

Erika Davini, Paolo S. Valvo – University of Pisa, Italy

Fabio Ricci – A.I.C.E. Consulting S.r.l., San Giuliano Terme, Pisa, Italy

Martijn Veltkamp – FiberCore Europe, Rotterdam, The Netherlands

Reza Haghani – Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden

IL PROGETTO SUREBRIDGE

Compositi con fibre di vetro e carbonio per il rinforzo sostenibile dei ponti

THE SUREBRIDGE PROJECT

Glass and carbon fibre composites for the sustainable refurbishment of bridges

Premessa

A causa del previsto aumento del volume di traffico in Europa, i ponti esistenti saranno soggetti ad azioni più severe nel prossimo futuro. Di conseguenza, la necessità di rinnovare queste infrastrutture, spesso strutturalmente carenti e obsolete, aumenterà notevolmente. Attualmente, le attività di costruzione e manutenzione relative ai ponti implicano procedure lunghe e costose, con un impatto negativo sul traffico e sul welfare in termini più ampi. In aggiunta al disturbo per gli utenti, le interruzioni del traffico e l'inquinamento, altri problemi sono legati all'uso inefficiente delle risorse, cioè di materiali ed energia, alla gestione dei rifiuti e al riciclaggio.

Il progetto SUREBridge

Nel contesto sopra descritto, il progetto di ricerca europeo SUREBridge – Sustainable Refurbishment of Existing Bridges (www.surebridge.eu) sta sviluppando un'innovativa tecnica di rinforzo per ponti di calcestruzzo armato e a struttura mista acciaio-calcestruzzo. L'elevata resistenza e rigidità dei materiali compositi sono sfruttate opportunamente per aumentare la capacità portante di ponti esistenti, riducendo al minimo i lavori di demolizione e la produzione di rifiuti.

Il progetto è cofinanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro attraverso la ERA-NET Infravation 2014 Call. Infravation coordina diverse Autorità preposte alla gestione delle infrastrutture stradali in Europa, oltre all'israeliana Netivei Israel e alla statunitense

Background

Due to the expected increase in the traffic volume in Europe, existing bridges will be subjected to more severe actions in the near future. Consequently, the need to refurbish these infrastructures, often structurally deficient and obsolete, will increase dramatically. At present, construction and maintenance activities relating to bridges imply costly and time-consuming procedures, with a negative impact on traffic flow and welfare in wider terms. In addition to disturbance to users, traffic disruption, and pollution, other issues are the inefficient use of resources, i.e. materials and energy, waste management, and recycling.

The SUREBridge project

Within the above described context, the European research project SUREBridge – Sustainable Refurbishment of Existing Bridges (www.surebridge.eu) is developing an innovative strengthening technique for reinforced concrete and steel-concrete bridges. The high strength and stiffness properties of composite materials are suitably exploited to increase the load-carrying capacity of existing bridge decks, while minimising demolition work and waste production.

The project is co-financed by the European Commission under the 7th Framework Programme through the ERA-NET Infravation 2014 Call. Infravation coordinates several road Authorities in Europe, in addition to the Netivei Israel and the US Federal Highway Administration.

The SUREBridge project started in October

Federal Highway Administration.

Il progetto SUREBridge è iniziato nell'ottobre 2015 e si concluderà a marzo 2018, per una durata complessiva di 30 mesi. Il progetto è coordinato dalla Chalmers University of Technology, Gothenburg, Svezia. I partner del progetto sono:

- FiberCore Europe, Rotterdam, Paesi Bassi, azienda specializzata nella produzione di strutture portanti rinforzate con fibre per applicazioni in architettura e nelle infrastrutture;
- AICE Consulting, Ghezzano (Pisa), Italia, società di ingegneria operante nella progettazione e nel controllo di edifici civili e infrastrutture;
- Università di Pisa, Italia, coinvolta nel progetto attraverso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale.

Uso combinato di pannelli di GFRP e laminati di CFRP

La soluzione innovativa fornita da SUREBridge prevede l'uso combinato di pannelli di materiale composito fibro-rinforzato con fibra di vetro (GFRP) e laminati di materiale composito fibro-rinforzato con fibra di carbonio (CFRP). I pannelli sandwich di GFRP vengono realizzati su misura ed installati sulla parte superiore della soletta di calcestruzzo armato del ponte esistente, mentre i laminati di CFRP sono applicati all'intradosso delle travi longitudinali (Figura 1). I pannelli di GFRP possono essere fabbricati della stessa larghezza o più larghi della soletta esistente, consentendo di allargare la sezione stradale se necessario. I laminati di CFRP sono pretensionati utilizzando una tecnica innovativa, che evita l'instaurarsi di picchi tensionali all'interfaccia tra calcestruzzo e CFRP e ritarda la delaminazione dei laminati stessi dal supporto.

I pannelli sandwich di GFRP sono prodotti da FiberCore Europe con la tecnologia brevettata InfraCore® Inside (Figura 2), simile all'iniezione sotto vuoto. Con questa tecnica è possibile ottenere una struttura robusta e leggera con resistenza aumentata a delaminazione, impatto, esplosione e fatica, tutti problemi che interessano altri pannelli sandwich di materiale composito disponibili in

2015 and will end in March 2018, for a total duration of 30 months. The project is coordinated by Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Partners of the project are:

- FiberCore Europe, Rotterdam, The Netherlands, a company specialising in the manufacture of fibre-reinforced load-bearing structures for both architecture and infrastructure;
- AICE Consulting, Ghezzano (Pisa), Italy, an engineering company operating in the design and testing of civil buildings and infrastructures;
- University of Pisa, Italy, involved in the project through the Department of Civil and Industrial Engineering.

Combined use of GFRP panels and CFRP laminates

The innovative solution provided by SUREBridge lays on the combined use of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) panels and carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) laminates. Tailor-made GFRP sandwich panels are installed on top of the existing reinforced concrete bridge slab, while CFRP laminates are applied to the bottom side of the longitudinal girders (Figure 1). The GFRP panels can be manufactured of the same width or wider than the existing deck, enabling to widen the road section if needed. The CFRP laminates are pre-stressed by using an innovative technique, which avoids stress peaks in the CFRP-concrete interface, thus preventing early delamination.

The GFRP sandwich panels are manufactured by FiberCore Europe with the InfraCore® Inside patented technology (Figure 2), comparable to vacuum infusion. It provides a strong, lightweight structure with integrated resistance to delamination, impact, blast, and fatigue, which are major issues affecting other commercially available composite sandwich panels. In this respect, it should be noted that fatigue and delamination are relevant failure modes for road bridges bearing repeated traffic loads with heavy wheel imprints. Low additional weights, specific design possibilities

commercio. In proposito, è opportuno notare che fatica e delaminazione sono modalità di crisi rilevanti per i ponti stradali che sono soggetti a carichi da traffico ripetuti e di elevata entità. I ridotti pesi aggiuntivi, la possibilità di progettazione specifica per il singolo ponte, la facilità di installazione e i bassi costi di manutenzione sono altre caratteristiche vincenti dei pannelli InfraCore® Inside e dell'intera tecnica SUREBridge.

La proposta SUREBridge comprende anche un innovativo metodo per l'introduzione graduale della pretensione nei laminati di CFRP. Grazie a uno speciale dispositivo sviluppato presso la Chalmers University of Technology (Figura 3), l'entità degli sforzi di taglio e peeling in corrispondenza dei punti di ancoraggio del laminato è mantenuta ad un livello ammissibile per l'adesivo e il substrato di calcestruzzo. Questa tecnologia supera la tendenza del laminato a delaminare già a bassi livelli di tensione, con fessurazioni orizzontali che si propagano dalle estremità del supporto di calcestruzzo. Va sottolineato che ciò viene ottenuto senza la necessità di ancoraggi meccanici, che in genere implicano diversi inconvenienti, come l'indebolimento degli elementi strutturali esistenti, le difficoltà di installazione e ispezione ed i costi aggiuntivi.

per single bridge, easy installation, and little maintenance costs are other winning features of the InfraCore® Inside panels and of the whole SUREBridge technique.

The SUREBridge proposal includes also an innovative stepwise method to introduce the pre-stressing force in the CFRP laminates. Thanks to a special device developed at Chalmers University Technology (Figure 3), the magnitude of the shear and peeling stresses at the laminate anchor points is kept to a level which can be tolerated by the adhesive and concrete substrate. This technology overcomes the tendency of the laminate to debond already at low stress levels, with horizontal shear cracks propagating from the concrete support ends. It should be stressed that this is achieved with no need for mechanical anchors, which typically imply different drawbacks, such as the weakening of existing structural members, installation and inspection difficulties, and extra costs.

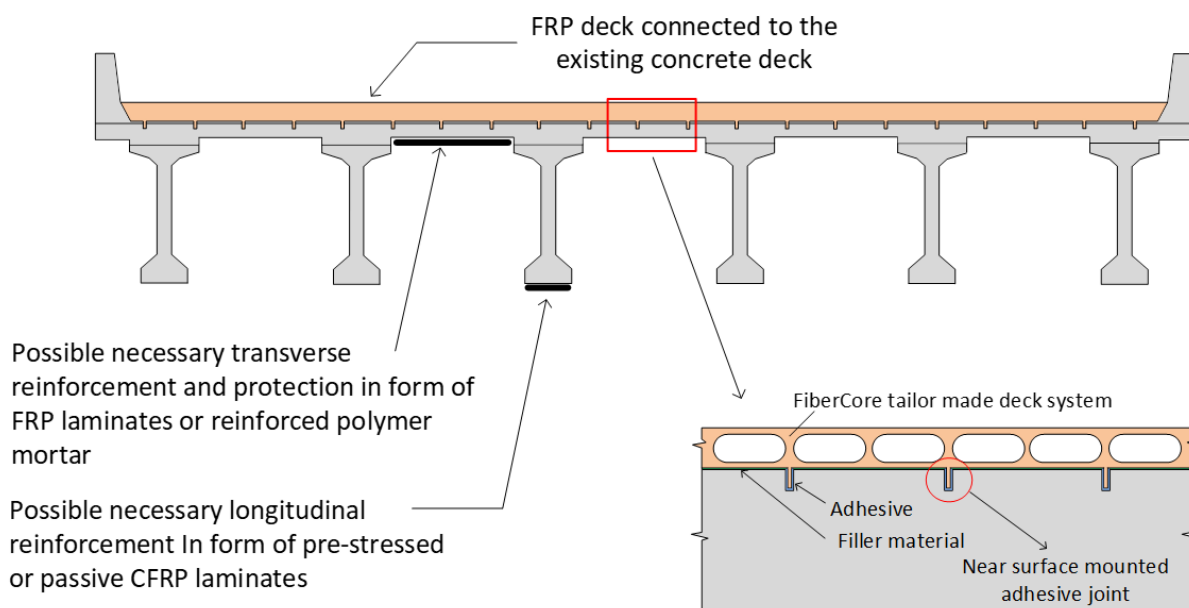


Fig. 1: La tecnica di rinforzo SUREBridge / SUREBridge strengthening technique

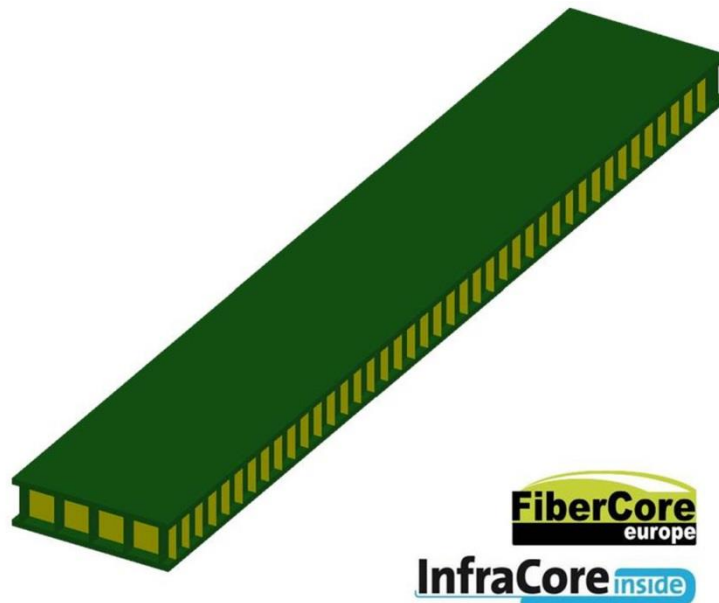


Fig. 2: Pannello di GFRP InfraCore® Inside / InfraCore® Inside GFRP panel

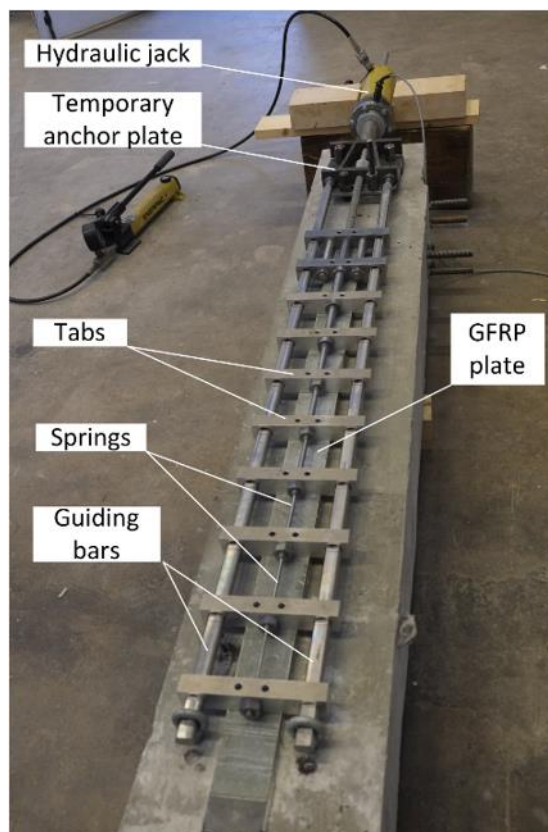


Fig. 3: Dispositivo di pretensione dei laminati di CFRP / CFRP laminate prestressing device

Un ponte caso studio

Per dimostrare l'efficacia e la fattibilità della tecnica proposta nelle applicazioni reali, è stato scelto come caso di studio un ponte esistente situato nel comune di San Miniato (Pisa), Italia (Figura 4). Il ponte, costruito nel 1968, ha una lunghezza di circa 60 m, suddivisa in quattro campate di 15 m ciascuna. Il ponte è composto da una soletta di

A case study bridge

To prove the effectiveness and feasibility of the proposed technique in real-life applications, an existing bridge located in the municipality of San Miniato (Pisa), Italy, was selected as a case study (Figure 4). The bridge, built in 1968, has a length of nearly 60 m, subdivided into four spans of 15 m each. The deck is composed of a 160 mm thick, cast-on-

calcestruzzo armato gettata in opera di 160 mm di spessore e quattro travi prefabbricate di calcestruzzo precompresso, alte 780 mm e distanti 1 m l'una dall'altra. Un'unica corsia di traffico larga 3 m è attualmente attraversata da veicoli a senso unico alternato (Figura 5). AICE Consulting ha svolto indagini in situ per valutare le condizioni attuali della struttura e dei suoi materiali costitutivi. L'analisi strutturale del ponte esistente ha dimostrato che la sua capacità portante corrisponde al 51% dei carichi da traffico prescritti dalle vigenti normative italiane.

L'intervento di rinforzo e di ampliamento previsto nello studio si prefigge lo scopo di adeguare il ponte agli standard previsti dalle normative attuali. La carreggiata del ponte viene allargata inserendo una corsia di marcia per i veicoli larga 3.5 m e due marciapiedi laterali larghi 1 m ciascuno (Figura 6).

Un modello agli elementi finiti del ponte rinforzato è stato analizzato utilizzando il software commerciale Straus7® (Figura 7). L'incremento della capacità portante ottenuto con la soluzione SUREBridge è stato valutato con un apposito software sviluppato nell'ambito del progetto stesso (Figura 8). Grazie all'utilizzo combinato di pannelli di GFRP e laminati di CFRP, la capacità portante del ponte può essere incrementata fino al 100% della domanda richiesta dalle normative attuali in termini di carichi da traffico.

site concrete slab and four prefabricated prestressed concrete girders, 780 mm high and 1 m distant one from another. A single, 3-m wide traffic lane is currently crossed by vehicles one way alternatively (Figure 5). AICE Consulting carried out on-site investigations to assess the current conditions of the structure and its constitutive materials. Structural analysis of the existing bridge showed that its load-carrying capacity corresponds to 51% of traffic loads prescribed by the current Italian regulations.

It was then decided to design a strengthening and widening intervention to make the bridge compliant with current standards. The traffic lane is brought up to 3.5 m in width and two lateral walkways are added to the bridge cross section (Figure 6). A finite element model of the strengthened bridge was analysed by using the commercial Straus7® software code (Figure 7). The increment in the load-carrying capacity obtained with the SUREBridge solution was evaluated with a dedicated software tool developed within the project (Figure 8). Thanks to the combined use of GFRP panels and CFRP laminates the load-carrying capacity of the bridge is expected to increase up to 100% of currently prescribed traffic loads.



Fig. 4: Ponte di San Miniato / San Miniato bridge

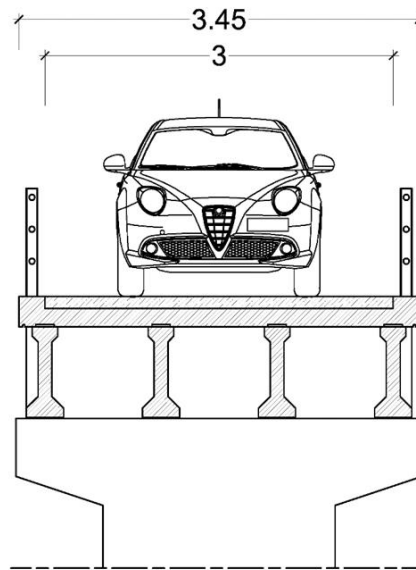


Fig. 5: Sezione trasversale attuale del ponte / Current bridge cross section

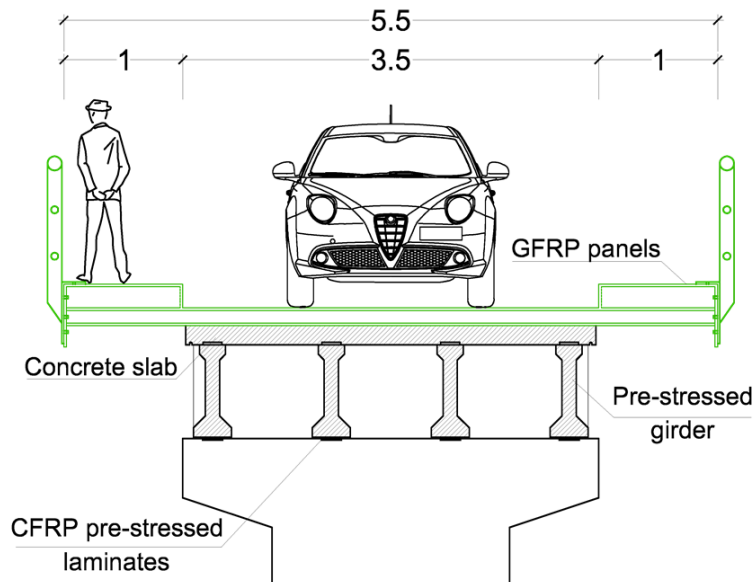


Fig. 6: Sezione trasversale rinforzata e allargata del ponte / Strengthened and widened bridge cross section

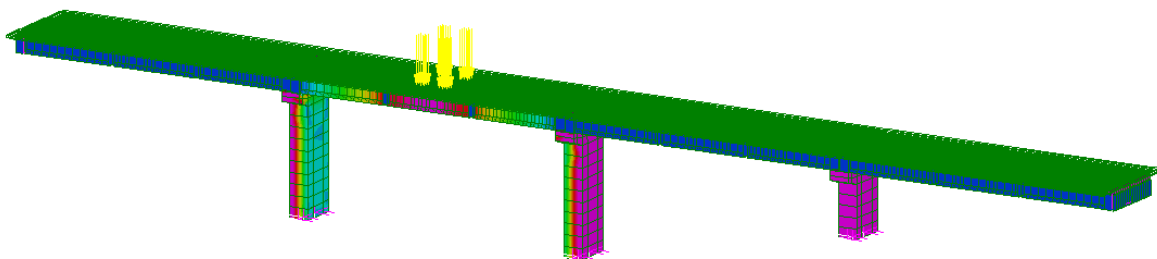


Fig. 7: Modello agli elementi finiti del ponte rinforzato / Finite element model of the strengthened bridge

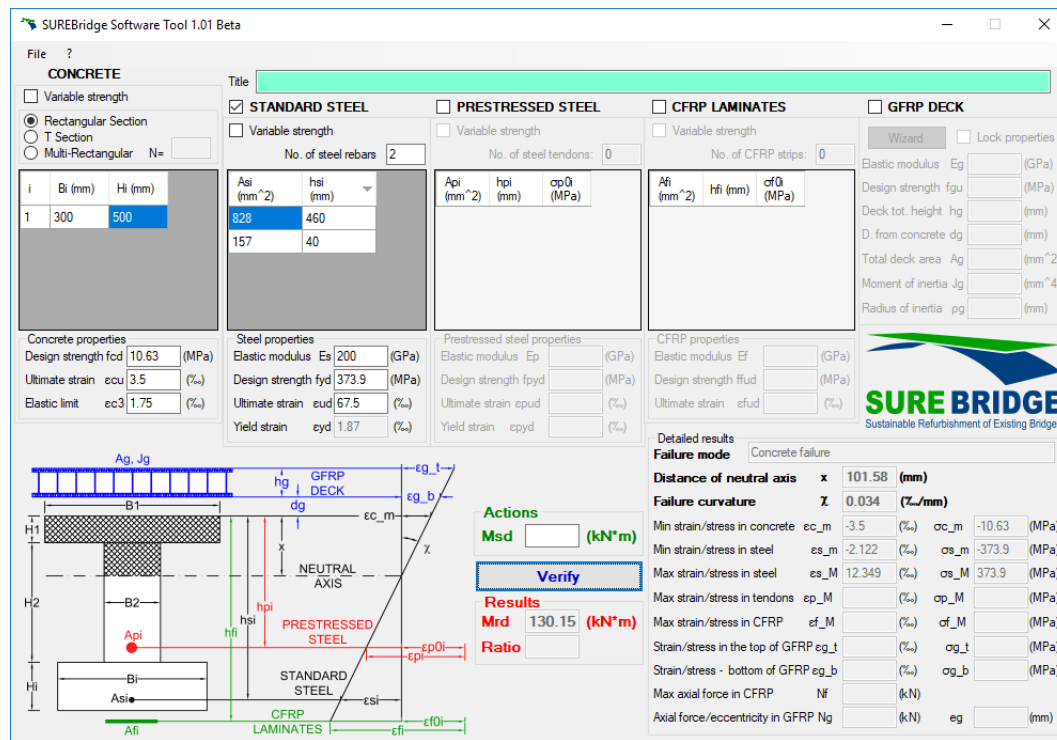


Fig. 8: Applicazione software SUREBridge / SUREBridge software tool

Prove di laboratorio su travi prototipo

Una chiara dimostrazione dell'elevata capacità di rinforzo della tecnica proposta è stata ottenuta attraverso prove in vera grandezza su travi prototipo di sezione trasversale a forma di T. Queste prove possono essere considerate rappresentative delle condizioni che si verificano nei ponti reali di calcestruzzo armato – come il ponte di San Miniato – poiché la sezione a T rappresenta una versione semplificata di una trave longitudinale con una soletta superiore collaborante. Nell'agosto 2017 quattro travi prototipo di 6 m di lunghezza (Figura 9) sono state testate a flessione su quattro punti nel laboratorio della Divisione di Ingegneria Strutturale del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale della Chalmers University of Technology.

In precedenza, nel luglio 2017 presso l'Università di Pisa sono state condotte analisi non lineari agli elementi finiti per ottenere previsioni teoriche sul comportamento strutturale di tali campioni. È stato realizzato un modello "a fibre" della trave prototipo, costituito mediante l'assemblaggio di piccoli elementi BEAM rappresentanti ideali fibre longitudinali. Sono stati sviluppati due modelli utilizzando il software Straus7®: una trave di calcestruzzo armato di riferimento (non

Laboratory tests on prototype beams

A clear demonstration of the high strengthening capacity of the proposed technique was given through full-scale tests on T-shaped cross-section prototype beams. These tests can be considered as representative of the conditions often occurring in real concrete bridges – as the San Miniato bridge – since the T-shaped cross section acts as a simplified version of a longitudinal girder with an upper collaborating slab. In August 2017, four 6-m long prototype beams (Figure 9) were tested under four-point bending in the laboratory of the Structural Engineering Division of the Department of Civil and Environmental Engineering at Chalmers University of Technology.

Earlier in July 2017, theoretical predictions of the structural behaviour of such specimens were carried out by means of non-linear finite element analyses at the University of Pisa. A fibre-modelling approach was used, whereas the prototype beam is represented as an assemblage of small BEAM elements representing ideal longitudinal fibres. Two models were developed by using the software Straus7®: a reference (not strengthened) reinforced concrete beam (Figure 10) and a beam strengthened with GFRP and CFRP (Figure 11).

rinforzata) (Figura 10) e una trave rinforzata con GFRP e CFRP (Figura 11).

Le analisi non lineari sono state condotte con incrementi di carico progressivi e appropriati per ottenere le curve teoriche carico-inflessione, successivamente confrontate con le curve sperimentali ottenute dalle prove di laboratorio. È stata ottenuta una ottima corrispondenza tra le previsioni teoriche e i risultati sperimentali sia per la trave prototipo non rinforzata (Figura 12) sia per quella rinforzata (Figura 13). A tale riguardo, è opportuno sottolineare che i modelli agli elementi finiti non sono stati calibrati con i risultati delle prove sperimentali, che sono state condotte un mese dopo le simulazioni dei test.

The non-linear analyses were conducted with progressive and appropriate load increments to obtain the theoretical load-deflection curves, which were later compared with the experimental curves obtained from the laboratory tests. A very good matching between the theoretical predictions and experimental results was obtained for both the not strengthened (Figure 12) and strengthened (Figure 13) prototype beams. In this respect, it should be stressed that the finite element models were not calibrated against the results of the experimental tests, which were conducted one month later than the simulated tests.



Fig. 9: Prova di laboratorio su una trave prototipo rinforzata / Laboratory test on strengthened prototype beam

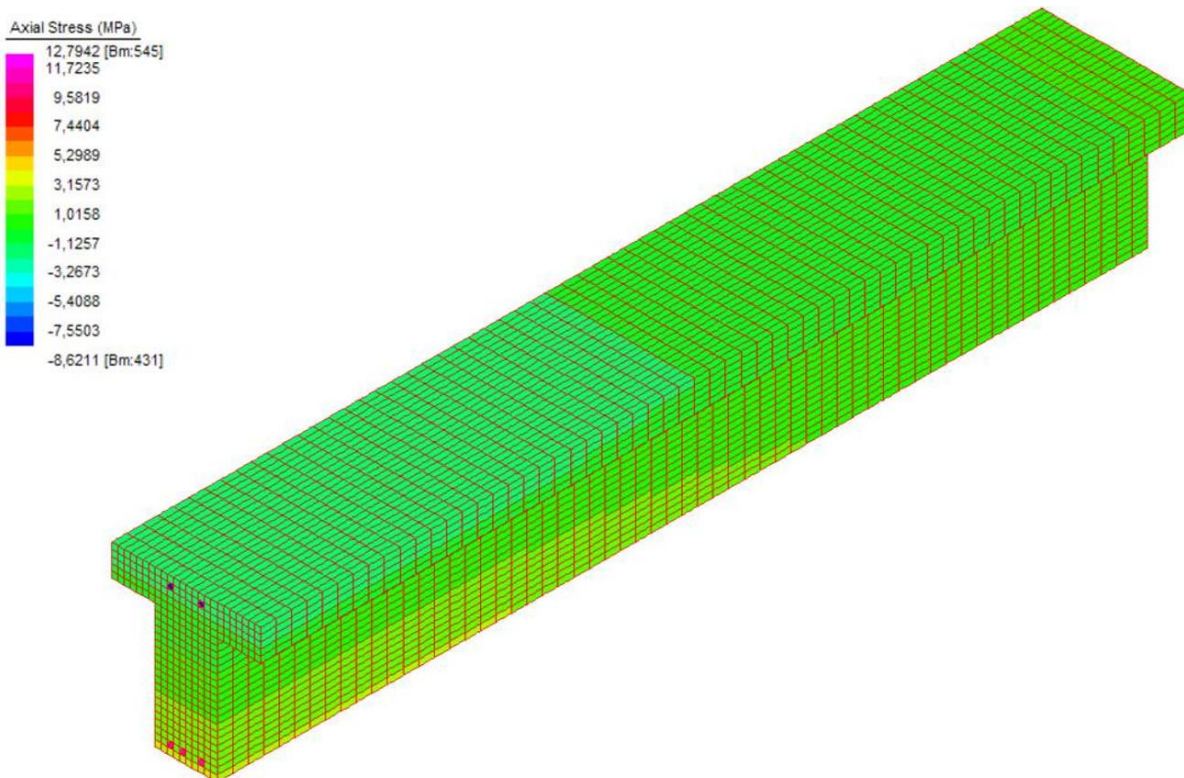


Fig. 10: Modello agli elementi finiti di una trave prototipo non rinforzata / Finite element model of not strengthened prototype beam

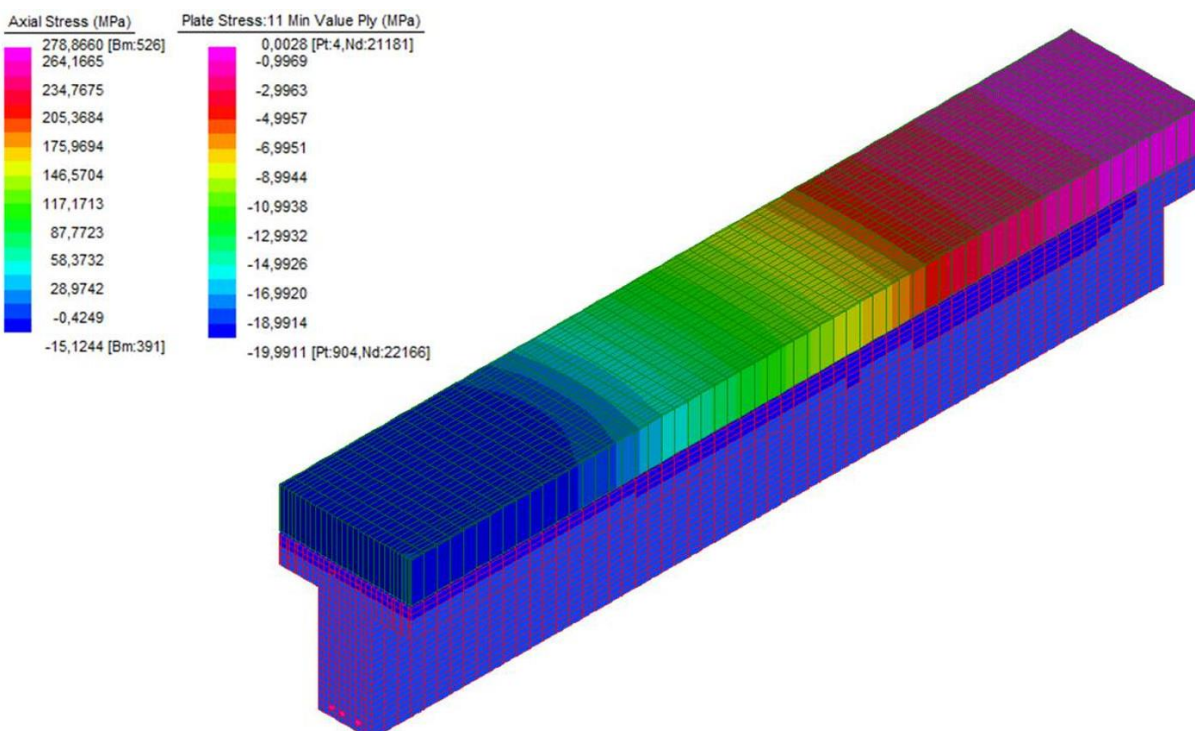
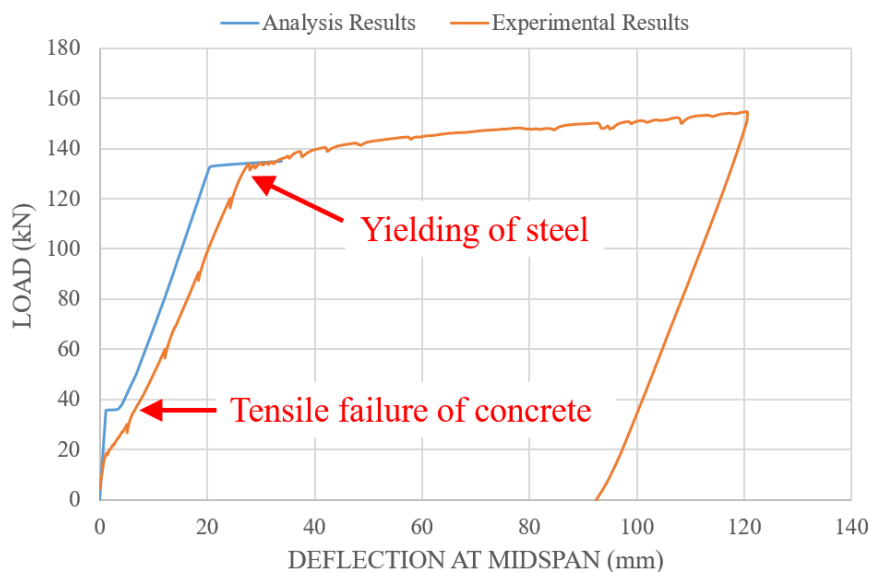


Fig. 11: Modello agli elementi finiti di una trave prototipo rinforzata / Finite element model of strengthened prototype beam

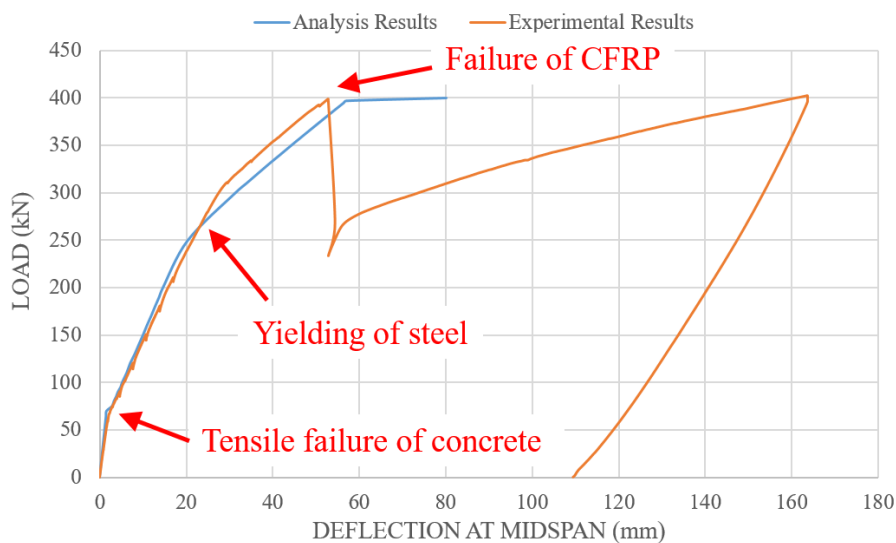
Specimen 1 – Not Strengthened



Theoretical failure load: $F_u = 126 \text{ kN}$
 Experimental failure load: $F_u = 135 \text{ kN}$

Fig. 12: Curva carico-spostamento di una trave prototipo non rinforzata / Load-deflection of not strengthened prototype beam

Specimen 3 – Strengthened with CFRP+GFRP



Theoretical failure load: $F_u = 380 \text{ kN}$
 Experimental failure load: $F_u = 397 \text{ kN}$

Fig. 13: Curva carico-spostamento di una trave prototipo rinforzata / Load-deflection of strengthened prototype beam

Conclusioni

La tecnica sviluppata nell'ambito del progetto SUREBridge può rappresentare una soluzione sostenibile ed efficace per il risanamento di ponti di calcestruzzo armato e a struttura mista acciaio-calcestruzzo. La potenzialità della

Conclusions

The technique developed within the SUREBridge project can represent a sustainable and effective solution for the refurbishment of concrete and steel-concrete bridges. The potentiality of the proposed

soluzione proposta è stata dimostrata attraverso l'analisi strutturale di un ponte caso studio. Il punto chiave della tecnica proposta risiede nell'uso combinato di pannelli di GFRP, installati sulla parte superiore del ponte esistente, e laminati di CFRP pretensionati, applicati all'intradosso delle travi longitudinali. L'uso separato di laminati di CFRP o pannelli di GFRP potrebbe in linea di principio consentire di raggiungere lo stesso livello di capacità portante, ma con problemi rilevanti come la necessità di pannelli molto spessi o di un numero eccessivo di laminati. L'eccellente capacità di rinforzo dell'applicazione combinata di CFRP e GFRP è stata ulteriormente dimostrata attraverso prove di laboratorio su travi prototipo in vera grandezza, i cui risultati sono stati anche previsti con successo attraverso analisi non lineari agli elementi finiti.

Ringraziamenti

Si ringrazia il supporto finanziario del 7° Programma Quadro attraverso la ERA-NET Plus Infravation 2014 Call.

solution has been demonstrated through the structural analysis of a case study bridge. The key of the technique is the combined use of GFRP panels, installed on the top of the existing deck, and pre-stressed CFRP laminates, applied to the bottom of the longitudinal girders. Separate use of CFRP laminates or GFRP panels alone could in principle enable reaching the same load-carrying capacity, but with major problems such as the need for very thick panels or an excessive number of laminates. The excellent strengthening capacity of the combined CFRP-GFRP application was further demonstrated through laboratory tests on full-scale prototype beams, whose results were also successfully predicted through non-linear finite element analyses.

Acknowledgements

Financial support from the 7th Framework Programme through the ERA-NET Plus Infravation 2014 Call is gratefully acknowledged.