G. Ilov. Rockfolls – the practical solution for protection-walls. Patishta 2/2005

Уловителни (джоб) стени – едно практическо решение за ударното натоварване върху стената

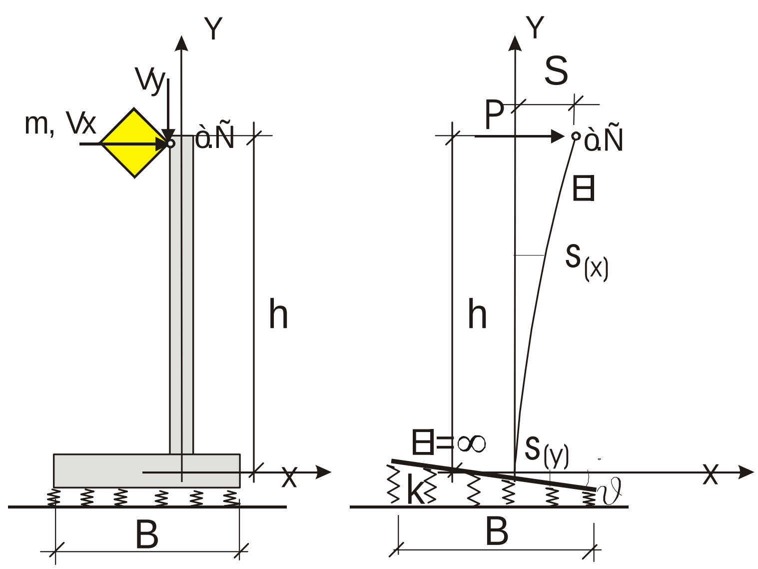
Г. Илов

Уловителните или **Джоб-стените** са конструкции, зад които се събира свлечен от склонове и откоси почвено-скален материал. Периодически се почистват и когато свличането става продължително във времето и свлечените материали не са големи по размер, натоварването върху стените се взема като земен натиск и проектирането не представлява проблем. Проблемни са случаите, когато стените обезопасяват пътища в участък на срутищни прояви и тогава тяхната функция е да поемат удари от откъснатите скални блокове, които падайки по наклонения склон, достигат стената и се удрят в нея. В тези случаи натоварването върху стенната конструкция е ударно (динамично) и е в значителна степен по-голямо като въздействие.

В [1] е изследвано движението на откъснати скални блокове от откоси и склонове. Описани са параметрите на движението, траекториите и критериите за последващо движение, както и скоростите на движението в даден момент. Ту ще бъде разгледан въпроса за динамичното натоварване от удрящите стената скални блокове.

1. Подход за решаване на проблема

Като изходни параметри се приемат (фиг.1), компонентите на скоростта V_x и V_y на скалния блок в момента на удара, мястото на удар върху стената, масата на скалния блок m и размерите на стената. Ще се търси преводен динамичен коефициент, който чрез теглото на скалния блок ще дава възможност да се получава ударната динамична сила с която ще се изследва якостно и стабилитетно стената.



Фиг. 1. Уловителна джоб стена с изчислителна схема за определяне на ударни товари от откъснати скални блокове

На фиг. 1 е показана изчислителна схема, на базата на която ще бъде показано едно решение, използващо Закона за запазване на енергията. Приема се, че стенната конструкция е от ъглов тип. Скалният блок удря стената в нейната корона. Тялото на стената се приема с крайна коравина EI, а фундаментът на стената за безкрайно корав елемент – EI=∞ . Върху стената няма друго натоварване, а нейните опорни условия се характеризират с известното легло от Винклеров тип с характеристика k.

Следствие удара от скален блок с маса m, на нивото на короната (или в т. C) преместването на стената е $S_C = S_d$ (S). Това преместване е следствие на огъването на конзолната част на стената и следствие завъртането на коравата фундаментна част.

Ако с S_d се означи преместването следствие удара на блока, с S - преместването от статична сила, равна на собственото тегло на блока и с M се означи редуцираната маса на системата, то може да се запише:

- **за кинетична енергия на тялото в момента на удара:**

$$E_K = \frac{1}{2} m.V^2 + P.S_d \; .$$

Ако се приеме връзка между преместването S и силата, която го предизвиква от вида (решението е за еластично поведение на системата):

$$P = C.S\,(S_d)\,, \tag{1}$$

се получава:

$$E_K = \frac{1}{2} m.V^2 + C.S.S_d \; . \tag{2}$$

- **за кинетична енергия на стената в момента на удара:**

$$E_{k,o} = \frac{1}{2} M.V_o^{\,2}\,, \tag{3}$$

където M е редуцираната маса на системата,

V_o – скоростта на точката от мястото на удара (короната на стената) в момента след удара.

Скоростта V_o може да бъде определена от Закона за запазване на количеството на движението. За системата “тяло-стена” той се записва като:

$m.V = m.V_o + M.V_o$ с решение за скоростта след удара

$$V_0 = \left(\frac{m}{m+M}\right).V \tag{4}$$

- **за потенциалната енергия на деформациите в момента на удара:**

$$E_P = \frac{1}{2} P.S_d \,,$$

което отново с оглед на (1) се получава:

$$E_P = \frac{1}{2} C.S_d^2 \quad . \tag{5}$$

2. Редуцирана маса и кинетична енергия и на стената след удара

При натоварване със сила P в мястото на удара може да се получи следния израз за преместването в т. C (фиг.1):

$$S = S_C = \frac{Ph^3}{3EI} + \frac{12.P.h^2}{kB^3} \,. \tag{6}$$

Първата съставка е следствие огъването на конзолната част от стената, а втората е резултат от завъртането на фундамента на стената (EI=∞). Във формулата с k е отбелязана Винклеровата константа, а с B дължината на фундаментния участък..

От (6) следва връзката между преместване и сила, записана във вида:

$$P = S.\frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})} = C.S \,, \tag{7}$$

където константата

$$C = \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})} \,. \tag{8}$$

Съгласно същата фигура изразите за еластични премествания (еластични линии) за двата участъка от стената поотделно са:

- **за участъка на тялото на стената:**

$$S(y) = \frac{P}{6EI}(3.h.y^3 - y^2) + \frac{12.P.h}{k.B^3}.y \,; \tag{9}$$

- **за участъка на фундамента на стената:**

$$S(x) = \frac{12.P.h}{k.B^3}.x \,. \tag{10}$$

С оглед на (7) и (8) за участъка от тялото на стената от (9) следва:

$$S(y) = S.\frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})}.[\frac{1}{6EI}(3.h.y^3 - y^2) + \frac{12..h}{k.B^3}.y] \,. \tag{11}$$

Приема се, че функцията на изменение на скоростите на отделните точки от стената след удара е подобна на тази на еластичната линия, т.е.

$$V_{0(y)} = V_0 \cdot \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})} . [\frac{1}{6EI}(3.h.y^3 - y^2) + \frac{12..h}{k.B^3}.y] \ . \qquad (12)$$

Кинетичната енергия на стената в момента на удара за този **първи участък** е:

$$E_{kc} = \int_0^h \frac{M(y).V_{0(y)}^{\ 2}}{2} dy \quad \text{или (чрез (12))}$$

$$E_{kc,1} = \int_0^h \frac{A.\gamma}{2.g} V_0^{\ 2} . \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})^2} . [\frac{1}{6EI}(3.h.y^2 - y^3) + \frac{12..h}{k.B^3}.y]^2 .dy$$

с решение:

$$E_{kc,1} = \frac{1}{2} . \frac{G_c}{g.h} . \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})^2} . [\frac{11.h^7}{420.(EI)^2} + \frac{22.h^6}{10.EI.k.B^3} + \frac{48.h^5}{(k.B^3)^2}].V_0^{\ 2} \qquad (13)$$

Вторият участък от стената има еластична линия с уравнение (10). Замествайки връзката (7) се получава:

$$S(x) = S.\frac{12.h}{k.B^3} . \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})} .x \ . \qquad (14)$$

Тук също за изменението на скоростите на точки от фундаментния участък се приема аналогична на (14) функция или

$$V_{0(x)} = V_0 . \frac{12.h}{k.B^3} . \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})} .x \ . \qquad (15)$$

Кинетичната енергия след удара на стената от втория участък (фундамента) е

$$E_{kc,2} = 2\int_0^{\frac{B}{2}} \frac{M_{2(h)}.V_{0(x)}^{\ 2}}{2} dx = V_0^{\ 2} . \frac{G_f}{2.g.h} . (\frac{12.h}{k.B^3})^2 . \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})^2} .2\int_0^{\frac{B}{2}} x.dx$$

като след решение се получава:

$$E_{kc,2} = \frac{1}{2} [\frac{G_f}{.g.B} . (\frac{12.h}{k.B^3})^2 . \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})^2} . \frac{B^3}{12}].V_0^{\ 2} . \qquad (16)$$

Предвид (13) и (16) за обща кинетична енергия на системата след удара може да се запише:

$$E_{kc} = \frac{1}{2} M.{V_0}^2 ,$$

където, за редуцираната маса на стената М се получава:

$$M = \frac{1}{(\frac{h^3}{3EI} + \frac{12.h^2}{kB^3})^2} . \left\{ \frac{G_c}{g.h} . [\frac{11.h^7}{420.(EI)^2} + \frac{22.h^6}{10.EI.k.B^3} + \frac{48.h^5}{(k.B^3)^2}] + [\frac{G_f}{.g.B} . (\frac{12.h}{k.B^3})^2 . \frac{B^3}{12}] \right\} \quad (17).$$

3. Коефициент на динамичност за ъглова джоб стена.

Показаните изрази (2), (3) и (4), заместени в **Закона за запазване на енергията**

$$E_k = E_{kc} + E_P \qquad (18)$$

водят до квадратното уравнение:

$$S_d^2 - 2.S.S_d - \frac{1}{C}(m.V^2 - M.{V_0}^2) = 0 \qquad (19)$$

от който ще се търси решение във вида:

$$S_d = k_d \,.\, S, \qquad (20)$$

където k_d е коефициентът на динамичност за системата “тяло-стена”.

Реалният корен на уравнението (6) е:

$$.S_d = (1 + \sqrt{1 + \frac{1}{C.S^2} .(m.V^2 - M.V_0^2}).S ,$$

като

$$k_d = (1 + \sqrt{1 + \frac{1}{C.S^2} .(m.V^2 - M.V_0^2}).. \qquad (21)$$

Коефициентът на динамичност предвид (4), (7) и (8) може да се запише окончателно във вида:

$$k_d = (1 + \sqrt{1 + \frac{.V^2}{g.S} .[1 - \frac{M.m}{(m+M)^2}]} \qquad (22)$$

в който израз:

m – масата на тялото (скалния блок);

М – редуцираната маса на на стената - определя се по (17);

V – скоростта на тялото в момента на удара;

V_0 – скоростта на точката (сечението) от стената в мястото на удара в момента след удара;

S – статическото преместване на точката от мястото на удара от сила Р и по посока на силата – определя се чрез (6).

Пример: Да се изчисли динамичният коефициент при удар на стена ъглов тип, висока h=4.00 м, ширина в основата B=2.00 m; дебелина на конзолната част d=0.20 m, средна дебелина на фундамента df=0.30 m; дължина на секцията l=4.00 m; коефициент на леглото k=20000 kPa/m2; модул на деформация за бетона 20000 MPa. Стената се удря от скален блок с маса 250 kg със хоризонтална компонента на скоростта V=10 m/sec.

Редуцираната маса на стената чрез (17) е получена M=552 kg.

Преместването на точката от мястото на удара статично от сила Р (силата на теглото на блока P=2.5 kN чрез (6) е получено S=0.007 m.

За динамичен коефициент (чрез (25)) се получава:

$$k_d = (1 + \sqrt{1 + \frac{10^2}{10.0,007} . [1 - \frac{0,552.0,25}{(0,25 + 0,552)^2}}] = 30.69$$

Един коефициент, който създава динамична сила $P_d = k_d \; . \; P = 30.69 \; . \; 2.5 = 76.7$ kN.

Подобен снаряд притежава голяма енергия. Той по всяка вероятност ще предизвика разрушения в стената и евентуално може да бъде спрян от оголената армировка на конзолната част от стената след пръсването на бетона от зоната на удара. Тази армировка има много по-голяма деформируемост и тя ще погаси в по-голяма степен енергията на удара.

4. Някои изводи за коефициента на динамичност

Изложената схема за коефициента на динамичност може да бъде прилагана и за всяка друга укрепително-предпазна конструкция от стоманобетон. Както е видно проблемите са два: определянето на редуцираната маса на предпазната конструкция и големината на преместването в мястото на удара от статичен товар. И двата проблема са решими за всяка конструкция, но за целта са необходими специализирани програми.

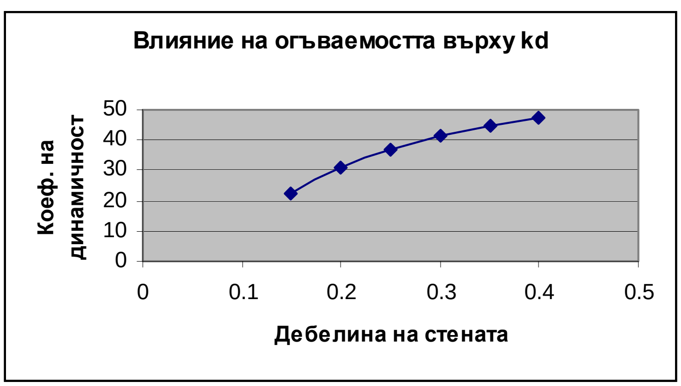
В разглежданият случай решението е сравнително точно само за стени – ъглови и тежки, на малки секции, работещи самостоятелно като укрепителни звена. И това е така, защото решението е за “равнинна задача” с дължина на секцията един линеен метър. Когато стената е достатъчно висока, решението може да бъде прието за коректно.

Ако се запази равнинността на задачата, може да се изследва какво е изменението на коефициента на динамичност с увеличаване на дължината на секцията. За конкретният случай това изменение би се отразило на редуцираната маса и на преместването в мястото на удара. За данните от примера е получена графиката от фиг. 2, където е отразено влиянието на дължината на секцията върху динамичният коефициент.

Фиг.2. Зависимост на kd от дължината на секцията

Изводът от показаното е логичен – търси се голяма секция, за която относително се забавя нарастването на kd.

На фиг. 3 е показно изменението на динамичния коефициент в зависимост от огъваемостта на стената. Изследването е за ширина 1 м (секция един метър) и резултатите се приемат за коректни.

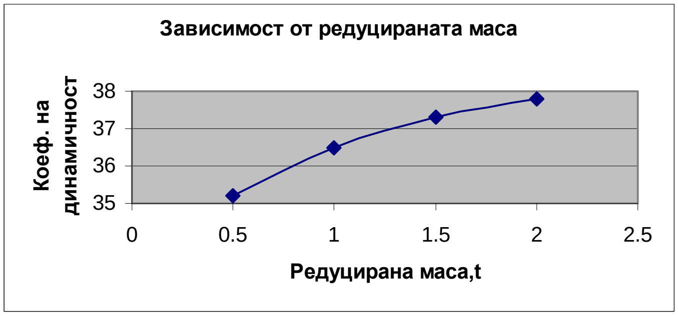


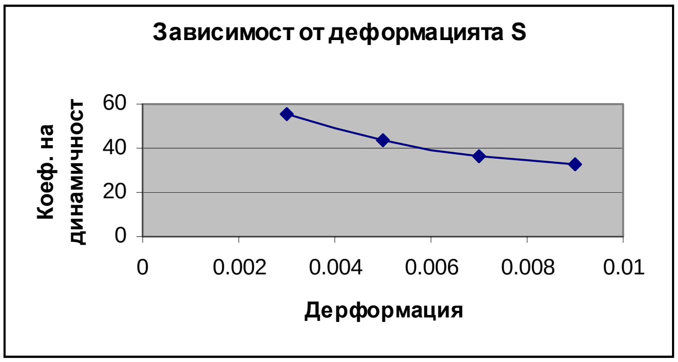
Фиг.3. Влияние на огъваемостта (чрез дебелината на стената) върху динамичния коефициент

Също логичен е резултатът за изменението на kd.

Подобни зависимости се получават и за благоприятното влияние на подаваемостта на основата чрез коефициента на Винклер и намаляването на модула на деформация.

На фиг. 4. за показани резултатите от изменението на собствената маса М върху стойността на kd. Прави впечатление, че при двойно увеличение на собствената маса, резултатът за kd не е така чувствителен. Съвсем не стои така въпроса за изменението на kd в зависимост от деформацията S в мястото на удара. Например при двойно намаляване на S, резултатът за kd намалява близо наполовина.





Фиг.4. Зависимости за коефициента на динамичност от големината на редуцираната маса и от деформацията при статично натоварване в мястото на удара.

Всички зависимости са очаквани и дават насоки за начините чрез които може да се регулира големината на динамичното натоварване.

5. Резултати от експлоатацията на една стена

На фиг. 5 и 6 са показани няколко снимки от една стена, построена при работещо срутище (път Сестримо-Чаира), изпълняваща ролята и на уловителна. Стената е сглобяема, стоманобетонна с височина 4 m, с надстройка от метална ограда с мрежа.

Фиг.5. Срутището с укрепителната стена 1999 год. и 2004 год.

Фиг.6. Някои от разрушенията в стената след 1999 год.

В периода на експлоатация, стената се е запълнила със срутен скален материал и в момента е пълна до короната на стоманобетонната част.До 1999 год. стената е понасяла добре ударите от скалните блокове и повреди по нея практически няма. След това са получени няколко сериозни удара от блокове с маси между 50 и 150 kg, резултатите от които се виждат на снимките от фиг.6. Явно металната част от стената не е проектирана да поема подобни удари и на 2 места е разрушена (блоковете са преминали през нея). Стоманобетонната част е ударена на 4 места с различна енергия на удара и резултатите са по-ясно или по слабо изразено натрошаване на бетона. Отделните отломки са паднали и то в момента на удара.

Може да се предположи, че в зависимост от силата на удара, армировката е амортизирала енергията от удара и е поела натоварването от него, без блокът (разбира се разтрошен) да попадне на пътя. В други случаи, когато удара е съвсем близо до короната, разрушението е много по-ясно проявено и липсата на напречна армировка не е позволило мрежата на армировката да заработи. Изводът, който може да се направи е, че ударите предизвикват разрушение в стената, натрошават бетона в зоната на удара, но блокът е уловен от мрежестата преграда на армировката на уловителната стена.

Литрература:

[1]. Илов, Г., Ч. Косева. Движение на скални тела по склонове и откоси – програма за Правец 82. Сп. Пътища 12/1988.

[2].Върбанов. Динамика и устойчивост на съоръженията. Техника, 1968 год.

[3]. Spang, R. Protection against rockfalls - design of rock slopes. Proc. of 6-th Int. congress of RM. Monreal, Canada 1987.

3