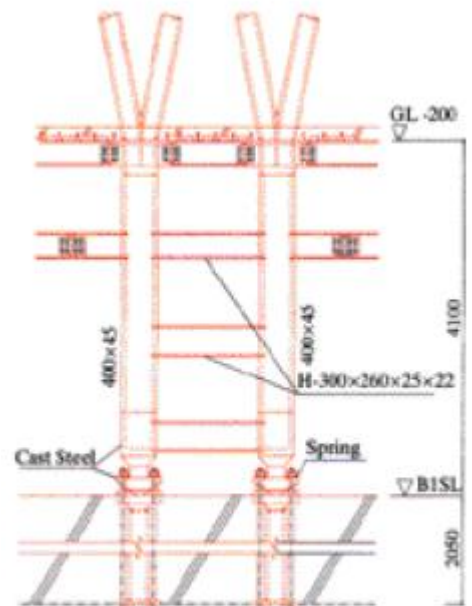
בכדי להכין יחידות מודולאריות שניתן להובילן בנקל, הורכבו ורותכו רכיבי תקרת הכריך (המשמשים ליצירת לוחות התקרה) במפעל הייצור. לאחר הרכבת תקרת הקומה בשלמותה, תוכנן חיבורן למכלול אחד באמצעות ריתוך באתר. שיטה זו אשר הנה ניסיונית במקצת, מיישמת את שיטות ההנדסה הימית לתחום בניית המבנים. בכדי לפשט את היחידות המודולאריות, הן חולקו לחלוקת-משנה: "אזורי הדיסק" - הנמצאים מסביב שפופרות העמודים וכוללים דפנות (webs) רדיאליות מחוזקות (בכפוף למאמצים המתקבלים באותה יחידת שטח), ואזורים אחרים שבהם ממוקמות דפנות חתך הכריך בצורת סריג אורתוגונאלי - שתי וערב.

כדי למנוע השארת רצועות גיבוי במקומות שבהם מרותך חלקן התחתון של הלוחות, אומצה שיטת ריתוך הידועה בשם "יוראנאמי" (Uranami). על ידי הצבת הלוח העליון (פח הפלדה הנושא את יציקת הבטון המשלימה) של מבנה הכריך המרובד ישירות מעל הקורה הטבעתית של שפופרות העמודים, הושגה תמיכה

פשוטה ללוחות. שיטת תמיכה זו עשויה להתאים טוב יותר לבניית רהיטים מאשר לבניית מבנים, אולם פרט מבני פשוט זה מונע את מאמצי הכפיפה האקסצנטריים ההרסניים (מאמצים חוץ מישוריים), מאפשר את תנועת הטבעות והלוחות במישור בעת בניית תקרת הכריך, ופותר את בעיית המאמצים הפנימיים המתקבלים בעת הריתוך. בכל אופן, אף על פי שלא נוצרים כל מאמצים פנימיים, נדרש פיקוח קפדני על עבודות הבנייה והרכבה באתר, בכדי להבטיח את הדיוק ולמנוע את העיוותים והתזוזות של הלוחות הנגרמים תוך כדי פעולת הריתוך.

### ספיגת אנרגיה סיסמית

התוכנית לבניין עמיד ברעידות אדמה מאופיינת בראש ובראשונה, על ידי שילוב בקרת נזקים במסגרת התכנון. במבנה הראשי, בקומת המרתף הראשונה, הותקן מנגנון שיכוך מחזורי - Hysterisis Damping Mechanism, המיועד לספיגת האנרגיה הסיסמית. הפרדת מסגרות הקומה הראשונה והקירות התת-קרקעיים ההיקפיים (הנתמכים אנכית בלבד באמצעות מסבים גליליים המוצבים אופקית) מעבירה לקומת המרתף הראשונה את אנרגיית רעידת האדמה, הפועלת על פירי מסגרות הפלדה הראשיים. הקומה הראשונה של מבנה השלד סופגת את רוב האנרגיה הסיסמית המופעלת על המבנה במהלך רעידת אדמה חמורה, ובכך מצמצמת את עוצמת האנרגיה המופעלת על המבנה העליון. צמצום זה מתקבל על ידי כניעה הדרגתית של רכיבי השלד של קומה זו, המתאפשרת הודות למשיכות המסגרות הקשיחות המשמשות לבניית הפירים האנכיים בקומת המרתף הראשונה, בניגוד למבנה המסבכים הקשיח הנמצא בחלק המבנה הנמצא מעל פני הקרקע



איור 6. עמודי קומת המרתף  
Cast Steel - פלדת יציקה  
Spring - קפיץ

שפופרות העמודים בקומת המרתף הראשונה עשויות ממבנה קשיח בעל חתך עגול, המבטיח את הקשיחות והחוזק המתאימים של הקומה. על מנת להבטיח את מנגנון הקריסה, מותקנות בתווך קורות

קריסה המתוכננת לקרוס ראשונות. פיני פלדה יצוקים המקנים חופש לסיבוב משמשים כיסודות לעמודים. בנוסף לכך, מותקנים מעצורי גומי רכים שנועדו לשמור על יציבות הרובד הראשון, ולהגביר את בטיחותה של המערכת הסטרוקטוראלית כולה לאחר היוצרות מנגנון של מכניזם בעקבות רעידת אדמה בעוצמה בלתי חזויה. מעצורים אלה נועדו לעצור את התנועה האופקית של מסגרות מפלס הקומה הראשונה ושל הסמכים הגליליים האופקיים (של הקירות התת-קרקעיים ההיקפיים), מעבר לטווח מסוים של תנועה חופשית (העולה על פי 2 מערך התגובה הסיסמית המרבית האמורה להתקבל לפי אומדן העוצמה המרבית). רוב אנרגיית העיבור (strain) הפלסטי מתרכזת בקומת המרתף הראשונה, ולכן כאשר מתרחשת רעידת אדמה חזקה, נותר המבנה העליון גמיש ואיננו מקבל דפורמציות משתיירות (residual deformation). המבנה העליון, החופשי מריסון כלשהו, מבטיח כושר ספיגת אנרגיה ומניח את הבסיס למבנים מרוכבים גמישים. לאחר רעידת אדמה חזקה ניתן לאתר את הרכיבים אשר נפגעו בקומת המרתף הראשונה ולתקנם, מה גם שניתן גם לחזות מראש את שיעור הפגיעה. בתכנון טוב, אפשר לנצל את כושר המשיכות (ductility) של רכיבי הפלדה וליישם תכנון מבנה בעל משיכות גבוהה המאפשר דפורמציות פלסטיות. אחרי רעידות אדמה חמורות קל גם לבצע תיקונים, שהרי כל האזורים הנפגעים ידועים מראש וקל לזהותם. גם אם בעקבות רעידת אדמה רבתי, העלולה להתרחש אחת לאלף שנים, נוצר בקומת המרתף הראשונה (המתוכננת לספוג פגיעה מרוכזת) עיוות פלסטי משתייר, קל להניע אופקית את רובד קומת המרתף ולהחזיר למקומו. פעולה זו מתאפשרת הודות לעובדה שהמחברים הנמצאים בבסיסי העמודים (העשויים מפלדה יצוקה) חופשיים להסתובב ואת קורות הקריסה המתוכננת להינזק אפשר להוציא ממקומן ולהחליף לאחר השלמת ההזזה. המערכת מתוכננת כך שניתן לבצע תיקון קל ופשוט של הנזקים בעזרת מגבה (ג'ק) הידראולי הניתן להצבה כנגד הקיר הקשיח של קומת המרתף.

### **העבודות באתר הבניה**

מראשיתה של עבודת התכנון, בחרו המהנדסים להקים את שפופרות העמודים על ידי הצבה של פרוסות שלמות של השפופרת עבור כל קומה וקומה זו על גבי זו, וכל פרטי המבנה הוגדרו בהתאם לשיטת עבודה זו. כל רכיבי עמודי השפופרות ותקרות הכריך חולקו לקטעים קטנים דיים לצורכי ההובלה לאתר הבניה. קטעים אלה הוצבו במקומם בעזרת עגורנים ורותכו יחדיו האתר. בכדי להבטיח את דיוק המבנה הורכבו ונבדקו המקטעים של עמודי השפופרות ותקרות הכריך עוד במפעל הייצור, ונבדקה ההתאמה ביניהם ובין היחידות הסמוכות לכל רכיב ורכיב. באתר הבניה בוצעו מדידות והתאמות נוספות, לפני ריתוך הרכיבים שונים ויצירת המכלול השלם של



תמונה 7. מהלך ההקמה באתר הבניה

שלד המבנה באוקטובר 1988 הוחל בהקמת שלד הפלדה והוא הושלם בדצמבר 1999. הבנייה הושלמה ביולי 2000.

#### SEI – דף נתונים

**בעלים:** Sendai City, Miyagi, Japan

**ארכיטקטים:** Toyo Ito and Associates, Tokyo, Japan

**מהנדס המבנה:** Sasaki Structural Consultant, Tokyo, Japan

**קבלנים ראשיים:** Joint Venture of Kumagai, Takenaka, Ando and Hashimoto, Japan

**כמות הפלדה:** 5,700 טון

**עלות כוללת:** 10 מיליון דולר ארה"ב

**תאריך אכלוס:** שנת 2001