

STUDIO NUMERICO SPERIMENTALE DI UN SISTEMA SISMO RESISTENTE REALIZZATO MEDIANTE ELEMENTI TRALICCIATI MISTI ACCIAIO-CALCESTRUZZO

Claudio AMADIO¹Lorenzo MACORINI¹Giuseppe SURACI²Sveva SORGON¹¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Trieste² Ing. libero professionista in Udine**Keywords:** Hybrid System, Steel and Concrete, Truss Joists, Prefabricated Beams.

ABSTRACT

In the paper a hybrid reinforced concrete system, made of steel trusses encased in reinforced concrete members, is analysed. Such a system can be used for both columns and beams either in cast-in-place or in precast constructions. The results achieved in an experimental-numerical investigation carried out at the University of Trieste are shown. The monotonic behaviour up to collapse of hybrid beams and the cyclic behaviour of beam-to-column connections have been investigated experimentally. In particular two beams and a beam to-column connection have been analysed. The achieved results have showed as these new composite elements can guarantee advanced structural performance even when employed in seismic-resistant frames.

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'ingegneria strutturale c'è sempre stato lo sforzo volto all'individuazione di sistemi costruttivi innovativi in grado di migliorare le prestazioni in termini di costi e di capacità portanti. Le travi Prefabbricate Reticolari Miste, definite anche come travi PREM, rappresentano sicuramente uno di questi importanti sistemi. Esse offrono il vantaggio della prefabbricazione tipico delle costruzioni metalliche, che consente una forte riduzione dei tempi di esecuzione, senza rinunciare ai vantaggi del c.a. nel quale il calcestruzzo contribuisce a migliorare la rigidità, la funzionalità e la resistenza della struttura [1]. A partire dalla nota trave REP, ideata dall'Ing. Leone più di quaranta anni fa [2], con i continui sviluppi incessantemente verificatisi [1], le travi PREM costituiscono, infatti, un importante sistema a cavallo tra quello delle strutture in c.a. e quello delle strutture composte classiche acciaio-calcestruzzo, caratterizzato da prerogative proprie di calcolo e di comportamento [3].

Queste strutture, che hanno avuto un notevolissimo impiego, soprattutto in ambito nazionale, sono state fino ad oggi utilizzate principalmente negli orizzontamenti degli edifici con la funzione di sopportare i carichi verticali, affidando l'assorbimento dei carichi orizzontali ad opportuni sistemi di controvento. Con l'avvento delle più recenti normative e la classificazione dell'intero territorio nazionale come sismico, risulta ora sempre più rilevante individuare nuove tipologie costruttive, o di adeguare quelle esistenti, con lo scopo di assolvere direttamente, in modo parziale o completo, la funzione di assorbire anche le azioni orizzontali. Questo problema è già stato in passato parzialmente affrontato in ambito nazionale con degli studi atti ad adeguare il comportamento della trave REP [4, 5] o di altri sistemi esistenti [6] ad un uso anche sismico. In numero non trascurabile sono state anche le pubblicazioni, per lo più in ambito nazionale, che hanno focalizzato alcune delle problematiche tecnologiche e testato nuove soluzioni che di fatto rispondevano ad esigenze di miglioramento del

prodotto commerciale [1], mentre in ambito internazionale sono stati effettuati alcuni interessanti studi sul comportamento del nodo trave colonna [7,8] o sulla trave [9] senza pervenire all'individuazione di un sistema costruttivo appositamente pensato per un utilizzo in ambito sismico, alternativo a quello dei telai in c.a. e dei telai composti acciaio-calcestruzzo che già trovano vasta applicazione. Con lo scopo di fornire una possibile risposta in questa ottica progettuale, nel presente lavoro, dopo una schematica presentazione delle caratteristiche salienti del nuovo sistema costruttivo, si presentano i primi risultati di uno studio sperimentale riguardante il comportamento di elementi tralicciati misti acciaio-calcestruzzo di nuova concezione, appositamente pensati per un utilizzo sismico. Il nuovo sistema costruttivo consente la realizzazione di una struttura parzialmente prefabbricata ad ossatura portante intelaiata, atta ad assorbire sia i carichi verticali che orizzontali con le stesse prerogative di quelli misti o in calcestruzzo armato. Particolarmente importante per il funzionamento d'insieme risulta il comportamento del nodo trave colonna e della trave in prima e seconda fase. Nel lavoro si riportano i risultati sperimentali ottenuti su questi elementi, che evidenziano le importanti potenzialità del sistema in un'applicazione sismica.

Il nuovo sistema costruttivo, concepito dallo Studio Suraci di Udine, si basa su uno schema di struttura parzialmente prefabbricata ad ossatura portante intelaiata reticolare mista in acciaio-calcestruzzo. Esso consiste nell'assemblaggio di elementi lineari quali travi e pilastri, collegati in opera mediante saldatura di opportune parti metalliche di collegamento, e getto integrativo di calcestruzzo.

Le caratteristiche del sistema sono schematicamente indicate in figura 1. I singoli elementi sono costituiti da tralici scatolari ottenuti dall'assemblaggio, mediante calastrelli (Fig. 1), di due tralici piani, ciascuno dei quali è costituito da due correnti paralleli (formati da due angolari), mutuamente collegati con aste di parete inclinate (tondi lisci).

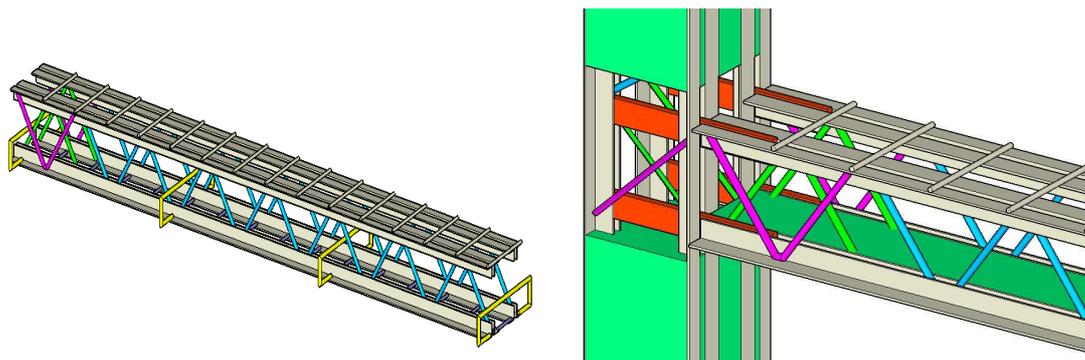


Fig. 1 Traliccio metallico per la trave e collegamento nodale trave - colonna.

L'assemblaggio dei vari elementi che costituiscono il traliccio metallico è ottenuto mediante giunzione saldata con processo automatico su appositi banchi di lavoro. Come evidenziato in figura 1, i collegamenti nodali fra gli elementi scatolari, atti a formare i telai, si realizzano mediante piatti metallici saldati che trovano posto negli interspazi tra le coppie di angolari che costituiscono i quattro correnti posti ai vertici delle sezioni trasversali. Il sistema metallico viene parzialmente inglobato in un getto prefabbricato di calcestruzzo in modo da realizzare, una volta effettuato il getto integrativo finale, dei sistemi con trave fuori spessore o in spessore di solaio.

2 PROVE SPERIMENTALI

In questa prima fase della ricerca, al fine di comprendere il comportamento di questo sistema costruttivo, sono stati realizzati due campioni di trave per lo studio della stessa in prima e seconda fase e un campione per lo studio del nodo esterno trave-colonna.

2.1 Trave in prima fase

La prima trave analizzata è costituita da un traliccio scatolare integrato parzialmente con un getto di calcestruzzo in modo da realizzare un sistema rappresentativo della prima fase di costruzione, cioè prima del getto di completamento.

Ognuno dei due tralicci verticali è composto da:

- corrente superiore: angolare esterno 40x50x5 e interno 50x50x6 mm
- corrente inferiore: due angolari 50x50x6 mm
- aste di parete: diametro 18 mm

I due tralicci piani sono mutuamente collegati con calastrelli orizzontali, costituiti da barre di diametro 12 mm. Una volta assemblati i due tralicci, ad essi sono saldate delle staffe di diametro 8 mm a chiusura del getto di calcestruzzo.

Il getto di calcestruzzo che integra la struttura metallica è posizionato nella parte inferiore della trave, a filo dei profilati inferiori. La sezione trasversale del getto ha dimensione 500x120 mm.

La trave presenta due blocchi di conglomerato posti ai terzi della trave, in prossimità del punto di applicazione del carico, con la funzione di diffondere il carico sulla soletta di calcestruzzo sottostante durante la prova. Le prove effettuate sui materiali hanno consentito di effettuare una corretta interpretazione dei risultati. La prova a compressione è stata eseguita su nove campioni cubici di lato 15 cm. La resistenza a trazione è stata determinata mediante prova brasiliana su cilindri di diametro 15 cm. Ogni prova è stata effettuata su tre campioni. I risultati sono riportati in tabella 1 per tutti e tre i campioni analizzati.

Tabella 1 Resistenza a compressione e a trazione del calcestruzzo.

	Classe Cls Rck	Resistenza cilindrica media (Mpa)	Resistenza a trazione (Mpa)
Trave soletta parziale	500	50.9	4.15
Trave soletta piena	350	44.69	4.16
Nodo trave - colonna	350	45.63	4.78

Le prove sugli acciai da carpenteria sono state condotte su 3 provini, estratti dagli angolari, aventi ciascuno dimensioni trasversali di 4.7x20mm. In tabella 2 sono riportati i risultati delle prove.

Tabella 2 Resistenza a trazione acciaio strutturale angolari.

Tipo di sezione (mm)	Sezione (mmq)	fsy (Mpa)	fsu (Mpa)	At (%)
4.7x20	94	422	568	28

2.1.1 Condizioni di vincolo e di carico

La trave, avente una lunghezza di 6 metri, è stata appoggiata su due dispositivi metallici atti a simulare uno il vincolo di cerniera, l'altro il vincolo di carrello secondo lo schema statico di trave in semplice appoggio. I carichi sono stati applicati mediante due martinetti idraulici a controllo di forza ai terzi della luce. Lo schema statico è riportato in figura 2.

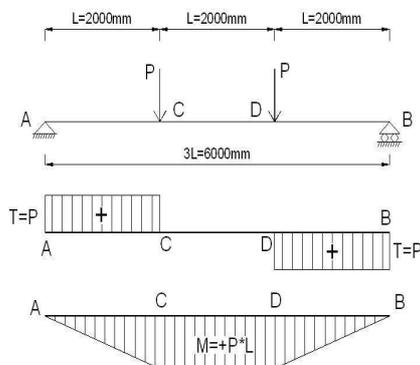


Fig. 2 Schema statico per le due travi testate.

2.1.2 Strumenti di misura

Per la rilevazione sperimentale dei risultati, le misurazioni condotte hanno riguardato sia le deformazioni dell'acciaio nelle aste diagonali di estremità e nei profilati angolari in mezzeria, mediante strain-gauges, sia la freccia della trave in mezzeria e ai terzi della sua luce, tramite trasduttori rotativi (Fig. 3).

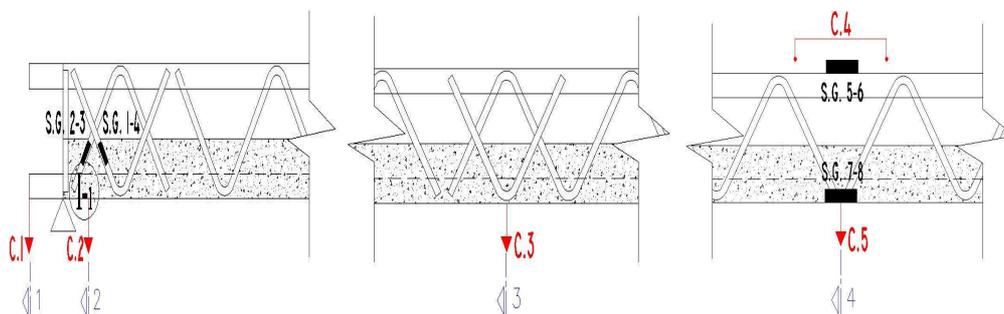


Fig. 3 Posizionamento strain-gauges e trasduttori all'estremità, ai terzi della lunghezza e nella mezzeria della trave.

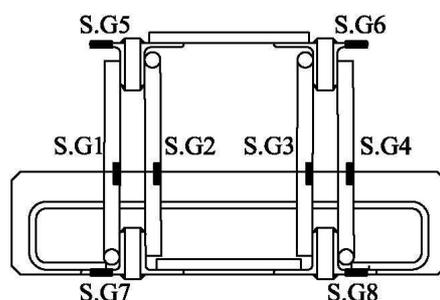


Fig. 4 Posizionamento strain-gauges aste di parete, angolari superiori e inferiori in mezzeria.

Con riferimento alla figura 3, la sezione 1, posta all'estremità del provino, contiene uno dei due trasduttori rotativi (C.1) atti a determinare, confrontando i dati con quelli forniti dal trasduttore in sezione 2 (C.2), la rotazione di estremità. La sezione 2 contiene al suo interno un inclinometro (I.1) e quattro *strain-gauges* (fig. 4), due su ogni lato della trave, sull'asta di parete inclinata esterna e in quella interna. L'inclinometro è posizionato sulla parete laterale del conglomerato cementizio e misura la rotazione dell'estremità della trave. Sulla sezione 3, posta ai terzi della trave (fig. 3), è stato fissato un trasduttore rotativo (C.3) nella faccia inferiore del calcestruzzo, allo scopo di determinare la freccia di tale punto. Nella sezione 4 (fig. 3), corrispondente alla mezzeria dell'elemento, sono presenti due trasduttori rettilinei, un trasduttore rotativo e quattro *strain-gauges*. I trasduttori rettilinei (C.4) sono posizionati sull'estradosso della soletta allo scopo di determinare l'accorciamento della soletta di calcestruzzo. I trasduttori rotativi (C.5) hanno il compito di determinare la freccia in mezzeria e sono posizionati nella parte inferiore della soletta.

2.1.3 Descrizione della prova

Mediante due martinetti idraulici, posti ai terzi della luce, la struttura è stata sollecitata imponendo degli spostamenti, uguali a tre a tre, crescenti, in modo da determinare la risposta ultima del sistema, come si evince dal grafico di figura 5. La rottura del campione è avvenuta per un carico, rilevato in ciascun martinetto, pari a 102 kN (fig. 6, 7). In corrispondenza di questo valore si sono riscontrati dei fenomeni di instabilità locale negli angolari superiori (Fig. 8), che hanno comportato una limitata duttilità del sistema, come visibile nel diagramma carico-freccia in mezzeria di figura 6. La curva riportata presenta un andamento iniziale pressoché lineare, al quale fa seguito una rapida riduzione di rigidità dovuta allo snervamento dei correnti metallici inferiori e superiori del traliccio. L'instabilità locale del corrente superiore si è verificata per uno spostamento di circa 100 millimetri.

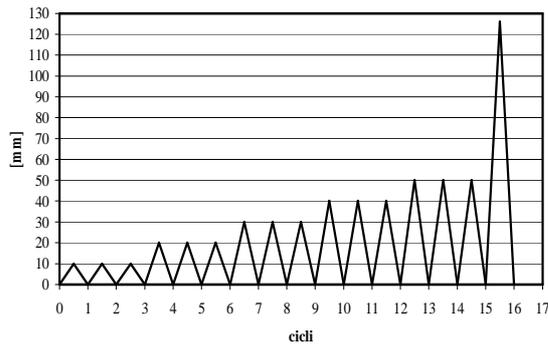


Fig. 5 Storia di spostamento trave in prima fase.

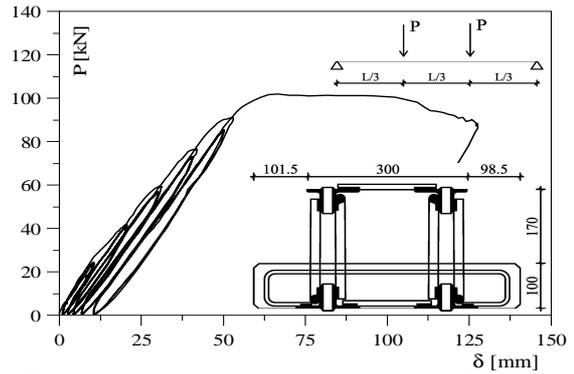


Fig. 6 Diagramma freccia mezzeria/carico sul martinetto.



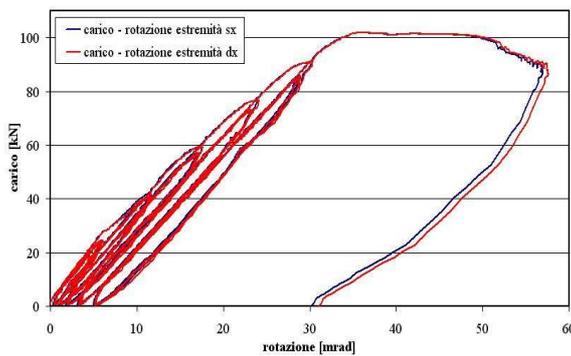
Fig. 7 Trave con soletta parziale al collasso.



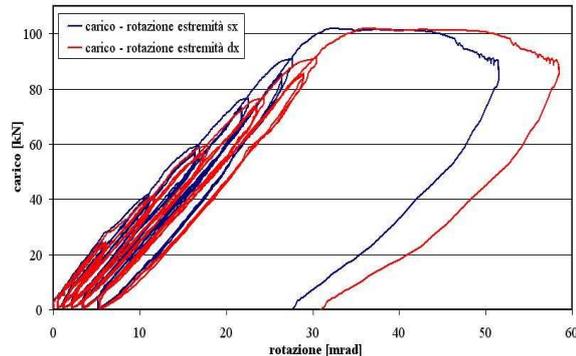
Fig. 8 Instabilità locale corrente compresso.

Il carico ultimo coincide con quello di plasticizzazione della sezione (Il momento plastico teorico della sezione è di 204 kNm, corrispondente a un carico ultimo di 102 kN).

Per la valutazione della rotazione nelle estremità della trave sono stati usati due inclinometri. Per controllare il loro funzionamento sono stati posizionati anche due coppie di trasduttori rettilinei che, misurando la freccia lungo due punti separati da una distanza nota, permettono di calcolare l'angolo di rotazione del provino. Nelle figure 9a e 9b viene diagrammato l'andamento carico-rotazione per entrambi gli estremi della trave. Come si nota il loro andamento è molto simile.



(a) Carico - rotazione inclinometri.



(b) Carico - rotazione trasduttori rotativi.

Fig. 9 Carico rotazione agli estremi della trave in prima fase.

Anche i dati forniti dagli *strain gauges* si sono rivelati attendibili e nessuno dei rilevatori è andato fuori uso. In figura 10a sono diagrammati, in funzione del carico, i risultati ottenuti in termini di deformazione in corrispondenza delle aste di parete poste all'estremità della trave. Dai grafici si può osservare che sotto l'azione del carico le deformazioni locali delle due aste di parete presentano

segno opposto. L'asta di parete esterna (S.G1, 4), è risultata tesa mentre quella interna compressa (S.G2, 3). Per tutta la durata della prova l'acciaio di entrambe le aste si è mantenuto in campo elastico, con valori ultimi di deformazione molto simili tra loro. In figura 10b sono riportati i risultati negli strain gauges posti nella sezione di mezzeria. Come si può notare, i correnti superiori ed inferiori incominciano a snervare per un carico medio inferiore al carico massimo (circa il 95%). Da questo momento in poi, le deformazioni aumentano notevolmente fino a causare, nel corrente compresso, il distacco dello *strain gauges* a causa del fenomeno di imbozzamento locale. L'aspetto fessurativo (Fig. 7), è stato caratterizzato dall'apertura di micro fessure, ad un interasse circa pari all'altezza della soletta, che si sono mantenute stabili fino a quando gli elementi del traliccio sono rimasti in campo elastico. Solo in prossimità del collasso le fessure si sono aperte, con un'ampiezza massima attorno al millimetro.

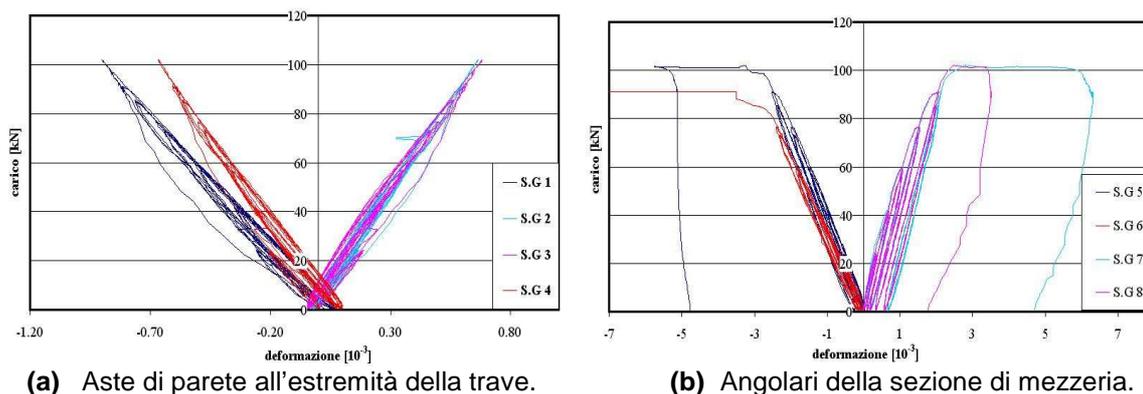


Fig. 10 Deformazioni strain gauges trave in prima fase.

2.2 Trave in seconda fase

La seconda trave analizzata è caratterizzata da un sistema metallico analogo a quello della prima, completamente integrato in un getto di calcestruzzo in modo da schematizzare il comportamento della trave reticolare mista in seconda fase (fig. 11). Le condizioni di vincolo e di carico, e la strumentazione del provino rispecchiano completamente quello della trave in prima fase (fig. 12, 13). Anche in questo caso sul provino sono stati imposti degli spostamenti tramite una coppia di martinetti idraulici secondo la storia di spostamento riportata in figura 12.



Fig. 11 Trave con soletta piena al collasso.

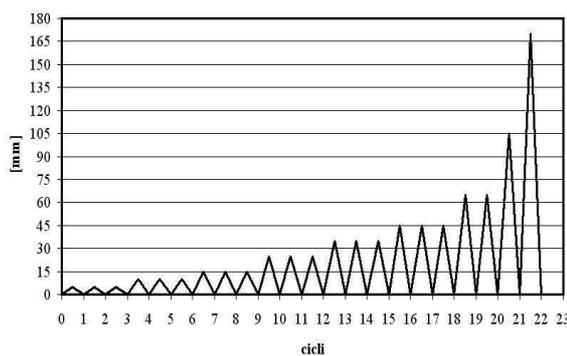


Fig. 12 Storia di spostamento per la trave con soletta piena.

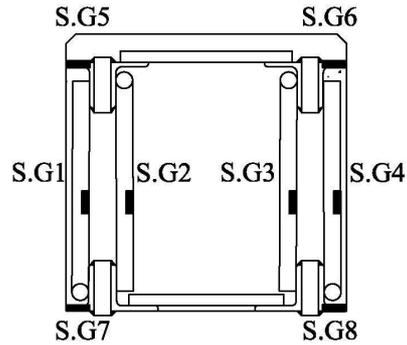


Fig. 13 Posizionamento strain gauges trave in seconda fase: sezione tipo.

La rottura del campione è avvenuta per un carico, rilevato in ciascun martinetto, pari a 134 kN. Per tale valore si è riscontrato lo schiacciamento del calcestruzzo superiore con l'espulsione del relativo copriferro (fig. 14). Al contrario di quanto successo in precedenza, gli angolari del traliccio metallico hanno raggiunto la completa plasticizzazione senza instabilizzare.

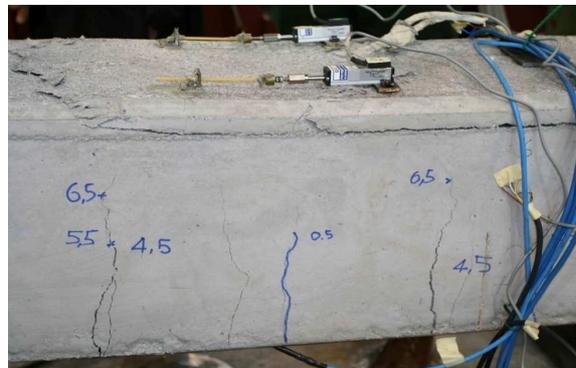


Fig. 14 Particolare dello stato fessurativo e dell'espulsione del copriferro al collasso.

Per valutare la rotazione nella zona di estremità della trave sono stati posizionati due inclinometri. Anche in questo caso, per controllare il loro funzionamento sono stati inseriti due coppie di trasduttori rettilinei che, misurando la freccia lungo due punti separati da una distanza nota, hanno permesso di calcolare l'angolo di rotazione del provino. In fig. 15 si evidenzia l'andamento carico-rotazione per entrambi gli estremi della trave. Il loro andamento è praticamente coincidente, tranne per gli ultimi cicli di carico in cui gli spostamenti rilevati dai trasduttori sono andati fuori scala.

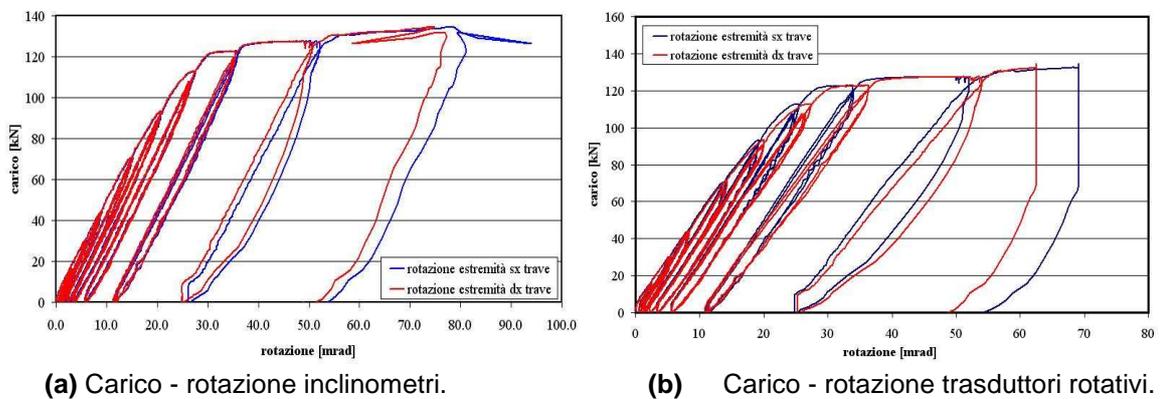


Fig. 15 Carico rotazione agli estremi della trave in seconda fase.

In figura 16a sono riportate le deformazioni lette negli strain gauges posti nelle aste di parete. L'asta esterna risulta compressa mentre quella interna tesa. L'acciaio di entrambe le aste si è mantenuto in campo elastico fornendo dei valori ultimi di deformazione molto simili tra loro.

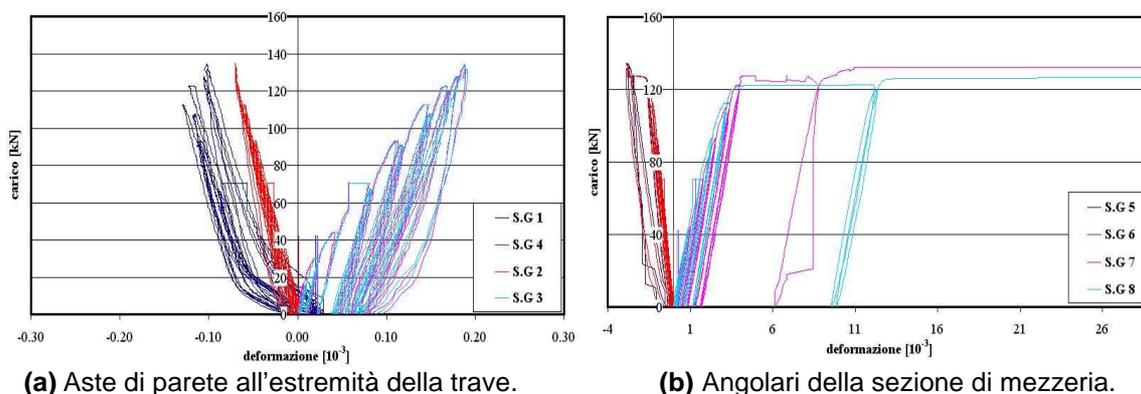


Fig. 16 Deformazioni strain gauges trave in seconda fase.

Per quanto riguarda gli strumenti posti nella mezzeria del traliccio, il loro comportamento viene riportato nella figura 16b. Come si può osservare, il corrente superiore risulta compresso e ad un carico di circa 125 kN (93% del carico massimo), comincia a snervare, entrando in campo plastico. Le deformazioni da questo punto non sono state rilevanti per il sopraggiungere della crisi della trave dovuta allo schiacciamento del calcestruzzo nel quale il distacco del copriferro è avvenuto per una deformazione attorno al 2.5‰. Il corrente inferiore risulta invece teso e lo snervamento incomincia ad un valore più basso pari a circa 120 kN (89% del carico). Da qui è presente un forte aumento delle deformazioni dovuto al progredire dello snervamento. Fino a quando il carico non ha fatto snervare i correnti, l'apertura delle fessure è stata molto limitata ($\sim 0.1\text{mm}$) a causa del forte confinamento provocato dal traliccio metallico. Solo dopo la plasticizzazione dei correnti si è avuta l'apertura delle fessure con una dimensione massima, in condizioni ultime, di circa 1.5mm. La trave in corrispondenza del collasso, avvenuto per schiacciamento del calcestruzzo non confinato ha praticamente raggiunto il momento plastico teorico della sezione, corrispondente a 270 kNm pari a un carico ultimo di 135 kN. L'elevata duttilità della trave è riscontrabile in figura 17. Si fa presente che la prova è terminata a causa dello scivolamento del sistema di carico dovuto all'elevata freccia in mezzeria.

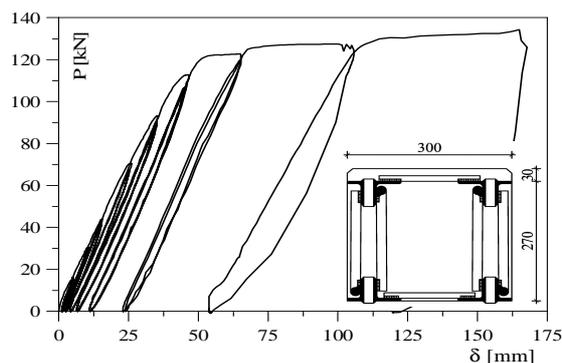


Fig. 17 Diagramma freccia mezzeria – carico su martinetto.

2.3 Nodo trave - colonna

Il campione utilizzato nella prova sperimentale rappresenta in scala 1:1 un nodo esterno di un ipotetico telaio piano. Il provino è costituito dall'intersezione di un elemento pilastro ($h=3,8$ m) con un elemento trave ($l=1,6$ m) aventi caratteristiche simili ai campioni di trave precedentemente analizzati. La prova è stata effettuata in condizioni cicliche di tipo statico con lo scopo di investigare il comportamento della zona nodale in termini di resistenza e duttilità.

Per quanto concerne la trave, ognuno dei due tralicci trasversali è composto da:

- corrente superiore: angolare 30x50x5 esterno e 50x50x5 mm interno
- corrente inferiore: due angolari 30x50x6 mm
- aste di parete: diametro 18 mm, saldate sulle facce interne dei profili

- aste di parete: diametro 18 mm, saldate sulle facce esterne dei profili in prossimità del collegamento con il pilastro.

I due tralicci piani sono collegati da calastrelli costituiti da barre del diametro di 12mm, posti sia all'intradosso che all'estradosso. Per quanto concerne il pilastro, esso è composto da due tralicci piani, mutamente collegati da calastrelli diametro 12 mm.

In dettaglio:

- correnti costituiti da due angolari 30x50x5

- aste di parete inclinate: diametro 18 mm, saldate sulle facce interne dei profilati.

- aste diagonali di diametro 18 mm, saldate tra i due tralicci verticali, in prossimità dell'intersezione con il nodo.

Il collegamento nodale fra gli elementi scatolari è stato ottenuto mediante lame metalliche (fig. 18). Queste trovano posto negli interspazi tra le coppie di angolari che costituiscono i quattro correnti paralleli ai vertici delle sezioni trasversali. Le lame metalliche vengono saldate al pilastro, in corrispondenza del nodo, e quindi vengono collegate mediante saldatura alle ali del profilo metallico della trave. Esse hanno dimensione trasversale 18x60 mm e una lunghezza di 457 mm. Nella trave, la parte inferiore del calcestruzzo e le facce laterali sono a filo degli angolari mentre la parte superiore presenta un copriferro di 3 cm. Il conglomerato del pilastro presenta tutte le quattro facce a filo con i profilati, con copriferro nullo. La sezione trasversale di entrambi gli elementi ha dimensione 30 cm per 30 cm.



Fig. 18 Particolare del sistema metallico in corrispondenza del giunto trave - pilastro.

2.3.1 Condizioni di vincolo e di carico

In sommità della colonna il vincolo utilizzato è quello di carrello, libero di muoversi in direzione verticale. Al piede del pilastro è stata inserita una cerniera fissa mentre l'estremità della trave è libera. Tutto il sistema è stato vincolato a muoversi in un piano (fig. 19). La direzione delle sollecitazioni indotte è verticale ed i cicli di spostamento sono progressivamente crescenti in entrambi i versi. L'applicazione delle sollecitazioni avviene in maniera quasi statica. Con tale prova si saggiano le potenzialità della struttura in un regime ciclico di carico, e quindi si determina il comportamento delle componenti fondamentali e la modalità di collasso del sistema. In condizioni sismiche, infatti, è molto importante che il sistema sia caratterizzato da buone caratteristiche di resistenza e da una buona duttilità, in modo da assorbire un'elevata quantità di energia.

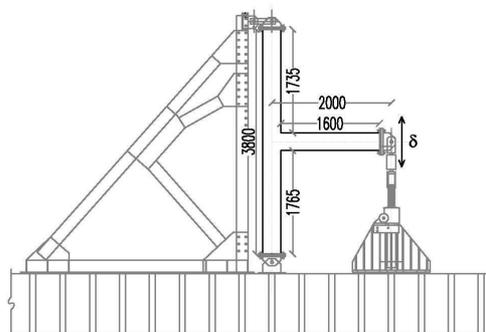


Fig. 19 Vista laterale del nodo con i relativi vincoli.

2.3.2 Posizionamento degli strumenti di misura

Anche per il nodo sono stati opportunamente posizionati degli strain-gauges per determinare le deformazioni nelle aste di parete inclinate, nei profilati angolari e in corrispondenza delle lame di collegamento tra trave e pilastro (fig. 20). Nella sezione 1 ne sono presenti 4, disposti rispettivamente dall'alto verso il basso sulla faccia esterna del profilato in corrispondenza dell'estradosso della trave e all'intradosso di questa. La sezione successiva, lungo l'asse principale del pilastro, ne presenta 4 rispettivamente sulla lama di collegamento superiore, sulle aste diagonali interne ed esterne e sulla lama di collegamento inferiore. La sezione 3 è simmetrica alla prima rispetto la mezzerie della trave e contiene anche lo stesso numero di strumenti e la stessa disposizione geometrica. Altri 2 strain gauges sono contenuti nella sezione 4, nelle aste di parete inclinate interne ed esterne in posizione centrale. L'ultima sezione, la 5, prevede 2 strumenti posti sulla faccia esterna dei profilati superiori ed inferiori.

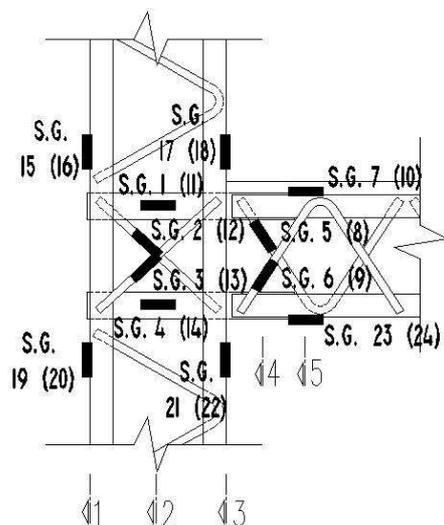


Fig. 20 Posizionamento strain gauges all'interno del nodo.

Le altre misurazioni hanno riguardato la freccia all'estremità libera della trave, gli spostamenti orizzontali di tre sezioni della colonna in prossimità del nodo e le rotazioni rispettivamente nel nodo e nella trave in corrispondenza dell'attacco con la colonna. In tutto sono presenti nella struttura 8 trasduttori rotativi distribuiti in 5 sezioni diverse (fig. 21a). La sezione 1, posta all'estremità del provino ne contiene 4, rispettivamente 1 in sommità della colonna, 1 in corrispondenza dell'estradosso della trave, 1 in corrispondenza dell'intradosso della trave e uno posto al piede della colonna (fig. 21a). Questi strumenti rilevano gli spostamenti orizzontali dei rispettivi punti di attacco. Nella sezione 2 (fig. 21a), posta in prossimità del nodo vi è 1 trasduttore per rilevare lo spostamento verticale. La stessa funzione è svolta dai trasduttori delle sezioni 3,4,5, poste a diversa distanza dal nodo. Tale distanza è di 30 centimetri per la sezione 3 (fig. 21a), 80 centimetri per la sezione 4 (fig. 21a) e 160 centimetri per la sezione 5 (fig. 21a). I trasduttori rettilinei presenti sono in tutto 6 (fig. 21b), disposti idealmente in 3 sezioni. La prima, in prossimità dell'asse della colonna, prevede 2 trasduttori rettilinei posti su entrambe le diagonali del nodo e misura l'allungamento o accorciamento di queste durante i cicli di carico. La sezione 2 contiene anch'essa 1 trasduttore ed è posizionata a 10 centimetri dal nodo, la sezione 3 ne contiene invece uno a 30 centimetri da questo. La struttura è stata monitorata anche mediante 4 inclinometri (fig. 21c) posizionati su 2 sezioni. La prima in linea con la mezzerie del pilastro ne contiene 3, rispettivamente in sommità, nel mezzo e al piede della colonna. Nella sezione 2, posta a poca distanza dal nodo, è presente un inclinometro, applicato sulla parete laterale della trave. Gli inclinometri posti all'estremità della colonna rilevano la rotazione in quei punti, quello in mezzerie la rotazione del nodo e infine l'ultimo la rotazione della trave.

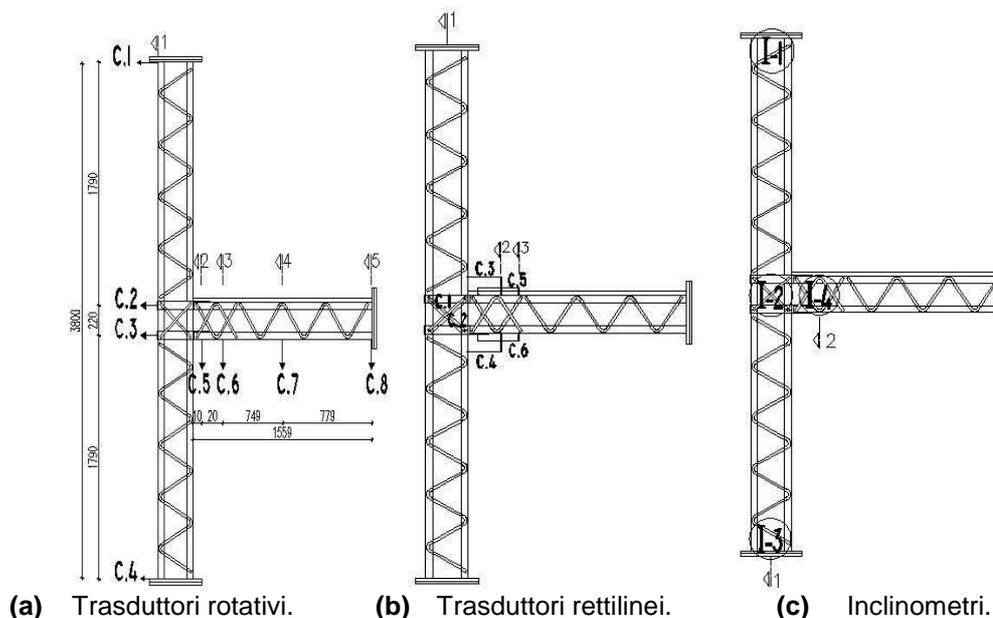


Fig. 21 Disposizione degli strumenti di misura all'interno del nodo.

2.3.3 Descrizione della prova e risultati

La prova è stata condotta in controllo di spostamento mediante l'utilizzo di un martinetto di tipo meccanico da 500 kN. Le forze applicate sono state determinate mediante cella di carico mentre gli spostamenti verticali imposti sono riportati in figura 22.

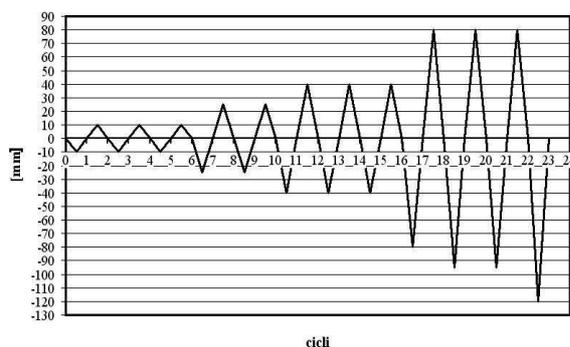


Fig. 22 Storia di spostamento del nodo.



Fig. 23 Espulsione del calcestruzzo e taglio di un angolare.

Il collasso del campione è avvenuto per un carico di 145 kN. La rottura è avvenuta nella trave in corrispondenza del cambio di armatura longitudinale in prossimità del nodo (alla fine delle lame di collegamento nodale) dove questa presentava una brusca diminuzione di sezione e di armatura trasversale. Per tale valore si è propagata una importante fessura per taglio che ha coinvolto tutta

l'altezza della trave, portando alla rottura di un angolare longitudinale nella zona inferiore (fig. 23), assieme allo schiacciamento e all'espulsione del calcestruzzo nella zona superiore. Anche il nodo è stato interessato da una significativa fessurazione diagonale (fig. 23). Nelle figure 24 e 25 è riportata la risposta complessiva in termini di carico-rotazione e carico- freccia di estremità. Si può osservare come la capacità di dissipare energia sia elevata, nonostante il collasso sia avvenuto prematuramente per la fessurazione a taglio della trave.

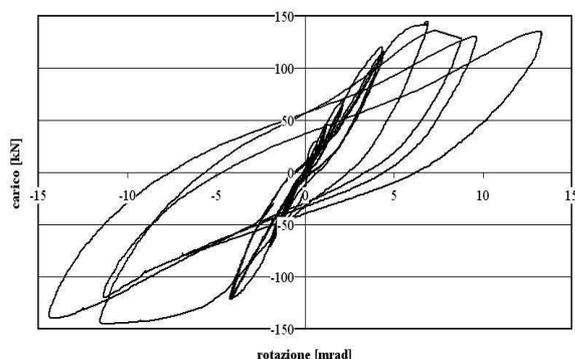


Fig. 24 Carico - rotazione.

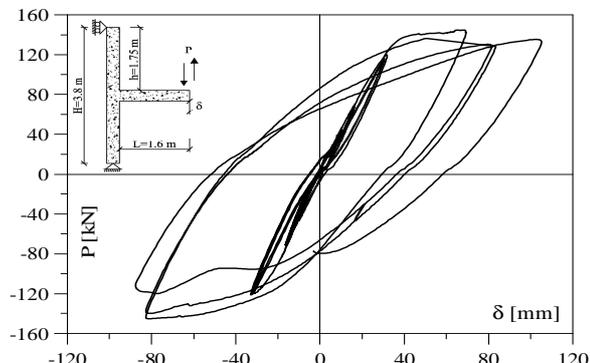


Fig. 25 Carico – freccia estremità libera della trave.

I dati riguardanti gli strain gauges sono risultati attendibili, anche se alcuni, a causa delle forti deformazioni, sono andati fuori uso. Per ogni grafico vengono riportati gli andamenti di due strain gauges simmetrici rispetto l'asse verticale di simmetria. Vengono analizzati prima i diagrammi degli strain gauges posti sulle aste di parete e in un secondo tempo quelli posti sugli angolari.

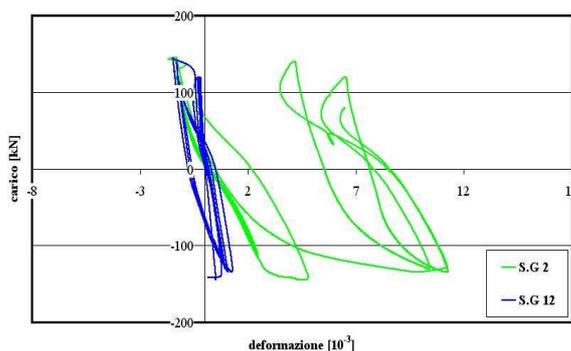


Fig. 26 Deformazioni strain gauges 2 e 12.

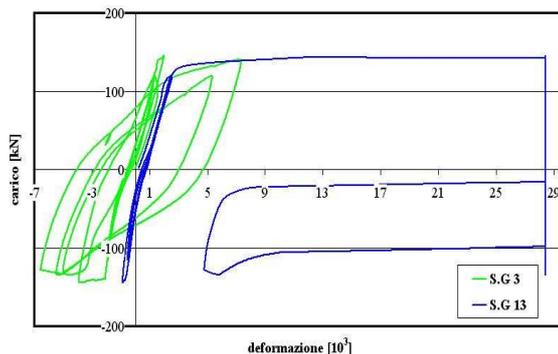


Fig. 27 Deformazioni strain gauges 3 e 13.

Gli Strain gauges posti sulle aste diagonali del nodo (Fig. 26, 27), come visibili dai diagrammi, lavorano a coppie in maniera inversa; quando il carico è diretto verso il basso le diagonali esterne (S.G.3 e S.G.13) sono tese mentre quelle interne (S.G.2 e S.G.12) sono compresse. Le deformazioni per i primi cicli di carico sono piccole e fanno lavorare l'acciaio delle diagonali in campo elastico. Nei cicli successivi, invece, le deformazioni sono più importanti a causa del progressivo degrado del calcestruzzo all'interno del nodo. In condizioni di collasso si è avuto lo snervamento della diagonale tesa.

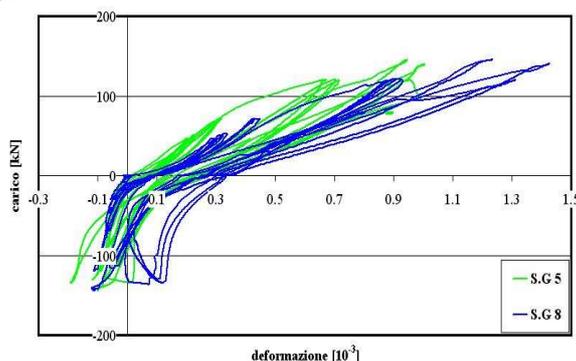


Fig. 28 Deformazioni strain gauges 5 e 8.

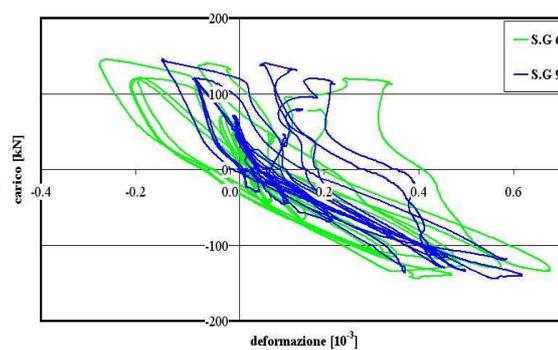


Fig. 29 Deformazioni strain gauges 6 e 9.

Le aste inclinate di parete, poste nella trave (Fig. 28, 29), come prevedibile, a seconda del segno del carico lavorano assorbendo tensioni di segno opposto con deformazioni nell'acciaio molto diverse fra loro. Mentre nel caso della trazione le deformate sono molto ampie, non tali però da far snervare l'acciaio, a compressione queste si mantengono limitate. Tale fenomeno si giustifica per il fatto che a trazione il calcestruzzo si fessura lasciando il compito di assorbire gli sforzi di trazione all'asta di acciaio. A compressione il conglomerato ha una resistenza molto più elevata e gli sforzi vengono ripartiti tra i due materiali determinando una deformazione minore sull'asta diagonale.

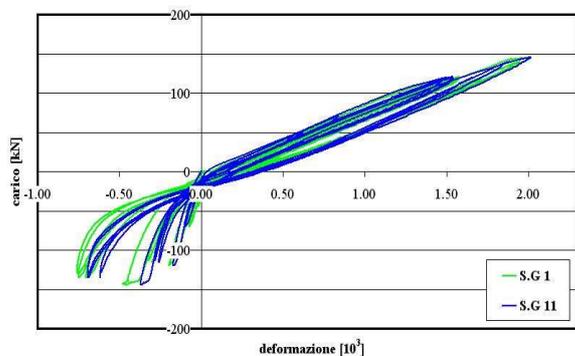


Fig. 30 Deformazioni strain gauges 1 e 11.

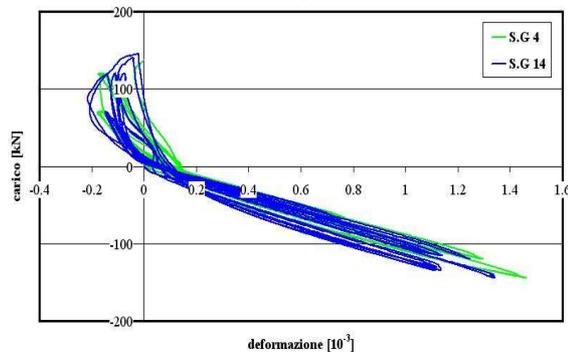


Fig. 31 Deformazioni strain gauges 4 e 14.

L'andamento dei grafici delle coppie di strain gauges posti nelle aste orizzontali di nodo (Fig. 30, 31), ha evidenziato una risposta molto simile, al variare dei carichi. Le deformazioni a trazione sono maggiori, per lo stesso motivo visto sopra, ma non riescono a far plasticizzare l'acciaio delle lame, anche se per poco. Si nota come le deformazioni della coppia S.G.4 e 14 (fig. 27), poste inferiormente, siano più piccole a causa della maggior quantità di acciaio all'intradosso della trave, che rende quest'ultima più rigida quando il carico è diretto verso l'alto. Dai diagrammi riportati nelle figure 32, 33, si nota come entrambi gli angolari posti nella trave abbiano plasticizzato, con cicli di risposta dell'acciaio sempre più grandi l'aumentare del carico. Tali cicli sono rimasti sostanzialmente stabili anche se, a causa delle elevate tensioni di trazione, le deformazioni sono andate fuori dalla scala dello strumento. Le deformazioni, a causa del maggior spessore del profilato, sono minori nell'angolare inferiore.

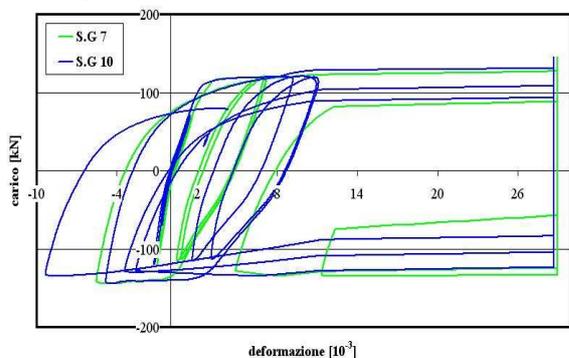


Fig. 32 Deformazioni strain gauges 7 e 10.

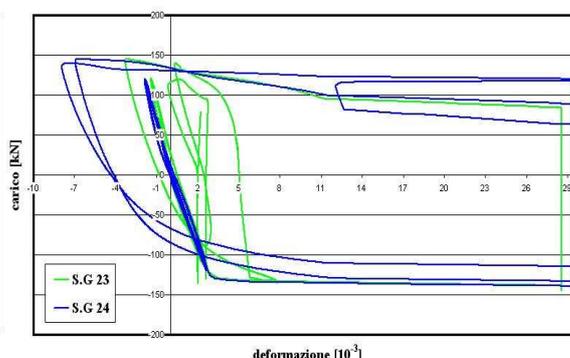


Fig. 33 Deformazioni strain gauges 23 e 24.

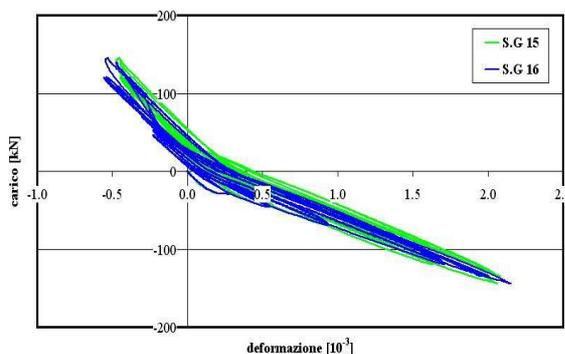


Fig. 34 Deformazioni strain gauges 15 e 16.

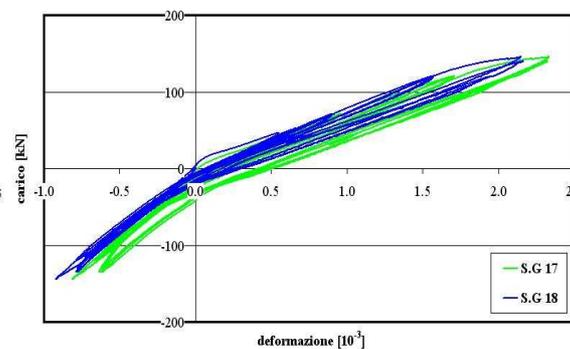


Fig. 35 Deformazioni strain gauges 17 e 18.

Il comportamento dell'acciaio nei correnti della colonna è risultato molto simile. Nessun profilato è entrato in campo plastico (Fig. 34-35). Le deformazioni a trazione sono più rilevanti di quelle a compressione, a causa della fessurazione del calcestruzzo.

3 CONCLUSIONI

L'utilizzo di elementi misti tralicciati prefabbricati riveste oggi notevole importanza per la possibilità di ridurre notevolmente il numero e la durata delle lavorazioni in cantiere, con un evidente vantaggio in termini economici ed un impiego ottimale dei materiali. Molto è stato fatto per lo sviluppo e la promozione di questo tipo di elementi, ma molto resta ancora da fare, sia nella divulgazione dei vantaggi conseguibili che sotto l'aspetto normativo. In questa prospettiva il presente lavoro ha lo scopo di fornire un contributo sperimentale volto a comprendere meglio le prestazioni raggiungibili con l'uso di elementi tralicciati basati sull'impiego di angolari e di focalizzare le problematiche strutturali aperte, inerenti questa tipologia costruttiva che fatica a trovare una giusta e organica collocazione all'interno dei riferimenti normativi nazionali. Questo per la specificità della tipologia strutturale in oggetto, con particolare riferimento al comportamento in prima e seconda fase.

Le prove a flessione effettuate sulle travi hanno messo in evidenza un buon comportamento degli elementi analizzati, con un collasso caratterizzato da meccanismi ben individuabili, legati all'instabilità locale in prima fase e alla completa plasticizzazione in seconda fase. Esse hanno inoltre evidenziato una benefica influenza del traliccio nei confronti della fessurazione del calcestruzzo. Infatti, in virtù della propria forma, il traliccio realizza tra due fessure un impedimento localizzato allo scorrimento molto forte che, nella trave in prima e seconda fase, si traduce in un ridotto stato fessurativo fino allo snervamento degli angolari.

La prova ciclica effettuata sul nodo trave-colonna ha evidenziato una buona duttilità del sistema, anche se si sono riscontrate carenze di armatura a taglio in prossimità del nodo che hanno comportato un prematuro collasso. Ulteriori approfondimenti, volti ad individuare, per il sistema analizzato, opportuni dettagli costruttivi e criteri di calcolo, sono attualmente in corso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Izzo, F. Minelli, G. Plizzari, "Le travi reticolari miste nel cammino verso la normative", Atti del Congresso CTE 2006, Parma, Novembre 9-11.
- [2] S. Leone, "Procedimenti di calcolo per travi REP", Associazione Produttori travi REP, Milano, marzo 1972.
- [3] G. Giordano, L. Ombres, G. Spadea, "Modellazione teorica e controllo del comportamento a rottura di travi inflesse di tipo REP", L'industria Italiana del Cemento, n.617, 1987.
- [4] M. Mele, M. Ciampoli, E. Menegatti, "Nuovi sistemi strutturali composti acciaio e calcestruzzo: Prime analisi sperimentali del comportamento sotto azioni cicliche dei nodi trave – pilastro", I° Workshop Italiano sulle Strutture Composte, Trento, Giugno 1993.
- [5] M. Mele, M. Sassone, "Sistemi strutturali composti ad armatura superficiale: indagine sperimentale sul comportamento di nodi trave – pilastro soggetti a carichi ciclici.", V° Workshop Italiano sulle Strutture Composte, Salerno, Novembre 2002.
- [6] M. Ferrari, "Sistema costruttivo integrato alla prefabbricazione con un sistema pluriplano iperstatico.", Atti del Congresso CTE 2004, Bari, Novembre 4-6.
- [7] Khuntia, M. & Goel, S. C., "Analytical study of FRC-encased steel joist composite beams.", Journal of Structural Engineering (ASCE) 125(5), 495-502, 1999.
- [8] Khuntia, M. & Goel, S. C., "Experimental study of FRC-encased steel joist composite beams.", Journal of Structural Engineering (ASCE) 125(5), 503-509, 1999.
- [9] Hsu, H. L., Hsieh, J. C., Juang, J. L., "Seismic performance of steel – encased composite members with strengthening cross – inclined bars.", Journal of Structural Constructional.
- [10] C. Amadio, L. Macorini, S. Sorgon, G. Suraci, "Analisi di un sistema ibrido sismo – resistente costituito da elementi tralicciati in acciaio inglobati nel calcestruzzo.", Atti del Congresso CTE 2008, Roma, Novembre 5-8.