



クロアチアのアドリア高速道路にある2つの特徴的なアーチ橋 — Two Notable Arch Bridges on The Croatian Adriatic Highway —

著：Jure Radić, Zlatko Šavor, Ana Mandić
訳：プレストレストコンクリート海外部会*

アドリア高速道路の建設は、クロアチアでは過去類のない大規模な建設プロジェクトの一つである。本論文では、この高速道路にある2つの有名なアーチ橋（マスレニカ橋とクルカ橋）について述べる。

新しいコンクリート橋であるマスレニカ橋の建設は、新たな高速道路建設の幕開けとなった。アーチ支間 200 m、アーチライズ 65 m のアーチ橋で、張出し工法により建設された。上部構造は、プレキャスト桁と現場打ちコンクリート床版をプレストレスで一体化させた連続構造である。本橋梁は沿岸地域に位置するため、過酷な腐食性環境や強風といった条件に配慮して設計する必要があった。

クルカ橋は、自然環境保護区域に指定されたクルカ川国立公園に近接している。この渓谷を跨ぐためアーチ構造が採用された。アーチ支間は 204 m、アーチライズは 52 m である。上部構造は、景観への配慮と地震時慣性力の低減を目的としてスレンダーで軽量の鋼コンクリート複合構造が採用された。

キーワード：アドリア高速道路, コンクリートアーチ橋, 鋼コンクリート複合構造

はじめに

2008年の終わり、全延長 580 km のアドリア高速道路のうち、456 km が開通した。この高速道路の建設は、クロアチアでは過去類のない大規模な建設プロジェクトの一つである。クロアチアの南北を結ぶ本高速道路は A1 号線と呼ばれ、国際的な道路ネットワークである欧州自動車道路の E65 と E71 を接続し、北・中央ヨーロッパからの道路交通を引き継ぐ役割を担っている。この高速道路は交通網上重要な道路であるとともに、環境保護区域を通過するため、景観にも配慮して設計された。本高速道路には、40 を超える橋梁と、約 20 のトンネルがあり、このうち2つのアーチ橋について詳しく述べる。

1. マスレニカ橋

マスレニカ海峡を跨ぐ鋼アーチ橋の崩壊は、戦争における大きな損失であった。この橋は、クロアチアの南北を結ぶ主要な道路の一部であった。新たな橋梁の建設にあたり、道路線形の見直しを実施した。詳細な検討の結

果、新たな橋は、もともとの橋からそれほど遠くない場所に架設することが決定した。マスレニカ橋の建設は、新たなアドリア高速道路建設の幕開けとなった。マスレニカ橋は、クルカ橋とともに、クロアチアにおけるコンクリートアーチ橋の象徴と位置づけられている。

1.1 構造概要

マスレニカ橋は、海拔約 90 m に位置するこの橋は直線橋で、アーチ支間 200 m、アーチライズ 60 m (スパンライズ比 3.08) の固定式コンクリートアーチ橋である (図 - 1)。アーチリブは、外形を幅 9 m × 高さ 4 m で一定とした2室箱型断面である。

上部構造は 12 径間連続構造で、橋長 $L = 350$ m、支間割は 26.0 m + 10@30.0 m + 24.0 m である。径間ごとにプレキャスト PC 桁を架設し、支点部および床版を現場打ちのコンクリートで施工した一体化した後、プレストレスを導入し連続構造とした。

橋脚および鉛直材は高さ 3.6 ~ 67.9 m の 2 本柱形式であり、上端部には 2 本を結ぶ横梁がある。すべての橋脚および鉛直材は箱形断面であり、エンドポストは 2.5 × 2.5 m、その他は 2.0 × 2.5 m である。

両橋台と橋台にもっとも近い橋脚上では橋軸方向可動支承で、アーチクラウンに近い2つの鉛直材上では橋軸方向固定支承で上部工を支持した。他のすべての橋脚および鉛直材上では、上部工と剛結とした。桁端部の伸縮装置は、地震の影響を考慮し、橋軸方向に ± 200 mm の変位を許容している。この橋の建設当時は、クロアチアの設計基準が確立されていなかったため、ドイツの設計基準 DIN に基づいて設計された。

1.2 耐久性

橋梁は沿岸付近に位置するため、厳しい腐食性環境に曝されることや現地の強風を考慮して設計を行った。過

マスレニカ橋の設計データ

施主および発注者：
Croatian Highways, Zagreb

構造設計：
Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering,
Zagreb, Croatia

施工者：
Konstruktor-Inženjering, Split, Croatia

コンクリート	16 500 m ³
全工事費	1 千万ユーロ
供用開始年月	1997 年 4 月

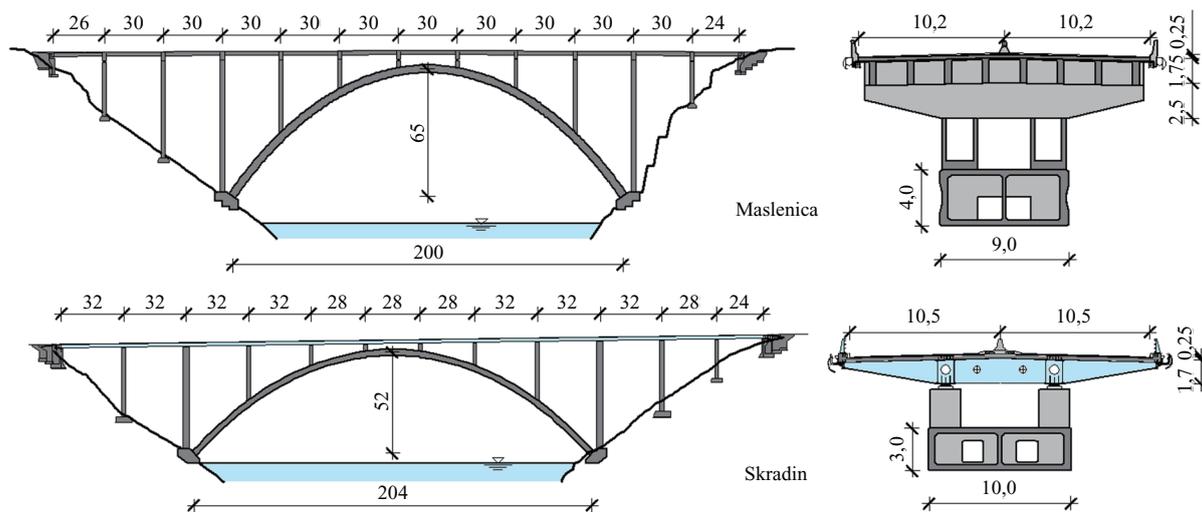


図 - 1 マスレニカ橋とクルカ橋の構造図

密配筋の回避と耐久性の向上を目的とし、過去にアドリア海沿岸地域で建造されたコンクリートアーチ橋に比べて、すべての部材寸法を大きく設定した。しかし、そのような側面があるにも関わらず、橋梁はスレンダーで景観性に優れた構造に見える。腐食性環境下で橋梁の耐久性を向上するため、セメントは水密性の高いポルトランドセメント PC45 を使用し、さらにスラグを 30 % 混入した。各部材のコンクリート等級は、アーチと鉛直材、床版で C30、PC 桁で C40、基礎で C20（水セメント比 40 % 以下）とした。アーチアバットを除くすべての部材で最小かぶりは 50 mm とした（海面に近いアーチアバットでは、かぶりを 100 mm に増加している）。

1.3 架設方法

アーチの施工では、片持ち張出しによる架設がもっとも困難であった。アーチの施工は、移動作業車（重量 55 t、延長 5.26 m）を用いて両アーチアバットから対称に進めた。エンドポスト上には、仮設の斜吊材を配置するため、高さ 23 m の鋼製ピロンを設置した。エンドポストとピロンからのびるバックステイは、アースアンカーによって反力をとった。アーチの建設はアーチクラウンのダイヤフラムを省略することによって施工速度を上げた。将来的なクリープ・乾燥収縮による変形も考慮した上げ越し量（クラウン部で最大 137 mm）により施工を行った。施工は 24 時間体制で行い、アーチを 11 ヶ月で架設した（図 - 2）。強風により 2 ヶ月間作業停止となったので、アーチ架設の実質の施工期間は 9 ヶ月であった。

プレキャスト PC 桁はアーチの架設中に、施工現場近傍で製作した。アーチクラウンを閉合した後、鉛直材と上部工を施工した。鉛直材の施工にはクライミングフォームを使用した。鉛直材の 1 ロットは 5.0 m とした。横梁の下層部は支保工施工により構築し、剛構造とする箇所では、架設桁によってすべてのプレキャスト桁を設置した後に、床版コンクリートと一緒に上層部を打設し、プレストレスを導入した。アーチの閉合部を施工中に、建設現場近くを震源とする比較的強い地震が発生した

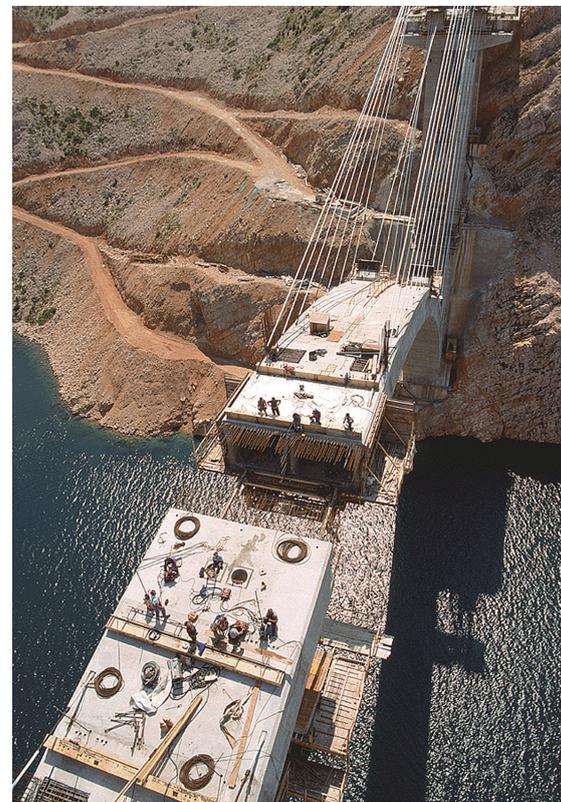


図 - 2 マスレニカ橋のアーチ部閉合状況

が、構造物に影響はなかった。

1.4 計測工

クロアチアで初めてとなる応力と腐食の両方をモニタリングできる総合計測システムが、マスレニカ橋で採用された。計測は施工中から開始し、プレキャスト PC 桁についての計測では、コンクリートの打設前後の初期条件や、桁のたわみ、死荷重やプレストレスによる応力、ひずみ、プレストレス導入後の固有振動数だけでなく、クリープや乾燥収縮による鉄筋の応力とひずみも対象とした。施工段階ごとのアーチのたわみ量や応力の記録、

○ 海外文献 ○

上部工施工前の動的特性を計測した。全部で 92 箇所のひずみセンサー（コンクリートに 18 箇所と鉄筋に 74 箇所）を、主要な位置に設置した。コンピュータによって測定データを収集し処理している。設置されたセンサーは、ひずみや橋梁の温度、振動を測定できる。また、鋼材の腐食を探索できるセンサーも特別に設置した。

2. クルカ橋

新しいアドリア高速道路はクルカ渓谷をわたり、自然環境保護区域であるクルカ川国立公園に近接している。橋梁の建設場所は、入り江付近に位置し、比較的厳しい腐食性環境下にある。新設する橋梁は、渓谷の豊かな自然環境に適応できるようにアーチ構造が選定された。

2.1 アーチ構造概要

クルカ橋は、アーチ支間 204 m、アーチライズ 52 m（スパンライズ比 4.0）の固定式コンクリートアーチ橋である（図 - 1）。アーチリブは、外形を幅 10 m × 高さ 3 m で一定とした 2 室箱形断面である。アーチアバット部は、アーチとエンドポスト（2 本柱形式）の基礎が一体となっている。橋台はパラレルウィングを有する標準的なタイプで、全ての鉛直材は箱形断面である。個々の鉛直材の断面は安定解析に基づき決定している。

2.2 複合構造概要

橋梁架設位置では、大規模地震が発生する可能性がある。そこでクルカ橋では、上部工重量を軽量化し、地震時慣性力を低減することと、美しい周辺環境に橋梁を融合させることを目的として、上部構造は、一般的な PC 構造の代わりに、複合構造を適用した。2 本の鉛直材の頂部を繋ぐ横梁を不要とすることができたため、視覚的に軽快な印象を与えることができた。上部構造は、12 径間連続複合構造で、橋長 $L = 391.16$ m、支間割は $4@32.0$ m + $3@28.0$ m + $3@32.0$ m + 28.0 m + 24.0 m である。上部工は、鋼製格子桁とコンクリート床版で構成されており、鋼製格子桁（材質 S355）は、桁間隔 7.6 m の 2 本の主桁（箱型断面）と 4.0 m 間隔の横桁から構成される。上フランジは路面に合わせ、2.5 % の勾配を有しているため、各桁の外側のウェブ高さは 1 700 mm、内側のウエ

クルカ橋の設計データ

施主および発注者：
Croatian Highways, Zagreb

構造設計：
Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering,
Zagreb, Croatia

施工者：
Konstruktor-Inženjering, Split, Croatia

鋼上部工施工：
Duro Dacvić Montaža, Slavonski Brod, Croatia

鋼材	1 700 ton
コンクリート	12 000 m ³
全工事費	1 千 2 百万ユーロ
供用開始年月	2005 年 7 月

ブ高さは 1 730 mm となっている。桁断面の外形は橋梁全体にわたり一定とし、部材の板厚は、箱桁内側で変化させた。各主桁のウェブ間隔は 1 200 mm、フランジ幅は 1 300 mm とし、橋梁全体にわたり一定である。上フランジ厚は 20 ~ 70 mm、下フランジ厚は 30 ~ 80 mm、ウェブ厚は 16 ~ 20 mm である。板厚は、支間中央で最小、支点付近で最大となる。横桁の上端は主桁の上縁と同じ位置であり、路面勾配に合わせた形状となっている。主桁間の横桁は、上フランジが 400×20 mm、下フランジが支間中央で 400×25 mm、支点部で 500×25 mm、ウェブ高さは 1 685 ~ 1 765 mm で支間中央は板厚 14 mm、支点部で 20 mm である。各部材は溶接により I 型に接合している。張出し床版部の横桁は、張出し長 6.52 m で、桁高は張出し先端で 445 mm、主桁との接合部は 1 700 mm である。上フランジは 400×20 mm、ウェブ高さは 400 ~ 1 655 mm で、支間中央は板厚 14 mm、支点部は 20 mm である。下フランジの板厚は 25 mm で一定だが、フランジ幅は張出し先端から主桁間で変化し、支間中央では、300 ~ 430 mm、支点部では 400 ~ 500 mm となっている。エッジビームは上下のフランジが 300×20 mm、ウェブが 400×12 mm である。床版コンクリートはコンクリート強度 C45/55、幅 22.56 m、床版厚 250 mm であり、橋軸方向を支間として設計されている。

2.3 構造解析

考慮する荷重は、風荷重と地震荷重を除いて、ドイツの橋梁設計基準である DIN1072 に従った。風荷重は BS5400 Part 2 に従って算出した。地震荷重は Eurocode 8 に基づき評価した。当初の計画では、アーチクラウン付近の高さの低い鉛直材には、橋軸方向を固定とする支承を用いることとしていた。これは、鉛直材に対して剛性が高く、水平力に対する抵抗が大きいアーチリブに橋軸方向の水平力を負担させることが、論理的構造であると考えられたためである。しかし、検討の結果、上部工慣性力をすべて負担できる支承の設計および、それらを支持する鉛直材の設計が現実的でないことが分かった。そこで、中央の鉛直材上では、橋軸方向の移動を制御する特殊な支承を用いることとした。この特殊な支承は、設計荷重時のように水平力が 1 000 kN までは、固定支承として機能し、大規模地震時など 1 000 kN 以上の水平力が作用するときは変位制限部材が降伏して可動支承として機能する。その他の支承は一般的なポットベアリング支承とし、低い鉛直材と橋脚上、端支点では橋軸方向可動とし、高い鉛直材上では橋軸方向固定とした。その結果、両端支点に設置した粘性ダンパーと、エンドポストおよび高橋脚が大部分の地震力を吸収することで、地震時にも設計荷重時と同様に適切な安全性を確保できる構造とすることができた。

耐震設計は、設計加速度 0.2 g、地層区分 A とした設計応答スペクトルに基づき行われた。はじめに、粘性ダンパーは無く、鉛直材上では橋軸方向固定としていた支承が降伏したという条件のもと、固有値解析を行った。30 次モードまで計算した結果、固有振動数は 1 次モード

で 0.301 Hz, 30 次モードで 4.224 Hz であった。有効質量の合計は 22 910 トンとなった。地震時の応答値は, CQC 法 (完全 2 次形式結合法, Complete Quadratic Combination Method) によるモード合成法で計算した。Behaviour factor (Eurocode8 Part1, 3.2.2.5) は, アーチ部材で $q = 1.2$, 上部工および支承で $q = 1.0$, いくつかの鉛直材については $q = 1.5$ とした。

これら条件において, 橋は橋軸方向に非常に柔軟であることがわかり, 結果として設計地震時の橋軸方向水平変位は 340 mm であった。この大きな変位は, 支承条件を橋軸方向固定としてある橋脚にとっては非常に不利な結果となった。そこで, 減衰力 2 000 kN の粘性ダンパーそれぞれ 2 基を両端支点到に設置し, 上部工に作用する水平力を減衰させるとともに, その水平力を頑強な橋台に伝達させることとした。ダンパーを考慮した非線形動的解析の結果, 橋軸方向の水平変位は 50 mm に低減された。

2.4 施 工

施工の第一段階として, アーチアバットを含むすべての基礎が建設された。続いて, 長さ 5 m のクライミングフォームを用いて河岸の橋脚を建設し, その後端部橋台を建設した。アーチリブは, 移動作業車を用いた張出し架設工法により施工した。施工ブロック長は 5.25 m で, 両アーチアバットから対称に施工した (図 - 3)。張出し架設時には斜吊材を配置するため, エンドポスト上に鋼製ピロンを設置し, バックステイを岩盤にロックアンカーした。

12 ブロックまでのアーチリブを施工中に, 上部工の格子部分をアバット背面で組み立てた。上部工の各鋼部材は現場までトラックで運ばれ, 溶接により接合された。両側の橋台からエンドポストまでの上部工の架設は, ピロンから仮設の斜材を配置するため, 残りのアーチリブ (13 ブロック以降) の施工に先立って行われた。上部工の架設には, 脚頭部に設置された特別な滑り装置と, 施工中の応力を小さくするために軽量鋼材により製作された手延べげたを用いた押し出し工法を採用した。押し出し完

了後, 上部工をジャッキダウンし, 支承に固定した。

次に, 格子桁上にプレキャスト床版を設置した (図 - 4)。中央支間部では主桁間に, 片持ち部では横桁間にプレキャスト床版を設置した。プレキャスト床版は, 橋軸方向と橋軸直角方向ともに場所打ちコンクリートにより接合した。場所打ち部となる主桁上および横桁上にはスタッドジベルを配置し, 床版と鋼主桁を一体化した。上記の手順により, 橋台 - エンドポスト間に複合構造の上部工が完成した (図 - 5)。



図 - 4 中間床版の設置



図 - 5 オーバーラップ鉄筋による片側接合部



図 - 3 クルカ橋の張出し施工状況



図 - 6 マスレニカ橋全景



図 - 7 クルカ橋全景

アーチ部分が完成後、仮設斜材とバックステイを撤去し、鉛直材を施工した。その後、上部工は西側から押出し架設され、最終的な支承位置にジャッキダウンされた。アーチ上部のすべての上部工は、橋台-エンドポスト間と同様に、プレキャスト床版と場所打ちコンクリートにより施工した。

3. 結 論

マスレニカ橋は1993年の内戦中に着工され、1997年に新しいアドリア高速道路における初の大型構造物として完成した。本橋梁は、ランドマークであると共に、勝利と独立の象徴となった(図-6)。クルカ川の渓谷を跨ぐクルカ橋は2003年に着工し、2005年に完成した(図

-7)。

これらのアーチ橋には、応力、ひずみ、腐食状況を長期に渡り計測可能なセンサーが設置されている。これらの計測データにより、橋梁の構造性能および耐久性能を把握し、将来の維持管理に利用する。

〔*：プレストレストコンクリート海外部会委員〕
雨宮 美子 (㈱ピーエス三菱)
池上浩太郎 (ピーシー橋梁 ㈱)
喜多 俊介 (鹿島建設 ㈱)
前川 敦 (首都高速道路 ㈱)
水谷亮太郎 (㈱ 銭高組)

【2011年4月18日受付】