

PASSERELLA PEDONALE SUL TORRENTE FRODOLFO BORMIO

Passerella pedonale sul Fiume Adda, Bormio. Ponte, progettazione, direzione lavori.

Committente

Comune di Bormio

Progetto, D.L. e Sicurezza

Studio Calvi Srl

Responsabili delle prestazioni:

Prof. Ing. Gian Michele Calvi, Ing. Matteo Moratti

Dati dimensionali

Lunghezza impalcato: 66 m

Numero campate: 1

Classi e categorie dei lavori

Ig, IXb € 670.000,00
(escluse opere di
fondazione)

Inizio progettazione Fine progettazione

2003

2005

Inizio lavori Fine lavori

2005

2005

Operazione di controllo e ritesatura del ponte 2012

Sintesi dell'intervento

Si descrive la progettazione della passerella pedonale sul torrente Frodolfo, nel comune di Bormio.

La passerella è stata progettata per connettere dal punto di vista urbanistico due zone del paese medioevale di Bormio separate dal torrente Frodolfo e da una strada statale. La passerella collega il centro storico, sito in corrispondenza della spalla ovest; con un'altra zona di Bormio, sempre di origine medioevale, in cui sorgono parecchi impianti di risalita che raggiungono i 3000 m che costituiscono un'importante attrazione turistica.

Dal punto di vista topografico la quota di sbarco della passerella sul lato est è solamente un paio di metri più alta della quota di partenza sul lato ovest. Ciononostante, prima dell'apertura del ponte, per raggiungere a piedi i due punti era necessario percorrere una discesa di alcuni metri, attraversare la strada statale e il torrente Frodolfo e risalire una ripida salita verso il punto di sbarco della spalla est. La realizzazione del ponte consente una marcata riduzione del tempo di percorrenza a piedi del percorso rendendolo più sicuro, inducendo così forti benefici alle attività commerciali, costituendo un forte disincentivo all'utilizzo dell'automobile, determinando una riduzione dell'inquinamento e dei consumi energetici.

Durante la fase di progettazione, l'impatto ambientale è stato valutato attraverso un software topografico utilizzato per la progettazione di sistemi di radiocomunicazione.



Sopra. Particolare di sommità dell'antenna e degli stralli. Ogni strallo è costituito da funi ad alta resistenza zincati a caldo. Le funi sono pre-tese con una forza di 1/3 del carico nominale di rottura prima del montaggio.

Nella pagina a fianco, sopra. Vista completa della passerella pedonale. L'impatto ambientale è stato ridotto grazie all'utilizzo di una passerella snella. L'antenna risulta essere vincolata a terra da undici funi sette longitudinali e quattro in direzione trasversale.

Filosofia di progetto e geometria

Le scelte progettuali sono state condizionate da vincoli di contorno:

1. La topografia e gli edifici esistenti consentivano la realizzazione di una singola pila sul lato ovest della passerella; sempre sul medesimo lato era possibile costruire un'autorimessa interrata in modo tale da offrire una massa di ancoraggio agli stralli;
2. L'inserimento ambientale e la presenza di un antico ponte ad arco in pietra, successivamente demolito, richiedevano una struttura leggera con una minima interferenza con il contesto;
3. I tempi di costruzione e le modalità costruttive dovevano essere pensati in modo da ridurre al minimo indispensabile la chiusura al traffico della strada statale.

La tecnologia adottata è di tipo strallato. Le strutture di fondazione e verticali non aumentano il rischio idrogeologico della zona. L'impatto ambientale è stato ridotto grazie all'utilizzo di una passerella snella, avente una lunghezza pari a 66 m e uno spessore di circa 300 mm. Il ponte risulta essere asimmetrica rispetto all'antenna di acciaio posta a circa 8 m dalla spalla ovest. L'antenna, a sua volta, risulta essere asimmetrica rispetto al piano verticale e orizzontale di circa 7 gradi di inclinazione. Tale inclinazione permette di ottimizzarne la distribuzione degli

sforzi e di eliminare i momenti flettenti nel pennone, così da risultare perfettamente compresso e coerente con il vincolo di cerniera alla base.

L'antenna è vincolata a terra da undici funi (diametro massimo di 52 mm), sette longitudinali e quattro in direzione trasversale. L'impalcato è formato da cinque conci prefabbricati realizzati con calcestruzzo ad alta prestazione ed è sostenuto da dieci coppie di funi sottili (22 – 28 mm di diametro) con un interasse di 6 m. ciascun segmento ha la medesima curvatura sia in pianta (300 m circa) sia in elevazione (1200 m circa) e la stessa lunghezza (12 m). La passerella è posta a una distanza dal piano stradale sottostante di 5 m, mentre a livello del fiume risulta essere di circa 10 m. La curvatura nel piano dell'impalcato contribuisce a contrastare le azioni orizzontali con un funzionamento ad arco, mentre nel piano verticale l'impalcato è libero di ruotare rispetto ad un asse trasversale in corrispondenza della spalla ovest. L'impalcato è collegato alla spalla est da concio di 6 m di lunghezza. Il segmento in calcestruzzo è connesso alla passerella attraverso una cerniera cilindrica e con un vincolo verticale e trasversale alla spalla medesima. Le due cerniere sono collegate a due dispositivi viscosi per fornire un ulteriore smorzamento verticale e aumentare così il comfort degli utenti.

Tecnologia

La fondazione dell'antenna risulta essere di tipo superficiale con una sezione rettangolare. L'antenna è semplicemente appoggiata su un plinto esterno di altezza di 3 m con una forma ottagonale. Tale elemento è confinato attraverso otto barre post-tese ad alta resistenza (di tipo bonded) a causa della elevata compressione e trazione presente.

I cinque conci dell'impalcato sono stati realizzati con calcestruzzo ad alta resistenza (C40/50) e autocompattante. I singoli conci sono formati da quattro travi continue unite attraverso a delle piastre in calcestruzzo armato poste al di sopra e al di sotto delle travi. Lo spessore di questi conci varia tra 280 mm sul lato est e 450 mm sul lato ovest a seguito dell'aumento progressivo degli sforzi di compressione nell'impalcato. Le estremità dei conci sono dotate di una coppia di dispositivi autocentranti in modo da garantire una continuità temporanea durante la fase di costruzione.

L'antenna è stata realizzata assemblando un unico tubo d'acciaio lungo 35 m (con diametro esterno pari a 812 mm) con un secondo elemento coassiale lungo 19 m (con diametro esterno variabile tra 850 mm e 1100 mm). I due elementi sono internamente collegati da sei costolature in acciaio. Il dispositivo di appoggio ha una capacità di compressione di 10.000 kN allo stato limite ultimo. Sotto i carichi gravitazionali è prevista una rotazione massima di 0.012 rad.

Ogni strallo è costituito da funi ad alta resistenza zincati a caldo. Le funi sono pre-tese con una forza di 1/3 del carico nominale di rottura prima del montaggio.

Metodo di costruzione

Si sono realizzati in opera solamente la fondazione dell'antenna, le spalle e le zavorre dei cavi d'ancoraggio dell'antenna, con un piccolo vantaggio economico dovuto alla contemporanea costruzione di un parcheggio interrato in adiacenza alla spalla ovest.

L'antenna, assemblata in officina, è stata trasportata di notte in un singolo pezzo e montata mediante l'utilizzo di due autogrù; nei tre giorni successivi è stato possibile montare i cinque conci prefabbricati. L'antenna è stata posizionata usando misurazioni topografiche e sostenuta longitudinalmente e trasversalmente da cavi ancorati a terra. Durante il posizionamento del primo e del secondo concio è stata utilizzata una gru per tenere l'antenna in posizione in modo da garantire l'equilibrio. La regolazione del profilo è stata ottenuta attraverso la post-tensione delle quattro funi per i singoli conci.

Durante l'assemblaggio dell'impalcato si sono sfruttati appoggi autocentranti posti all'estremità dei conci che sono stati successivamente inglobati nei giunti di sutura.

Il ponte è stato completato con una pavimentazione in alluminio e parapetti in acciaio. È stato previsto, inoltre, un sistema di riscaldamento elettrico sotto la pavimentazione per evitare la formazione di ghiaccio.

Modellazione della struttura

Sono stati sviluppati due modelli, il primo composto

da un'unica sezione di trave equivalente secondo la procedura di Wilson e Gravelle. La seconda modellazione risulta essere più accurata in quanto sono stati utilizzati sia elementi frame che elementi shell.

Il primo modello ha richiesto 82 elementi frame, mentre il secondo 377 elementi frame e 552 elementi shell. Ogni cavo è stato modellato da un unico elemento. In entrambi i casi sono stati implementati le fasi di realizzazione della passerella. Il comportamento dinamico locale di ogni cavo è stato valutato da modelli semplificati previsti dalle normative di Eurocodice 1 Appendice C.

Per valutare le accelerazioni verticali e orizzontali indotte dagli utenti sono state effettuate una analisi modale e una non lineare time history caricate con treni di carico.

Confronto tra modelli

Il confronto tra i due differenti modelli (modello a trave equivalente e modello shell) è ottenuto considerando i periodi di vibrazione e le masse partecipanti corrispondenti ai diversi modi di vibrare.

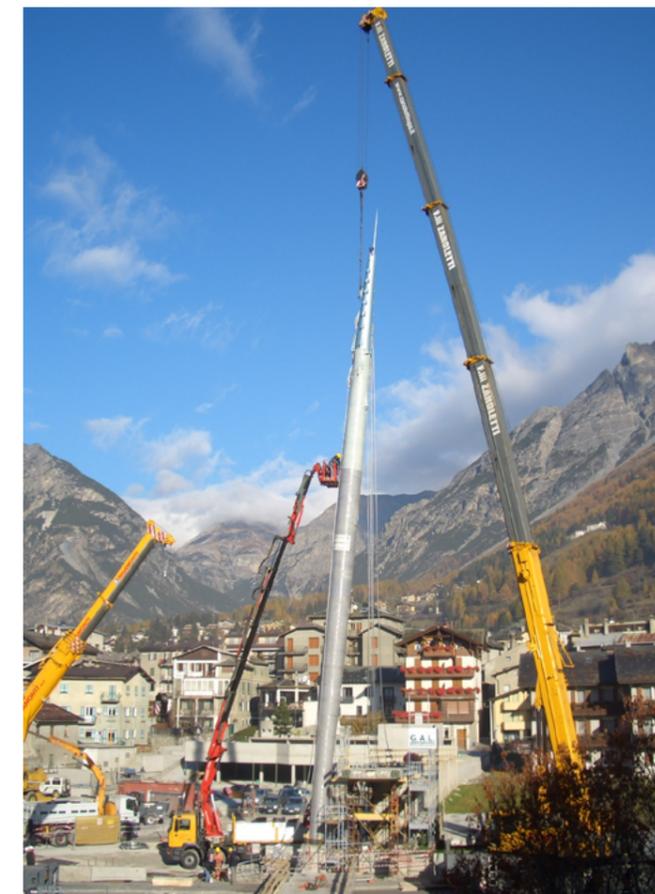
È stato osservato che per ottenere una massa partecipante totale del 90% in tutte le tre direzioni (x, y e z) sono necessari 31 modi per il modello a trave equivalente, mentre per il modello a shell 173 modi. Per le direzioni y e z, il 90% della massa partecipante è raggiunta al 60° modo di vibrare, mentre per la direzione x sono necessari molti più modi.

Prove in sito

È stata effettuata una prova di carico pseudostatica. Il concio incernierato e il quinto segmento sono stati caricati da serbatoi d'acqua (per una lunghezza di 12 m) alla fine di ottenere un carico gravitazionale di 7,5 kN per metro della passerella. Successivamente sono stati confrontati i risultati in termini di spostamento del ponte e della punta dell'antenna sperimentali e quelli ottenuti dal modello agli elementi finiti. Oltre la prova di carico pseudostatica sono state previste prove di vibrazione forzata durante le diverse fasi di costruzione per ottenere dati sperimentali sulla risposta dinamica della struttura.

Sono state applicati otto serie di accelerometri distribuiti lungo la struttura e sono stati utilizzati dei campionatori da 512 Hz per registrare la risposta della struttura. Oltre ad individuare la forma, gli spostamenti e le velocità sono stati registrati i valori di smorzamento. La prima sequenza di prove dinamiche ha fornito uno smorzamento equivalente leggermente superiore all'1%, confrontabile con il valore di 1.5% adottato per la progettazione. Un'ulteriore riduzione di accelerazione e di spostamento è stato ottenuto attraverso un ulteriore 1% di smorzamento fornito dagli elementi non strutturali (parapetti in acciaio e pavimentazione in alluminio).

Inoltre, i risultati delle analisi non lineari sviluppate in sede di progettazione sono stati confermati nel corso di alcune prove dinamiche condotte in sito nel corso delle quali l'eccitazione dinamica della passerella ha prodotto un'oscillazione dell'impalcato di ± 180 mm.



Nella pagina a fianco, sopra. Fasi di trasporto e sollevamento del pennone metalli e posizionamento su appoggio sferico. L'antenna è stata realizzata assemblando un unico tubo d'acciaio lungo 35 m (con diametro esterno pari a 812 mm) con un secondo elemento coassiale lungo 19 m (con diametro esterno variabile tra 850 mm e 1100 mm). I due elementi sono internamente collegati da sei costolature in acciaio.

Nella pagina a fianco, sotto. Vista della parte inferiore dell'impalcato. I cinque conci dell'impalcato sono stati realizzati con calcestruzzo ad alta resistenza (C40/50) e autocompattante. I singoli conci sono formati da quattro travi continue unite attraverso a delle piastre in calcestruzzo armato poste al di sopra e al di sotto delle travi.