

Analisi dei metodi di verifica dell'efficienza di reti di protezione contro la caduta di massi

Giancarlo Cantarelli*, Gian Paolo Giani**

Sommario

Nel presente lavoro si presenta una formulazione analitica dell'impatto di un blocco su una rete paramassi. Dopo una breve rassegna bibliografica su prove in sito di impatto di massi su barriere a rete svolte per valutare la capacità delle barriere stesse, si esaminano prove effettuate per certificare le opere di protezione, in accordo alla recente normativa europea. L'impiego della formulazione analitica nel calcolo dei tempi di arresto dei fenomeni di impatto misurati dà risultati che sono in buon accordo con quelli della sperimentazione in sito. Il modello analitico così validato viene quindi esteso ad altri casi di potenziali impatti di blocchi su barriere. I risultati di queste applicazioni mettono in evidenza come una progettazione delle reti paramassi eseguita su criteri esclusivamente energetici sia errata.

1. Introduzione

La protezione di strutture e infrastrutture civili dal rischio di caduta massi con barriere metalliche sta progressivamente diventando il metodo più impiegato nella pratica ingegneristica.

Le strutture metalliche di protezione sono generalmente costituite da più moduli funzionali identici, posti in sequenza in modo da adattare la lunghezza della barriera all'area di distacco e ai manufatti da proteggere.

Questi moduli sono costituiti da più componenti a cui si assegna una specifica funzione. Un modulo tipo è, in particolare, formato da una struttura di intercettazione, da una struttura di sostegno, da componenti di raccordo e dalle fondazioni.

La struttura di intercettazione è la rete metallica principale che ha lo scopo di sopportare l'urto diretto della massa di un blocco, deformandosi elasticamente e/o plasticamente e trasmettendo lo sforzo alle strutture di raccordo, di sostegno e di fondazione.

La struttura di sostegno è costituita da pali che hanno lo scopo di mantenere eretta la rete metallica. Questi pali possono essere collegati direttamente alla rete o indirettamente tramite una struttura di raccordo.

Le componenti di raccordo sono le funi di collegamento, i cavi, i fili e/o i tondini metallici, le giunzioni, i morsetti e i dispositivi realizzati per la dissipazione dell'energia. La loro funzione è quella di trasmettere lo sforzo alla struttura di fondazione du-

rante l'urto e/o di mantenere in posizione la rete metallica.

Le fondazioni possono essere di diversa tipologia e hanno il compito di trasmettere al terreno le forze derivanti dall'impatto del blocco.

La necessità di definire in modo univoco i criteri per la progettazione di questo tipo di strutture paramassi è diventata nel corso di questo ultimo decennio un'esigenza sempre più pressante degli Enti preposti alla difesa del territorio.

De Col e Cocco avevano, nel 1996, costruito un campione di 100 interventi di protezione da caduta di massi realizzati nella Provincia di Trento, mettendo in evidenza come non più del 70% di questi interventi fosse stato progettato soltanto studiando statisticamente o deterministicamente traiettorie e dimensioni dei massi e che solo il 15% delle opere fosse stato progettato effettuando un dimensionamento strutturale.

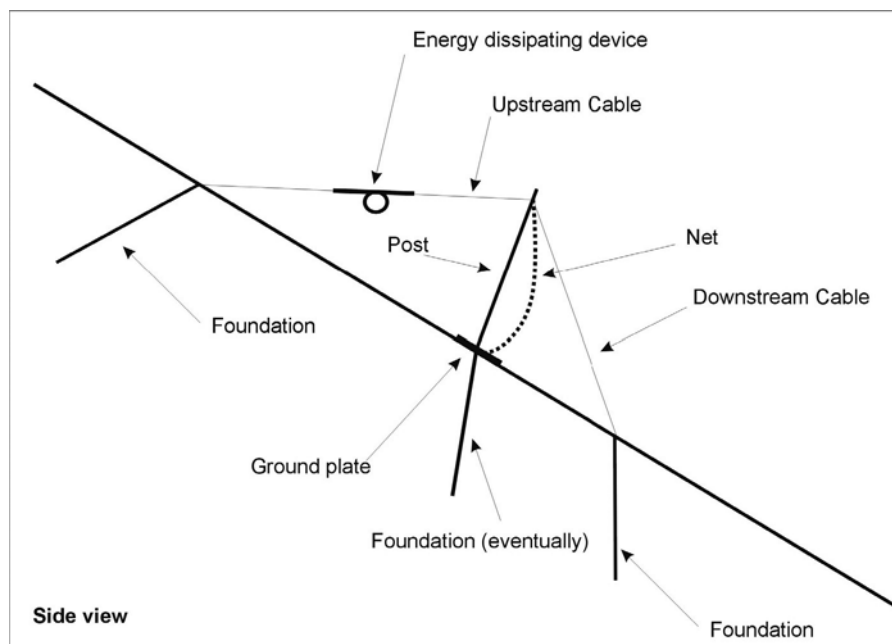
Dall'analisi del comportamento delle opere di protezione che avevano subito impatti di massi, De Col e Cocco avevano riscontrato come gli elementi più danneggiati delle barriere fossero le reti che svolgono la funzione d'arresto e le funi di supporto o gli elementi strutturali di supporto orizzontali.

Il danno più frequente ritrovato nelle reti era stato, in particolare, quello definibile come dovuto all'effetto proiettile ovvero quello di blocchi di dimensione ridotta (50-100 kg) che ad elevata velocità (50-80 m/s) avevano perforato la rete stessa.

La valutazione dell'efficienza di una barriera paramassi nell'assorbire l'energia cinetica di blocchi impattanti di diversa massa e con diversa velocità deve essere, a causa della complessità della struttura

* Università degli studi di Cagliari

** Università degli studi di Parma



Didascalie a partire dall'alto in senso orario

Dispositivo dissipazione energia, palo, cavo di monte, rete, cavo di valle, fondazione, fondazione (*eventuale*), piastra di terra, fondazione, vista laterale.

Fig. 1 – Vista laterale di un kit paramassi (dalle Linee guida EOTA).

Fig. 1 – Lateral view of a rockfall restraining net kit (after the EOTA Guidelines).

di protezione, effettuata con prove in sito, svolte in vera grandezza.

Numerosi sono stati fino ad ora gli sforzi di tecnici e ricercatori per la stesura di linee guida per la realizzazione di prove di caduta di blocchi in sito su strutture di protezione e per la certificazione dell'efficienza di tali strutture di protezione.

Attualmente l'EOTA, l'Organizzazione Europea per il Benestare Tecnico, ha messo a punto le linee guida per il benessere tecnico europeo di Kit di protezione contro la caduta di massi.

Un "kit" è una forma particolare di "prodotto da costruzione" costituito da vari "componenti" che sono commercializzati insieme con un marchio CEE comune. La struttura di difesa, una volta installata in sito, prende il nome di "sistema assemblato".

Un kit paramassi, che deve essere verificato con prove di caduta in sito, ha come contenuto minimo 3 moduli funzionali intesi come 3 campate di barriera in rete con 4 pali.

Gli schemi delle figure 1 e 2, ripresi dalle linee guida europee, danno un esempio di kit e ne illustrano, in termini generali, i suoi diversi componenti.

Le prove in sito devono essere svolte movimentando blocchi di volume e forma prefissata, in relazione all'altezza della rete e misurando durante l'impatto le principali caratteristiche meccaniche e geometriche del problema.

La figura 3, ripresa dalle linee guida europee, riporta lo schema di modalità di prova in sito.

Lo scopo delle prove in sito è quello di identificare le caratteristiche normative del sistema assemblato (kit) rilevanti per la sua idoneità all'uso.

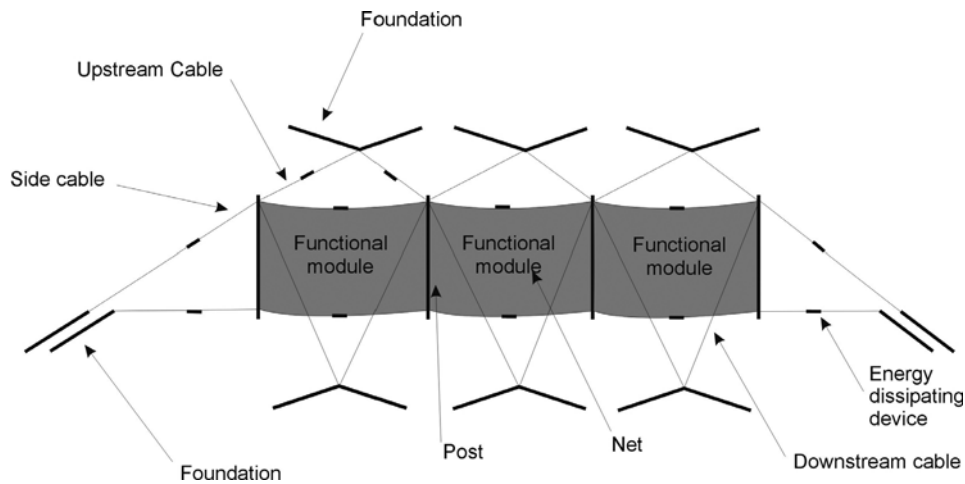
Le caratteristiche normative essenziali, che si ottengono dall'interpretazione delle prove di caduta di massi, sono la resistenza meccanica e la stabilità del tipo di struttura di protezione esaminato. Tale resistenza meccanica si valuta sulla base dell'energia cinetica che una rete è stata in grado di assorbire a causa dell'impatto di un blocco.

Le linee guida definiscono, in particolare, due livelli di energia cinetica assorbita, senza che la rete subisca rotture o determinati valori di allungamento: quello di servizio (SEL) e quello massimo (MEL).

La barriera, sottoposta a prove, viene successivamente classificata sulla base del livello di energia cinetica sopportato.

Nel seguito vengono riportati ed esaminati i principali risultati di alcune prove, svolte in sito, in accordo alle linee guida europee.

Successivamente viene riportata una schematizzazione del fenomeno di impatto sulla rete che utilizza una formulazione analitica messa a punto per questo lavoro. Questa formulazione analitica non ha lo scopo di descrivere in modo completo il fenomeno dell'impatto di un blocco su una rete paramassi in quanto questo coinvolge, oltre alla rete propriamente detta, anche le strutture di raccordo, di

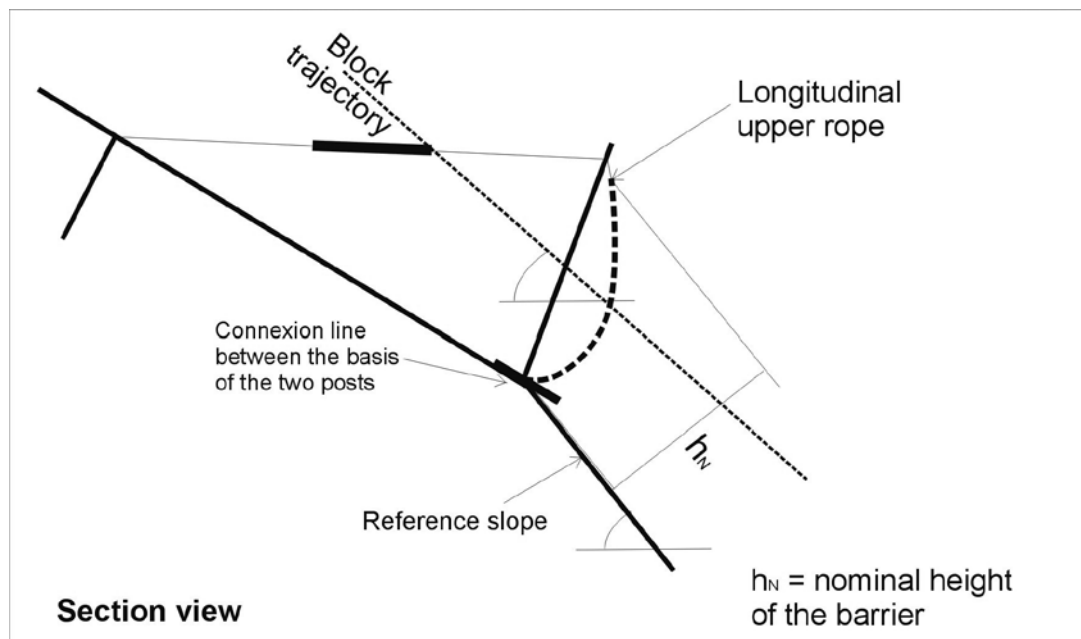


Le didascalie a partire dall'alto in senso orario

Cavo di monte, fondazione, dispositivo dissipazione energia, cavo di valle, rete, palo, fondazione, cavo laterale, modulo funzionale, Modulo funzionale, modulo funzionale.

Fig. 2 – Vista posteriore di un kit paramassi (dalle Linee guida EOTA).

Fig. 2 – Backview of Rockblock restraining net kit (after the EOTA Guidelines).



Le didascalie a partire dall'alto in senso antiorario

Traiettoria del blocco, fune longitudinale superiore, h_N altezza nominale della barriera, pendenza di riferimento, linea che congiunge le basi dei due pali, vista in sezione.

Fig. 3 – Schema di modalità di prova (dalle Linee guida EOTA).

Fig. 3 – Type of test scheme (after EOTA Guidelines).

sostegno e di fondazione, ma soltanto, quello di valutare le caratteristiche macroscopiche del problema quali la velocità e il tempo d'arresto del blocco e la deformazione della rete a seguito dell'impatto.

L'ottimo accordo tra i risultati delle misure in sito e quelli del calcolo permette di validare, per lo scopo per cui è stata introdotta, la schematizzazione su cui è fondata la formulazione analitica.

2. Prove in sito di caduta di massi

La necessità di investigare sul comportamento globale di barriere paramassi a rete con prove in vera grandezza in sito è stata sentita da diversi ricercatori e tecnici del settore fino dagli anni settanta.

Partendo dalle prime esperienze di FRANZESCHI e LURASCHI [1974] che analizzarono il comportamento

di una barriera soggetta all'impatto di alcuni blocchi di roccia fatti rotolare lungo un pendio, la tecnica di prova è andata via, via migliorando, attraverso la registrazione del moto dei blocchi e dei danneggiamenti provocati sulla rete di protezione [SMITH e DUFFY, 1990]. Ulteriori tipi di prove sono state condotte [DUFFY, 1992; 1996] con lo scopo di verificare l'efficienza e lo stato di conservazione di barriere soggette a impatti differiti nel tempo.

BALLESTER *et al.* [1996] hanno condotto prove su barriere deformabili sottoposte all'impatti di blocchi lanciati dopo un tratto di discesa imposto dal percorso fisso di una teleferica e misurando le forze durante l'arresto con dinamometri. L'impiego di una teleferica per guidare il percorso del blocco ha il grande vantaggio di permettere il ripetersi delle prove in condizioni pressoché identiche di velocità di impatto e quindi di facilitare il confronto tra il comportamento di barriere di diversa tipologia.

PEILA *et al.* [1995; 2001] hanno realizzato un campo prove dedicato a questo tipo di sperimentazione capace di movimentare, tramite la discesa sul cavo di una teleferica, blocchi del peso massimo di 7000 kg impattanti sulle reti in esame ad una velocità massima di 34 m/s. La conseguente energia cinetica teorica massima del blocco all'impatto è di circa 4000 kJ.

La registrazione filmata delle prove e la presenza di dinamometri installati su cavi della struttura di difesa permette la stima della velocità e dell'energia cinetica all'impatto, dell'allungamento massimo e finale della rete, dell'angolo di impatto, misurato rispetto alla linea orizzontale e del tempo di arresto del fenomeno in oggetto.

GOTTARDI, RIGHI e DIOTALLEVI [2005] hanno svolto, in un campo prove realizzato appositamente per questo scopo, in accordo alla linee guida dell'EOTA, diverse prove di caduta di blocchi su barriere a rete di diverse caratteristiche.

La sperimentazione svolta fa parte di un contratto di ricerca e consulenza tra il Consorzio Triveneto Rocciatori di Fonzaso (BL) e il Dipartimento DISTART dell'Università di Bologna che ha l'oggetto di studiare il comportamento di campioni di barriere paramassi sottoposti a prove di impatto, in vera grandezza, da parte di blocchi poliedrici di calcestrutto in caduta verticale e dotati di energie cinetiche variabili da non meno di 2000 kJ a non meno di 3000 kJ, a seconda della loro tipologia costruttiva.

Differentemente dalle prove svolte da PEILA *et al.*, la caduta del blocco non è parallela alla direzione di immersione di un pendio, ma è verticale; la barriera è quindi collocata perpendicolarmente ad una parete rocciosa verticale.

I blocchi che sono stati movimentati con un braccio meccanico di sollevamento e sganciati da

un'altezza prefissata hanno compiuto, fino all'impatto, un percorso di caduta libera verticale.

Le prove sono state registrate da tre telecamere poste ad una quota poco superiore a quella della barriera: due di esse hanno ripreso le prove frontalmente ed una lateralmente.

Tenendo conto della semplicità dei parametri geometrici della prova, dell'impiego di telecamere che, aventi mire orientate diversamente, permettono eventuali correzioni per qualche minimo scostamento rispetto a una situazione piana e al fatto che le uniche dissipazioni energetiche sono quelle dovute alla trascurabile resistenza dell'aria, l'energia cinetica teorica al momento dell'impatto è praticamente coincidente con quella misurata.

3. Grandezze caratteristiche misurate nelle prove in sito svolte da Gottardi, Righi e Diotallevi

Le prove di impatto sono state svolte in modo che l'urto tra il blocco e la rete avvenga nel centro della campata di mezzo della barriera in esame.

I dati di partenza delle prove sono la massa m del blocco e la sua altezza di caduta.

La registrazione con tre telecamere dell'evento permette la verifica della velocità di impatto, il rilievo dell'allungamento massimo della rete e il tempo di frenata. Queste grandezze sono rilevate a partire dall'analisi dei fotogrammi ricavabili dai filmati di prova.

Gli ancoraggi della barriera al suolo sono stati dotati di celle di carico per il rilievo in continuo della forza di trazione T durante la prova di impatto.

Le barriere paramassi sono state soggette a 3 prove d'urto: la prima al massimo livello di energia, la seconda e la terza, effettuate sulla medesima struttura di difesa senza effettuare alcun intervento di ripristino o di manutenzione, a minori livelli di energia, allo scopo di verificare la capacità di resistenza residua dell'opera di protezione dopo tre diversi impatti.

La tabella I riporta i dati e i risultati delle 6 prove svolte da Gottardi, RIGHI e DIOTALLEVI [2005] che sono di interesse per la presente nota.

4. Formulazione analitica dell'impatto di un blocco su una rete paramassi

Si consideri un blocco di massa m che impatta su una rete paramassi, supponendo che nell'istante $t_0 = 0$ in cui avviene l'impatto la velocità v_0 sia normale alla rete. Inoltre, si supponga che la rete formi un angolo α compreso tra 0 e $\pi/2$ con la verticale.

Tab. I – Risultati delle prove in situ e confronto con i risultati del calcolo analitico
 Tab. I – *In situ test results and comparison with analytical calculations.*

	<i>data</i>	<i>tipo di rete</i>	<i>massa (Kg)</i>	V_{imp} <i>m/s</i>	D_m <i>(m)</i>	t_s <i>(s)</i>	V_m <i>(m/s)</i>	K <i>(Kg/m)</i>	t_c <i>(s)</i>
1	10/08/2004	CTR 30/04/A	9540	25.72	5.20	0.36	14.4	263614	0.31
2	26/08/2004	CTR 20/04/A	6760	25.78	4.65	0.32	14.5	230224	0.28
3	30/09/2004	CTR 20/04/A	2285	25.48	4.20	0.26	16.1	92283	0.26
4	05/11/2004	CTR 20/04/B	6855	25.62	4.30	0.32	13.4	269524	0.26
5	09/12/2004	CTR 10/04/B	3320	25.74	3.50	0.22	15.9	194289	0.21
6	22/12/2004	CTR 10/04/B	1085	25.72	2.80	0.19	14.7	97029	0.17

Il confronto è effettuato in termini di tempo d'arresto: t_s è il tempo misurato, t_c è il tempo calcolato.

V_{imp} è la velocità di impatto misurata,

D_m è l'allungamento massimo della rete,

V_m è la velocità media misurata nella fase d'arresto,

k è il coefficiente elastico della rete (calcolato), definito dimensionalmente come $[F \cdot l^{-1}]$.

Il coefficiente k è stato calcolato in modo che l'allungamento calcolato sia uguale a quello misurato.

The comparison was done in terms of arrest time: t_s is the measured time, while t_c is the computed time.

V_{imp} is the impact velocity,

D_m is the maximum elongation of the net,

V_m is the average velocity measured in the arrest phase,

k is the elastic coefficient of the net (computed) and has $[F \cdot l^{-1}]$ dimension.

k has been obtained in such a way that the computed elongation was equal to the measured elongation.

La figura 4 riporta una sezione schematica del campo prove utilizzato da GOTTARDI, RIGHI e DIOTALLEVI [2005], da cui si può osservare come la traiettoria di caduta dei blocchi sia verticale e come il blocco impatti su una superficie che può essere approssimata come orizzontale con un conseguente valore dell'angolo α pari a $\pi/2$. La velocità di caduta è quindi verticale.

Se si assume che la traiettoria del blocco dopo l'impatto sia rettilinea e si suppone che il comportamento della rete sia perfettamente elastico (trascurando quindi sia la presenza dei dissipatori e l'even-

tuale deformazione dei montanti) e si schematizza il blocco come se fosse un elemento puntiforme, detto s l'allungamento della rete, durante l'impatto è soddisfatta la seguente equazione differenziale:

$$\ddot{s} = g \sin \alpha - \frac{k}{m} s \quad (1)$$

dove k ($= \text{cost.} > 0$) rappresenta il coefficiente elastico della rete.

La (1) è un'equazione differenziale del secondo ordine, lineare, a coefficienti costanti e non omogenea (è un'equazione dei moti armonici).

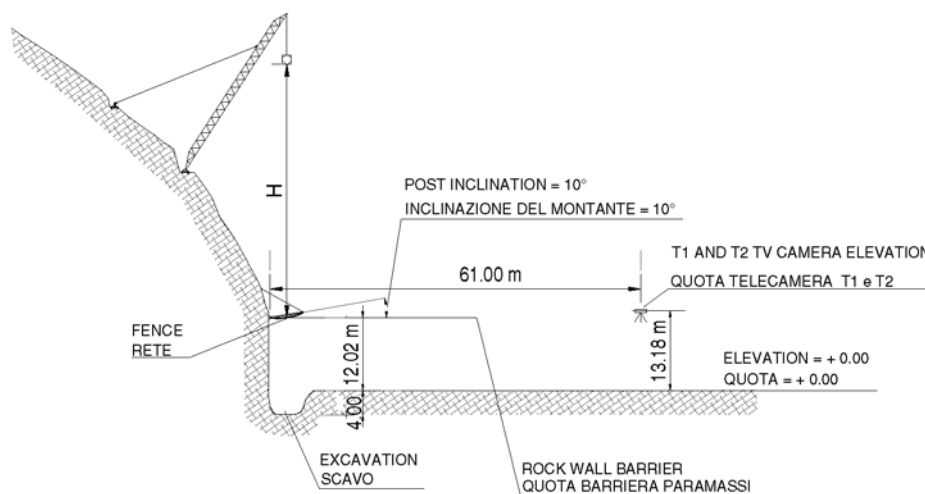


Fig. 4 – Sezione schematica del campo prove di caduta massi [da GOTTARDI, RIGHI e DIOTALLEVI, 2005].
 Fig. 4 – *Schematic section of the rockfall test field [after GOTTARDI, RIGHI and DIOTALLEVI, 2005].*

Ponendo per semplicità $\frac{k}{m} = \omega^2$, l'integrale generale della (1) è:

$$\tilde{s}(t) = c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t + \frac{g}{\omega^2} \sin \alpha$$

Dove c_1 e c_2 sono due costanti arbitrarie.

I valori delle costanti corrispondenti alle condizioni iniziali: $s(0) = 0$, $\dot{s}(0) = v_0$ sono:

$$c_1 = \frac{g}{\omega^2} \sin \alpha$$

$$c_2 = \frac{v_0}{\omega}$$

e quindi l'equazione che descrive il moto del blocco negli istanti successivi l'impatto è:

$$s(t) = \frac{g \sin \alpha}{\omega^2} (1 - \cos \omega t) + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t$$

Da ciò segue che, negli istanti successivi, l'impatto del blocco si muove con velocità:

$$\dot{s}(t) = \frac{g \sin \alpha}{\omega} \sin \omega t + v_0 \cos \omega t$$

ed è immediato riconoscere che il primo istante in cui si annulla la velocità è:

$$t_c = \frac{1}{\omega} \arctg \left(\frac{\omega v_0}{g \sin \alpha} \right) \quad (2)$$

con $\omega t_c \in \left(\frac{\pi}{2}, \pi \right)$ e che in tale istante l'allungamento della rete (che è il suo *allungamento massimo*) è dato da:

$$s_m = s(t_c) = \frac{g \sin \alpha + \sqrt{(g \sin \alpha)^2 + \omega^2 v_0^2}}{\omega^2} \quad (3)$$

La schematizzazione del blocco con un elemento puntiforme significa assumere come ipotesi che il fenomeno prescindia dalle sue dimensioni. In altri termini, significa ipotizzare che la risposta delle rete (cioè la costante k) sia indipendente dalle dimensioni del blocco che vi impatta.

Questa schematizzazione è da considerarsi troppo semplificativa per il problema in esame in quanto la forza della rete sul blocco è proporzionale alla deformazione della rete (rete perfettamente elastica), ma questa proporzionalità dipende anche dalle dimensioni della superficie di contatto tra la rete e il blocco.

Detta A tale superficie di impatto, si assume che esista una costante positiva μ tale che:

$$k = \mu A \quad (4)$$

La (4) è però una formula dallo scarso valore pratico, dato che è difficile indicare un metodo concreto per calcolare la superficie di impatto. Nel caso

in cui il blocco sia omogeneo e abbia una forma sferica, il cubo della superficie è proporzionale al quadrato della massa, per cui la (4) è equivalente alla seguente:

$$k = \eta m^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

dove m è la massa del blocco, e η è una costante positiva, che nel seguito verrà semplicemente detta "costante della rete".

Rispetto alla (4), la (5) ha lo svantaggio che la costante η dipende anche dalla densità del blocco, ma ha il grande vantaggio che, come si vedrà nel successivo paragrafo, è assai semplice da calcolare.

5. Confronto tra risultati analitici e dati sperimentali

Si esaminino i risultati delle prove in sito riportati nella tabella 1.

Nella prova n. 5 della tabella 1, un blocco sferoidale di massa $m = 3320$ Kg impatta con velocità $v_0 = 25,74$ m/s su una rete paramassi posta in posizione orizzontale (cioè con $\alpha = \pi/2$), e provoca un allungamento massimo di $s_m = 3,5$ m nel tempo $t_m = 0,22$ s.

Tali risultati sperimentali corrispondono perfettamente ai risultati teorici del precedente paragrafo (naturalmente con $\alpha = \frac{\pi}{2}$).

Infatti, ponendo nella (2) e nella (3) $k = 194.285$ kg/m, si ottiene un allungamento massimo $s_m = 3,5$ m in un tempo $t_c = 0,21$ s.

Dalla (5) si calcola il valore della costante della rete $\eta = 872,77$ e, quindi, se la costante di impatto μ è quella di un blocco sferoidale, è possibile determinare l'allungamento massimo e il tempo di arresto di un qualunque altro blocco avente la stessa forma.

Si noti a questo proposito che la forma dei blocchi utilizzata per la sperimentazione è quella poliedrica (Fig. 5) prevista dalle linee guida dell'EOTA,

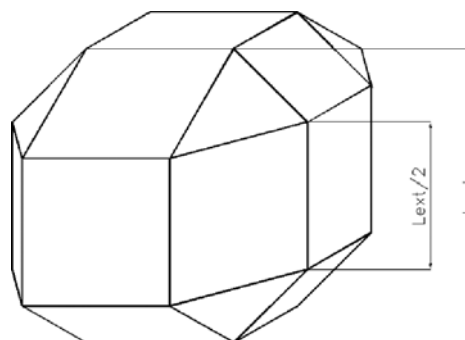


Fig. 5 – Forma del blocco di prova (dalle Linee di guida EOTA).

Fig. 5 – Shape of the tested block (after EOTA Guidelines).

che può essere approssimata con ottima approssimazione a sferoidale.

Ad esempio, se su una rete paramassi con le medesime caratteristiche venisse lanciato, con la stessa velocità, un blocco di massa $m = 1085$ Kg, le formule (2) e (3) fornirebbero una deformazione massima $s_m = 2,87$ m in un tempo $t_c = 0,175$ s.

Gottardi, Righi e Diotallevi hanno svolto tale prova d'urto, e hanno riscontrato una deformazione massima $s_m = 2,80$ m in un tempo $t_c = 0,19$ s.

Il confronto, in termini di allungamenti massimi e tempi di arresto è stato effettuato anche per le altre 4 prove condotte da Gottardi, Righi e Diotallevi confermando, indipendentemente dalle dimensioni del blocco e dal tipo di barriera impiegata, un ottimo accordo con le previsioni teoriche ottenibili dalla formulazione analitica descritta nel paragrafo precedente.

La tabella I riporta, a confronto, i risultati sperimentali e quelli analitici ottenuti per le 6 prove considerate.

6. Limite di un criterio esclusivamente energetico per la valutazione dell'efficienza di una barriera paramassi

Il presupposto che l'allungamento di una rete paramassi non debba superare un certo valore critico s_c , oltre il quale si possono avere rotture o deformazioni tali da comprometterne l'efficienza è giustificato anche dal fatto [GOTTARDI, RIGHI e DIOTALLEVI, 2005] che le tensioni delle funi di ancoraggio non sono proporzionali alla massa del blocco che impatta, ma appaiono sostanzialmente proporzionali alla deformazione massima della rete.

Pertanto, si può ritenere che una rete paramassi sia efficiente nei confronti di tutti quei blocchi che provocano deformazioni non superiori a quella critica.

Fatta questa premessa, è lecito domandarsi se sia corretto classificare le reti paramassi su basi energetiche o, quantomeno, soltanto su tali basi.

In altri termini, se sia corretto ritenere che una rete paramassi, in grado di assorbire l'urto di un blocco che ha una certa energia cinetica, sia in grado di assorbire l'urto di un qualunque altro blocco avente la stessa o un'inferiore energia cinetica.

Per rispondere a tale quesito si prenda in considerazione la rete paramassi analizzata da Gottardi, Righi e Diotallevi (prove n. 5 e 6), della quale nel precedente paragrafo è stata calcolata la costante η , supponendo (a titolo di esempio) che il suo allungamento critico sia $s_c = 5$ m.

1) Un blocco sferoidale di massa $m = 24990$ Kg impatta sulla rete con velocità $v_0 = 25,74$ m/s.

In base alla formulazione analitica qui presentata esso provoca un allungamento massimo $s_m = 5$ m.

2) Un blocco di massa $m = 3320$ Kg e avente la forma irregolare, anziché quella di una sfera, impatta sulla rete con velocità $v_0 = 25,74$ m/s, e l'area di contatto, a causa della forma irregolare del blocco, è un terzo di quella che avrebbe (a parità di massa) se fosse sferica ($k = 194289/3$ kg/m). Secondo la formulazione analitica qui riportata esso provoca un allungamento massimo $s_m = 6,28$ m.

La conclusione è piuttosto evidente. Il blocco dell'esempio 2 danneggia la rete, in quanto provoca una deformazione maggiore di quella critica. Il blocco dell'esempio 1, pur avendo un'energia quasi otto volte maggiore, non danneggia la rete. Ciò significa che le reti paramassi non possono essere classificate su basi esclusivamente energetiche.

È importante aggiungere che le linee guida dell'EOTA, pur arrivando ad una classificazione delle barriere a rete sulla base dei livelli d'energia cinetica assorbibili, di fatto impongono, con qualche margine di tolleranza, sia le dimensioni, sia la densità dei blocchi da utilizzare nella sperimentazione.

La densità dei blocchi, costituita da cemento semplice o armato, deve essere compresa tra 2500 kg/m³ e 3000 kg/m³, mentre la grandezza massima del blocco (lato esterno del poliedro) deve essere 3 volte inferiore all'altezza nominale della rete.

Queste restrizioni portano ad avere una minor variabilità dei livelli di energie massime e di servizio assorbibili da uno stesso tipo di barriera a rete, con il vantaggio di facilitarne una più immediata classificazione, anche se relativamente oggettiva.

7. Proposta di un metodo per valutare l'efficienza di una barriera a rete

Nel presente paragrafo si propone un metodo per stimare la massa dei blocchi che, senza danni, possono essere arrestati da una barriera paramassi.

Dalla (2) si deduce che

$$\omega^2 = \frac{2s_m g \sin \alpha + v_0^2}{s_m^2}$$

da cui segue, tenendo conto della (5):

$$m = \left(\frac{\eta s_m^2}{2s_m g \sin \alpha + v_0^2} \right)^3 \quad (6)$$

dove m è la massa del blocco sferoidale, e η è la costante della rete.

Si suppongano note la velocità massima v_m con cui un blocco può impattare sulla rete, e l'allungamento critico s_c della rete.

Posto:

$$m_c = \left(\frac{\eta s_c^2}{2s_m g \sin \alpha + v_m^2} \right)^3 \quad (7)$$

dalla (6) segue che qualunque blocco sferoidale di massa $m < m_c$, che impatta con una velocità $v_0 < v_m$, provoca un allungamento della rete inferiore a quella critica.

In altri termini, la rete è in grado di assorbire l'urto di un qualunque blocco a simmetria sferica, la cui massa non supera m_c , che può essere definita la massa critica per la rete. Naturalmente ciò non esclude che un blocco avente una massa inferiore a quella critica, ma una forma non sferoidale, possa provocare un allungamento maggiore di quella critica.

Per tener conto in qualche misura anche di massi aventi forma irregolare, si può correggere la (7), assumendo come massa critica:

$$m_c = \left(\frac{i}{100} \frac{\eta s_c^2}{2s_m g \sin \alpha + v_m^2} \right)^3 \quad (8)$$

dove i ($0 < i < 100$) è un fattore di sicurezza il cui significato è abbastanza chiaro: la rete è in grado di arrestare senza danni un blocco di massa $m < m_c$ anche nel caso in cui la sua superficie di impatto sia l' $i\%$ di quella che avrebbe (a parità di massa) se fosse sferoidale.

Si passi ad un esempio pratico: si consideri nuovamente la barriera a rete esaminata da Gotardi, Righi e Diotallevi nelle prove 5 e 6, per le quali $\eta = 872,77$, assumendo che sia $s_c = 5$ m e $v_m = 30$ m/s.

Calcolando la (8) con $i = 66$ si ottiene $m_c = 3095$. Ciò significa che tale rete è in grado di arrestare blocchi di massa m non superiore a 3095 Kg, anche nel caso in cui la superficie di impatto sia i due terzi di quella che avrebbe il blocco se (a parità di massa) fosse sferoidale.

8. Impiego di barriere a rete per altri tipi di interventi di protezione del territorio e considerazioni conclusive

Nella pratica ingegneristica la scelta della tipologia di un'opera di difesa da caduta di massi e il suo dimensionamento avviene successivamente allo studio delle caratteristiche dei possibili percorsi di caduta dei blocchi potenzialmente instabili presenti su pareti rocciose.

Tali studi prevedono rilievi e indagini sul territorio per la messa a punto di un modello previsionale di calcolo delle traiettorie, velocità ed energie

cinetiche che i massi distaccabili da un versante possono assumere durante il loro percorso di caduta.

La scelta, quando necessaria, della posizione dove installare opere di protezione capaci di intercettare i massi movimentatisi lungo un pendio viene spesso svolta analizzando le energie cinetiche che i blocchi assumono durante il loro percorso e cercando, nell'area utilizzabile per la difesa di strutture e infrastrutture, i punti ove tali energie sono minime [GIANI, 1992, 1997; GIANI *et al.*, 2004].

Il valore dell'energia cinetica da assorbire costituisce quindi il primo dato considerato per dimensionare e verificare l'opera di difesa da progettare.

Questo fatto può, come si è visto in questa nota, portare a errori nella progettazione di barriere in quanto, a parità di energia cinetica, un'opera di difesa può deformarsi in modo completamente diverso, fino a raggiungere anche la rottura, per il fatto che la deformazione del sistema di arresto dipende anche dalla superficie di contatto tra masso e rete di protezione.

L'errore di trascurare la dimensione di quest'area di contatto può essere ridotto se il criterio di verifica di una barriera a rete, formulato su base energetica, viene limitato all'analisi degli impatti di blocchi della stessa forma, volume e peso.

L'inadeguatezza di un criterio di verifica esclusivamente energetico diventa cruciale quando una barriera a rete viene utilizzata per la difesa del territorio da frane per colamento detritico o da valanghe di neve.

Le linee guida dell'EOTA non riguardano ancora l'utilizzo di queste strutture metalliche per la protezione del suolo da queste situazioni, ma è comunque usuale il loro utilizzo come paravalanghe o come difesa da debris flow.

È innanzi tutto da evidenziare come, a causa dell'elevata deformabilità, rispetto a un blocco di roccia, sia della neve, sia del detrito estremamente sciolto e umido, la superficie di una rete paramassi possa trovarsi completamente a contatto con il materiale impattante.

La conseguenza di tutto ciò è che, a parità di energia cinetica, l'allungamento che subisce una rete di protezione è sensibilmente inferiore quando subisce l'impatto della neve e del detrito, rispetto a quello conseguente all'impatto di un blocco di roccia.

La maggiore complessità del fenomeno di impatto di una colata di neve o di detrito su una rete rispetto a quella dell'impatto di un singolo blocco roccioso non permette l'utilizzo dell'equazione 1 come equazione del moto del colamento. In ogni caso anche per i fenomeni di colamento, l'energia cinetica al momento dell'impatto non può essere considerata come il primo elemento per la classificazione di una barriera di protezione di valanghe e colate.

Bibliografia

- BALLESTER MUNOZ F., FONSECA J.L.F., TORRES VILAS J.A. (1996) – *Protection contra desprendimientos de rocas – Pantallas dinamica*. Ministerio de Fomento. Secretaria de Estado de Infraestructuras y Transportes, Direccion General de Carreteras.
- DE COL R., COCCO S. (1996) – *Motivazioni tecniche ed economiche per la standardizzazione di prove sulle opere paramassi nella Provincia Autonoma di Trento*. Giornata di studio su. “La protezione contro la caduta di massi dai versanti rocciosi”, Associazione Georisorse e Ambiente, Torino, pp. 65-72.
- DUFFY J.D. (1992) – *Field tests of flexible rockfall barriers*. Brugg Technical note.
- DUFFY J. (1996) – *Field tests and evaluation of HI-tech low energy chain link rockfall fence*. Report n. CA/05-96-01. California Dept. of Transportation. San Luis Obispo. Ca.
- EOTA (2006) – (Organizzazione Europea per il Benessere Tecnico). – *Linee guida per il benessere europeo di Kit di protezione contro la caduta di massi*.
- FRANZETTI S., LURASCHI D. (1974) – *Due nuovi metodi di prevenzione e protezione dalla caduta di masse rocciose su centri abitati e opere civili*. Le strade (10).
- GIANI G.P. (1992) – *Rock slope stability analysis*. Balkema, Rotterdam, NL.
- GIANI G.P. (1997) – *Caduta di massi - Analisi del moto e opere di protezione*. Hevelius Edizioni, pp. 1-118.
- GIANI G.P., GIACOMINI A., MIGLIAZZA M., SEGALINI A. (2004) – *Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design*. Rock Mech. Rock Engng, 37 (5), pp. 369-389.
- GOTTARDI G., RIGHI P.V., DIOTALLEVI P.P. (2005) – *Relazioni tecniche delle prove d'urto in scala reale su Barriere paramassi Mod. CTR 10/04/B, Mod. CTR*

20/04/A, Mod. CTR 20/04/B, Mod. CTR 30/04/A. Contratto di ricerca tra il DISTART dell'Università di Bologna e il Consorzio Triveneto Rocciatori s.r.l. di Fonzaso (BL).

- PEILA D., PELIZZA S., SASSUDELLI F. (1995) – *Prove in scala reale su barriere paramassi deformabili a rete*. GEAM 86, pp. 147-153
- PEILA D., PELIZZA S., SASSUDELLI F. (1998) – *Evaluation of behaviour of rockfall restraining nets by full scale tests*. Rock Mech. Rock Engng. 31, 1, pp. 1-24
- SMITH D.D., DUFFY J.D. (1990) – *Field tests and evaluation of rockfall restraining nets*. TL-90/05. Final Report, California Dept. of Transportation. San Luis Obispo, Ca.

Methods of analysis of rockfall protection fence efficiency

Summary

An analytical formulation of the impact of a block on protection fences is reported in this paper.

After a bibliographic review of block impact on metallic net tests, some particular tests carried out to certificate the capability of protection works, according to European guidelines, are examined.

The analytical formulation applied to the block impact arrest computation, observed in these tests, allowed us to find a good agreement between experimental and analytical results and therefore validates the model.

The application of the analytical formulation to blocks having different impact characteristics put into evidence that the use of energetic criteria is not sufficient for a good work design.