

הרחבת גשר תלוי כבלים מעל מיצר ראנדה – ספרד

Julio Martinez Calzon, Prof., Dr, Civil Eng., Director, MC2 Estudio de Ingenieria, S.L.; Manuel Julia Vilardell, Prof., Dr, Civil Eng., Polytechnic University of Madrid, Spain; Alvaro Serrano Corral, Civil Eng., and Miguel Gomez Navarro, Dr, Civil Eng., MC2 Estudio de Ingenieria S, .L., Madrid, Spain

תרגום והביא לדפוס: אינג' רמי בלס

מבוא

הכביש האטלנטי המהיר חוצה את לשון הים ויגו, שבצפון מערב חצי האי האיברי, באמצעות גשר כבלים באורך כולל של 1,558 מ' ומפתח ראשי תלוי על כבלים באורך של כ-400 מ' מעל מיצר ראנדה, ליד העיר ויגו בספרד. אחד המאפיינים הגיאוגרפיים של חבל גליסיה בספרד הוא ה"ריאס" (Rias). מדובר בתופעה הדומה לפיורד, המתבטאת בלשון ים באורך של כ-20 ק"מ הנכנסת אל פנים הארץ כאילו

הייתה נהר, בעוד שמדובר בלשון מים הכוללת מי ים בלבד. בגליסיה קיימים מספר "ריאס" כאלו, שאחד מהם הוא ריאה ויגו. הגשר מעל מיצר ראנדה נבנה בין השנים 1973–1977 ונפתח לתנועה בשנת 1981. כאשר נחנך הגשר, הוא היה גשר תלוי הכבלים בעל המיסעה הארוכה ביותר שכללה יותר משני נתיבים, והיה גם הגשר הארוך ביותר בספרד. בשנת 2006 הגיע כבר היקף התנועה על הגשר ל-47,000 כלי רכב ביום בממוצע, קרוב מאוד לגבול הקיבולת האפקטיבית שלו, מה שגרם לעיתים קרובות לגודש תנועה באיזור הגשר.

פרויקט הרחבת הגשר מארבעה נתיבי התנועה המקוריים לשישה נתיבים, כלל תכנון קונסטרוקטיבי (שהוכן על-ידי מחברי המאמר) שיאפשר את הגדלת נפח התנועה על הגשר מבלי לבנות גשר חדש. תשומת-לב מיוחדת הוקדשה למציאת תכנון קונסטרוקטיבי, שבנוסף לעלותו המתונה יחסית, ניתן

* תרגום מאמר שפורסם במקור בכתב העת Structural Engineering International בגיליון IABSE 4/2008

יהיה לבנותו מבלי להפריע לתנועה הסדירה על הגשר הקיים. בנוסף לכך, ובהתחשב בצפיפות האוכלוסייה באיזור שבו בנוי הגשר, ניסה הפיתרון המתוכנן שלא להשפיע לרעה על מראה הגשר, שיופיו טבוע על בול ספרדי בערך של 20 פזות, הנושא את תמונתו.

הפיתרון הקונסטרוקטיבי להרחבת הגשר מבוסס על הוספת שתי מיסעות חיצוניות חדשות, הממוקמות לאורך שני צידי המיסעה הקיימת ובצמוד לנציבי הגשר הראשיים. מיסעות חדשות אלו תלויות אל מעל הנציבים הקיימים באמצעות שתי קבוצות כבלי תלייה חדשים וזוג אלמנטים תומכים מפלדה, שמעבירים את העומסים מעוגני הכבלים אל נציבי הבטון הראשיים הקיימים. שתי המיסעות החדשות נתמכות גם כלפי המיסעה הקיימת באמצעות מסבכי פלדה רוחביים קלים.

גשר מיצר ראנדה

הכביש האטלנטי המהיר AP-9 הוא הכביש הראשי בכיוון צפון-דרום בגליסיה (ספרד), אשר חוצה את

לשון הים ויגו באמצעות גשר תלוי כבלים בעל מפתח ראשי של 400 מטרים מעל מיצר ראנדה. על מנת להגדיל את קיבולת התנועה של הגשר, בוצעו מספר מחקרים ששקלו כמה אלטרנטיבות, שכללו בין היתר בניית גשר תלוי כבלים חדש, השארת הגשר הקיים ובניית מיסעה חדשה מתחת למיסעה הקיימת, השארת הגשר הקיים ובניית מיסעה חדשה מעל למיסעה הקיימת, או בניית מיסעות חיצוניות חדשות. לאחר שבוצעו אנליזות השוואתיות מקיפות, שכללו את בחינת כל



תמונה 1. הגשר מעוגן הכבלים על נהר ראנדה בצפון ספרד שבנייתו הושלמה בשנת 1981

שני מסבכי פלדה רוחביים (Warren Trusses) הנמצאים משני צידי הקורה הראשית משלימים את חתך הרוחב הטיפוסי של המיסעה. מסבכים רוחביים אלו, הממוקמים כל 10.53 מ' לאורך המיסעה, תוכננו בגובה משתנה, ההולך וקטן החל מגובה קורת ה"קופסא" הראשית כלפי קצותיהם. חתך הרוחב הכללי שנוצר מקבל צורה משולשת כאשר קורת הפלדה המרכזית נמצאת במרכזו. המסבכים החיצוניים מכוסים בציפוי העשוי מלוחות פלדה דקים, קונסטרוקטיביים למחצה, המעניקים למערכת הקונסטרוקטיבית כולה גימור חלק ואווירודינמי דיו כנגד עומסי הרוח. ובניגוד לכך, המסבכים הפנימיים נשארו ללא ציפוי כלשהו והינם חשופים וחדירים לרוחות היכולות לעבור דרכם. המסבכים הפנימיים מחוברים לשפת המיסעה הקיימת באמצעות סמך פרקי קבוע (המונע תזוזות אנכיות ואופקיות אך מאפשר סיבוב), וזאת



תמונה 2. גשר ראנדה מעל שפך לשון הים ויגו, עם הבול שהופק לכבודו על-ידי שירות הבולאות הספרדי

בכדי להבטיח שיתוף פעולה קונסטרוקטיבי גלובלי מספק בין שתי המיסעות. בקודקוד החיצוני של המשולש מחוברים המסבכים לקורת שפה אורכית (קורת פלדה בחתך קופסא), שגם תומכת בפלטת הבטון העליונה, וגם תורמת לחלוקת עומסי התנועה המופעלים על מיסעת הבטון בין מספר מסבכים רוחביים. קורת השפה זו תוכננה אף היא כקורת פלדה מרוכבת העשויה פלדה-בטון (COMPOSITE SECTION). מסבכי הפלדה החיצוניים מונעים גם את עיוות חתך הרוחב האופייני כולו, הנוצר על-ידי קורת הראשית, קורת הקצה, לוח הבטון העליון ופחי החיפוי התחתונים. בנוסף למסבכי הפלדה הראשיים המושלמים נוספו גם מסבכי ביניים בנקודות האמצע של המפתח.

לוח הבטון העליון תוכנן בעובי המשתנה בין 25 ס"מ בקו המרכזי של הקורה הראשית ועד ל-15 ס"מ בסמוך לקורת

ההיבטים הטכניים, האסתטיים והכלכליים, נמצא ופותח הפיתרון המועדף שהיה הרחבת הגשר הקיים. פיתרון הרחבה זה מורכב מבניית שתי מיסעות חיצוניות חדשות, הממוקמות לאורך שני צידי המיסעות הקיימות ובצמוד לנציבי הגשר הראשיים. טכנולוגיה זו אפשרה לבצע את עבודות הרחבת הגשר ללא כל הפרעה לתנועה על הגשר הקיים ומבלי להשפיע על לשון הים ויגו, איזור רב ערך ביותר בפרספקטיבה של טבע,

סביבה ונוף. במסגרת פרויקט ההרחבה של הגשר, בוצעה התאמה של הגשר הקיים לתקן העדכני ביותר של גשרי כבישים בספרד.

שיטת הרחבת מבנה המיסעה

פיתרון הרחבת הגשר הקיים מורכב מבניית שתי מיסעות חיצוניות חדשות, הממוקמות לאורך שני צידי המיסעות הקיימות ובצמוד לנציבי הגשר הראשיים.

חתך רוחב אופייני

כל אחת משתי המיסעות הצדדיות החדשות הורכבה מקורת פלדה ראשית אורכית בחתך קופסא, ברוחב של 1.5 מ' ובגובה של 2.30 מ', הצמודה לפנים החיצוניים של עמודי הגשר הראשיים. על מנת ליצור חתך מורכב פלדה-בטון (COMPOSITE), המשפר באופן משמעותי את התנהגותו הקונסטרוקטיבית של החתך בהשוואה לחתך העשוי אך ורק מפלדה, משולבת קורת הפלדה בחתך קופסא עם פלטת בטון מזוין עליונה בעובי של 25 ס"מ, המשמשת גם כמיסעת הגשר החדשה. שתי קורות הפלדה הראשיות תלויות על כבלי תלייה התפוסים באמצע רוחב המשטח העליון שלהן ונתמכות גם על-ידי שולי המיסעה הקיימת באמצעות מסבכי פלדה רוחביים המחוברים פירקית בקצותיהם (ראה תמונה מס' 6).

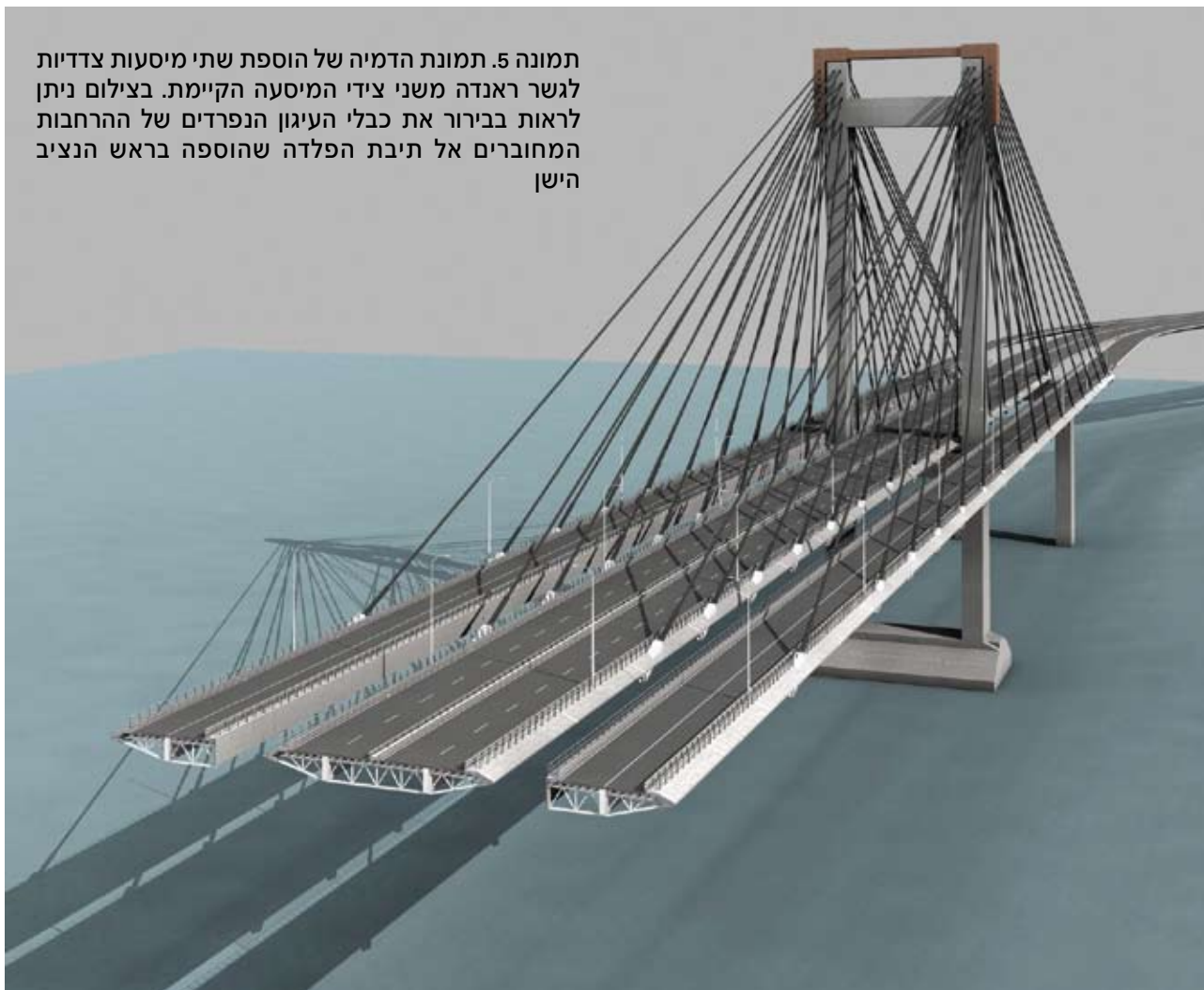


תמונה 4. מראה וירטואלי של גשר ראנדה המורחב עם ארבעה נתיבי תנועה על מיסעתו



תמונה 3. צילום אוויר של גשר ראנדה הקיים עם שני נתיבי תנועה על גבי מיסעתו

תמונה 5. תמונת הדמיה של הוספת שתי מיסעות צדדיות לגשר ראנדה משני צידי המיסעה הקיימת. בצילום ניתן לראות בבירור את כבלי העיגון הנפרדים של ההרחבות המחוברים אל תיבת הפלדה שהוספה בראש הנציב הישן



המרווח האורכי בין עוגני הכבלים במיסעה החדשה מקביל ושווה לרווח שבין הכבלים במיסעה הקיימת. כתוצאה מכך נמצאים העוגנים בשתי המיסעות באותו חתך רוחב והם מחוברים ביניהם באמצעות המסבכים הרוחביים. העוגנים בקצוות העליונים של הכבלים נמצאים במיקום אנכי הזהה לזה של העוגנים הקיימים, וזאת על מנת לקבל מצב בו מקבלים חפיפה ויזואלית ומקבילות מושלמת בין קבוצת הכבלים הקיימת וקבוצת הכבלים החדשים, והרחק מתחושת אי-סדר ויזואלית דמוית רשת. מספר הגדילים בכל כבל תלייה נע בין 33 גדילים עד 91 גדילים לכל כבל.

סידור זה של הכבלים, בשילוב עם המיסעות התלויות הכוללות מסבכי פלדה רוחביים, גורם להפחתת המאמצים בכבלים הקיימים תחת העומסים הקבועים, הודות לאפקט המנוף היוצר כוחות כלפי מעלה בציר החיבור בין שתי המיסעות. אפקט זה היה די מועיל, שכן הוא הפחית חלק ממאמצים הקבועים בכבלים הקיימים. עם זאת, הפחתה זו במאמצים אינה מספיקה כדי להגביר את התנהגותם הבלתי-ליניארית, בשל הגידול בשקיעה האנכית שלהם. בעוד שטווח המאמצים בכבלים תחת עומסים שימושיים שונה רק במקצת, שופרה התנהגות הכבלים הקיימים באופן כללי, במיוחד בהפעלת עומסי עייפות (Fatigue Loads). יתרה מכך, הכוחות שהתקבלו בעוגנים העליונים הקיימים לא היו גדולים יותר בתצורת הגשר המורחבת מאשר במצב הקודם של הגשר,

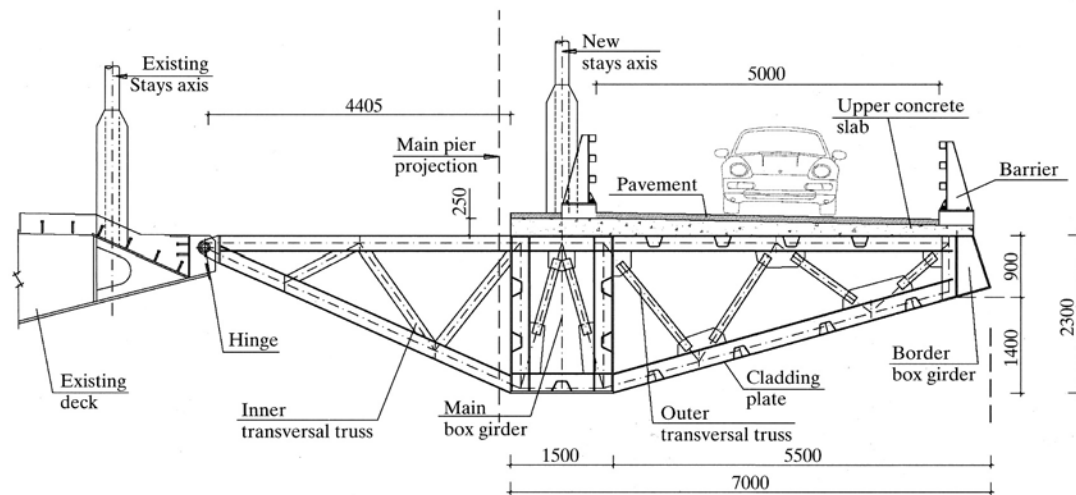
הקצה, ובכך מספק שוני של 10 ס"מ בין מפלסי שני צידי סיפון המיסעה המורחבת. הפרש גובה זה בפני הבטון יצר שיפוע צידי, שאיפשר את סילוק מי הגשם לנקודות הניקוז הנמצאות בקרבת קורת השפה. רוחב הכביש על פני מיסעת הבטון הינו 5.0 מ', רוחב לוח הבטון העליון הוא 6.75 מ' ורוחבה הכולל של המיסעה המורחבת הוא 7.0 מ'. על גבי לוח הבטון העליון בוצעה שכבת אספלט בעובי של 8 ס"מ.

תכנון זה של חתך המיסעה האופייני הבטיח התנהגות אווירודינמית מתאימה של הגשר המורחב, כפי שהוכח בבדיקות שבוצעו במנהרת הרוח.

מערכת כבלי התלייה

שתי קבוצות חדשות של כבלי תלייה נושאות את המיסעות המורחבות החדשות, קבוצה אחת לכל מיסעה. כבלי התלייה מעוגנים בתוך קורת ה"קופסא" הראשית, שממדיה מאפשרים קיבוע והתקנה נוחה של העוגנים, גישה לדריכת העוגנים במהלך הבנייה, וכן ביקורת ובקרה במהלך תקופת השירות שלהם.

בקצה הנגדי העליון מעוגן כל כבל באלמנט עיגון מפלדה הממוקם על גבי הקצה העליון של נציבי הגשר הראשיים הקיימים. הכבלים אינם נדרכים מקצה זה, אך אלמנט העיגון העליון יאפשר גישה לביצוע בדיקות וביצוע כל העבודות הדרושות להחלפת כבל במקרה הצורך (תרשים מספר 3).



תמונה 6. חתך רוחב של אחת ממיסעות ההרחבה של הגשר (מספרי היחידות הם במילימטרים)



תמונה 7. תמונת הדמיה של אחת המיסעות החדשות שהוספו לציד המיסעה הקיימת

עובדה חשובה במיוחד, מפני שהיא ביטלה את הצורך לבצע חיזוקים מקומיים של איזור העיגון הקיים בחלק העליון של הנציבים הראשיים, שהיה עלול להיות די בעייתי.

המערכת הקונסטרוקטיבית של כבלי התלייה אלמנט העיגון של הכבלים החדשים

על מנת לחבר את העוגנים של הכבלים החדשים ולהעביר את הכוחות לנציבי הגשר הקיימים, תוכננו אלמנטים מיוחדים בצורת קופסא, העשויים מלוחות פלדה, המותקנים במישור החיצוני שבראש הניצבים ומעליהם (ראה תמונה מס' 7). אלמנטים אלה מונחים על סמכים עגולים (Pot Bearing) הממוקמים על גבי המשטח האופקי העליון של הניצבים, כשבאחד מהם מקובעות כל ההזזות האופקיות ובשני מתאפשרות התזוזות האופקיות בכיוון רוחבי לציר הגשר. סמכי ניאופרן עם אפשרות תזוזה מוגבלת, ממוקמים באיזור המגע שבין המשטח החיצוני האנכי של הניצבים לבין המשטח הפנימי של תיבות הפלדה המונחות על גבי ראשי העמודים. סמכים אלו מעבירים אל העמודים כוחות לחיצה המתקבלים בשל סטיות מהאנך של כבלי התלייה, שבעטיים מתקבלים הכוחות האופקיים.

אלמנטי העיגון של מערכות הכבלים החדשות בנציבים מורכבים מקורת פלדה בחתך קופסא במידות של 4.00×4.00 מ', העשויה מלוחות פלדה עבים במיוחד (עם עובי דופן של עד 80 מ"מ), ודיאפרגמות פלדה המאפשרות העברת כוחות יעילה הן לסמכים והן בין הכבלים בכל צד של אלמנט העיגון. הכבלים מעוגנים במשטחים החיצוניים של ה"קופסא", ובכך מונעים הצטלבות של הכבלים בפנים החלל, ומחייבים את תיבת הפלדה להעביר את רכיבי האיזון האופקיים של הכבלים משני צידי הניצבים הראשיים.

תיבות הפלדה המונחות מעל עמוד בכל נציב, מחוברות באמצעות קורת רוחב (Crosspiece) בחלק העליון של הניצבים. הקורה נמצאת בדרך כלל במתיחה, וכתוצאה מכך היא מאזנת את הלחיצה המועברת לסמכי הניאופרן, ומבטיחה

* ניאופרן – או פוליכלורופרן, הוא גומי סינטטי, השומר על גמישות בטווח טמפרטורות רחב.

הספרדי הנוכחי, IAP, אומתה באופן סימולטני לתכנון הרחבת הגשר. בכמה מקרים היו הערכים שונים באופן משמעותי בין שני התקנים, במיוחד במונחים של עומסי רוח, שהם לעתים קרובות גבוהים יותר. על מנת לאשר את הגשר הקיים היה צורך לקחת בחשבון כל תוספת אפשרית של התנגדות אלסטו-פלסטית של האלמנטים שלו. לאחר מכן בוצעו אנליזות מקיפות לבדיקת המבנה כולו ויציבותו, בהתחשב הן בחומר הלא-ליניארי ובהתנהגות הגיאומטרית של הגשר. אנליזות אלה הראו, שלגשר הקיים יש יכולת מספקת לתמוך בעומסים החדשים שנוצרו כתוצאה מהרחבת המיסעות, ללא צורך כלשהו בחיזוק מבנה הגשר או יסודותיו, כפי שאכן נצפה בבדיקת ההיתכנות הראשונית. בנוסף לכך, סוכם שהגשר יכול לעמוד בגידול התנועה ועומסי הרוח שחייבים להתחשב בהם על-פי התקנים החדשים לתכנון דרכים וגשרים בספרד.

אנליזה במנהרת רוח

תדרי הפיתול והכפיפה של צורות התנועה הראשונות של מיסעת הגשר, שהתקבלו מתוך ניתוח מודלי של הגשר המורחב, מרוחקים ביניהם במידה מספקת בכדי שניתן יהיה לצפות שלא יגרמו לתופעות של איבוד יציבות איירו אלסטי בשל הופעת מודי כפיפה ופיתול צמודים (הרפרוף הקלאסי). מבלי להתחשב בכך, ועל מנת להבטיח את יציבות הגשר, בוצעה לחתך הגשר המורחב אנליזה מקיפה במנהרת רוח במכון Ignacio Da Riva באוניברסיטה הפוליטכנית של מדריד (תמונה מס' 9). אנליזה זו הראתה, כי מהירות הרוח הראשונית שבה הופיע אפקט אי יציבות איירו אלסטית, ובעיקר רפרוף קלאסי, היה בין 90 ל-120 m/s, תלוי בזווית הפגיעה, מעט גבוה יותר מאשר מהירות הרוח המצוינת בתקן (מתחת ל-60 m/s).

סיכום

הרחבת הגשר התלוי מעל מיצר ראנדה איפשרה את הגידול בקיבולת התנועה על הגשר על-ידי שימוש בגישת תכנון ושיטות ביצוע המונעות הפרעות לתנועה הסדירה במהלך הבנייה, ותוך שימוש בתסבולת הקיימת של הגשר המקורי, כשהתוצאה היא פיתרון מצוין הן מבחינה כלכלית והן מבחינה טכניים.

נתונים כלליים וכמויות

המזמין: המשרד לעבודות ציבוריות של ספרד

AUDASA - ספרד

תכנון קונסטרוקציה:

Julio Martinez Calzon, Alvaro Serrano Corral,
MC2 Estudio de Ingenieria, S.L., Madrid, Spain;
Manuel Julia Vilardell, Polytechnic University of
Madrid, Spain

פלדה קונסטרוקטיבית: כ-6,600 טון

פלדת זיון: 280 טון

פלדה בכבלי התלייה: 850 טון

בטון מזוין: 3,340 מ"ק

עלות משוערת: כ-73 מיליון אירו

מועד הפעלה: במהלך שנת 2010



תמונה 8. אלמנט העיגון מפלדה שנבנה על גבי הניצב הישן

מירכוז נכון ומדויק של הכוחות האנכיים בציר הניצבים. תכנון מקורי זה מונע הן הפעלת כוחות אופקיים בחלק העליון של הניצבים והן מניעת הפעלת מומנטי כפיפה באיזור העוגנים של הכבלים הקיימים. על מנת להקטין למינימום את מימדיהן היה חשוב להבטיח שלא תהיה כל העברה של מומנטי כפיפה. לפיכך מחוברות קורות הרוחב הנ"ל לתיבות הפלדה התופסות את עוגני הכבלים בצורה פירקית. מומנטי הכפיפה היחידים בקורות הרוחב הם אלו הנוצרים בגין משקלם העצמי וכן מעומסי הרוח המקומיים המופעלים עליהן.

נציבי הגשר

תפקידם הקונסטרוקטיבי של הניצבים הקיצוניים של הגשר הינו לתת קשירה וריסון של כבלי התלייה של הגשר. מכיוון שמערך הכבלים החדשים של הגשר המורחב הינו אנלוגי לחלוטין לזה של הכבלים הקיימים, היה צורך להוסיף שתי



תמונה 9. הבדיקה במנהרת הרוח שבוצעה למודל המפרק המצולב של הגשר המורחב

קונסולות בטון הבולטות כ-9.80 מ' מכל צד של נציבים אלה, על מנת למקם ולקבע בהם את אלמנטי התמיכה של שתי המיסעות החדשות וכן לשמש כסמכי הקצה של גשרי הגישה (Viaducts), שגם בהם יהיה צורך.

התאמה לתקנים הקיימים - שיטת החישוב

תאימות המבנה בהתאם לעומסים שנקבעו בקוד העומס