

УДК 624.012.45

КАМЕННЫЕ БАЛКИ, УСИЛЕННЫЕ ОДНОСТОРОННЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБОЙМОЙ

КАМ'ЯНІ БАЛКИ, ПІДСИЛЕНІ ОДНОСТОРОННЬОЮ ЗАЛІЗОБЕТОННОЮ ОБОЙМОЮ

BEAMS OF STONE MATERIALS, STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE CLIP

Азизов Т.Н., д.т.н., проф., Мыза А.С. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Азізов Т.Н., д.т.н., проф., Миза О.С. (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Azizov T.N., Doctor of Engineering, Profesor, Miza A.S. (Odessa State Academy of Construction and Architecture)

Приведен алгоритм расчета каменных балок, усиленных боковой железобетонной обоймой. На примере газобетонной балки, усиленной железобетонной обоймой, показана эффективность такого усиления, а также проанализированы факторы этого влияния.

Наведено алгоритм розрахунку кам'яних балок, підсилені залізобетонною обоймою. На прикладі газобетонної балки, яка підсилена залізобетонною обоймою, показана ефективність такого підсилення, а також проаналізовані фактори цього впливу.

The algorithm for calculating the stone beams, reinforced concrete side clip. For example, gas concrete beams, reinforced concrete clip, shows the efficiency of the amplification. The factors that influence.

Постановка задачи и анализ исследований. В литературе [3-7] предлагаются различные способы устройства обойм для усиления. Это односторонние или двусторонние обоймы, которые крепятся к стене, как правило, сквозными хомутами или ершами.

В литературе практически не встречаются работы, в которых рассматривались бы изгибаемые каменные конструкции, усиленные односторонней железобетонной обоймой, а также работы по исследованию усиления конструкций из легковесных блоков, усиленных железобетонными обоймами, в том числе легковесных изгибаемых конструкций.

Вопрос о возможности использования односторонних и двусторонних железобетонных обоек для усиления изгибаемых каменных конструкций, в том числе конструкций из легкобетонных блоков сдерживается отсутствием методики расчета таких конструкций. В [1] приведен принцип расчета вышеописанных комбинированных конструкций. Однако окончательного алгоритма расчета, пригодного для практического применения нет.

В связи со сказанным **целью настоящей статьи** является развитие методики расчета изгибаемых каменных конструкций, усиленных односторонней железобетонной обоймой, приведенной в [1] и разработка алгоритма расчета таких конструкций.

Изложение основного материала. Рассмотрим изгибаемый элемент, состоящий из двух слоев (в вертикальной плоскости), соединенных между собой связями в отдельных точках [1] (рис. 1).

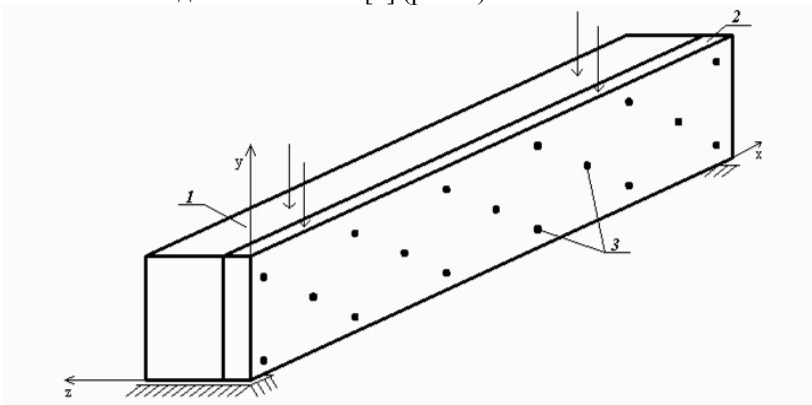


Рис. 1. Схема двухслойного изгибаемого элемента.

1 – каменная балка; 2 – железобетонная обойма; 3 - связи

Для расчета согласно [1] рассечем мысленно комбинированную конструкцию на два отдельных слоя (две балки) по слоям 1 и 2 (см. рис. 1). В местах рассечения связей и в первом, и во втором отсеченных слоях (балках) будут действовать неизвестные вертикальные S_i и горизонтальные T_i силы, где i – номер связи (рис. 2). Эти неизвестные могут быть определены составлением уравнений совместности деформаций (перемещений) для слоя 1 и слоя 2 комбинированной конструкции.

Из всех составляющих перемещений, приведенных в [1], не будем учитывать составляющие от кручения в результате внецентренного приложения усилия в связях, от изгиба составляющих систему стержней из плоскости. Тогда оставшиеся составляющие перемещений будут включать:

Вертикальные перемещения в i -той точке складываются из составляющих:

1. от изгиба внешней нагрузкой;

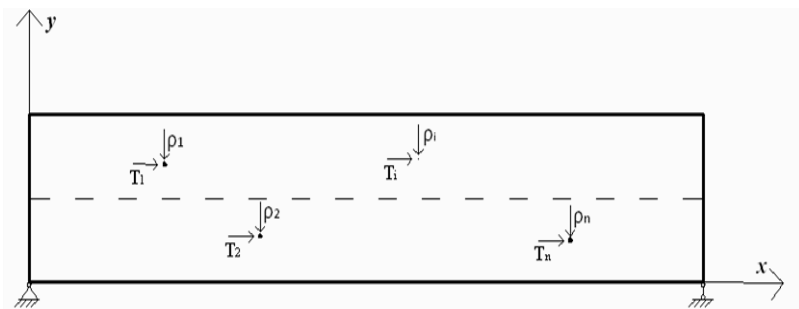


Рис. 2. Схема усилий в связях

2. от изгиба вертикальными силами S_i (см. рис. 2);
3. от изгиба моментами, создаваемыми горизонтальными силами T_i . При этом если сила находится выше нейтральной оси балки, момент положительный, если ниже – отрицательный (рис. 2);
4. от местного смятия в точке приложения вертикальной силы S_i (деформация связи и смятие бетона под связью).

Горизонтальные перемещения в i -той точке складываются из составляющих (при этом если точка находится выше нейтральной оси или ниже ее, то перемещения имеют разные знаки):

5. от изгиба внешней нагрузкой;
6. от изгиба вертикальными силами S_i ;
7. от изгиба моментами, создаваемыми горизонтальными силами T_i в плоскости XOY (см. рис. 3);
8. от сжатия (растяжения) силами T_i ;
9. от местного смятия в точке приложения горизонтальной силы T_i

Выражение для определения горизонтального перемещения в месте расположения i -той связи выглядит [1]:

$$v_i = T_1 a_{i,1}^t + T_2 a_{i,2}^t + \dots + T_n a_{i,n}^t + S_1 a_{i,1}^s + S_2 a_{i,2}^s + \dots + S_n a_{i,n}^s + q a_i^q \quad (1)$$

где $a_{i,j}^t$, - коэффициенты при горизонтальных силах T_k , определяемые по известным формулам сопротивления материалов и являющиеся суммами влияния каждой составляющей по п. 5-9 для горизонтальных перемещений;

$a_{i,j}^s$ - то же, при вертикальных силах S_k ;

a_i^q – то же, от внешней нагрузки.

Выражение для определения вертикального перемещения в месте расположения i -той связи выглядит [1]:

$$y_i = T_1 c_{i,1}^t + T_2 c_{i,2}^t + \dots + T_n c_{i,n}^t + S_1 c_{i,1}^s + S_2 c_{i,2}^s + \dots + S_n c_{i,n}^s + q c_i^q \quad (2)$$

где $c_{i,j}^t$ и $c_{i,j}^s$ - коэффициенты, аналогичные вышеописанным (пункты 1-4 для перемещений).

Так, например, составляющая коэффициента $c_{i,1}^s$ при S_1 (см. выражение 2) от изгиба этой вертикальной силой будет равна множителю при силе S_1 выражения (3) для определения вертикального перемещения в точке балки с координатой X_i от силы, расположенной в точке 1 с координатой X_1 (рис. 3) [8]:

$$y = S_1 * \frac{x_1^2 b^2}{6EJl} \left[2 \frac{l-x_i}{b} + \frac{l-x_i}{x_1} - \frac{(l-x_i)^3}{x_1 b^2} \right] \quad (3)$$

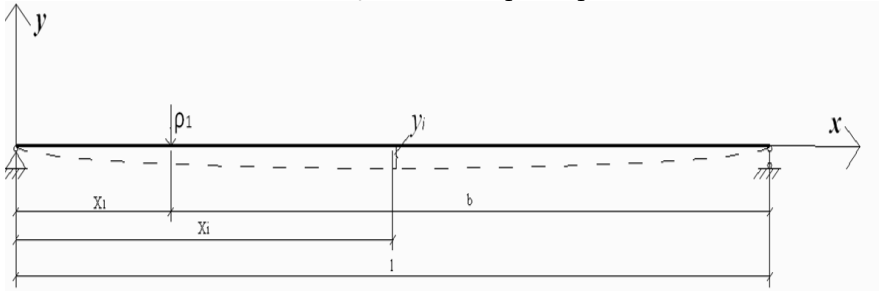


Рис. 3. Схема к определению перемещения от сосредоточенной силы

Выражения для горизонтальных и вертикальных перемещений для второй балки (справа) будут аналогичны выражениям (2) и (3).

Приравнивая перемещения v_i и y_i для балки слева аналогичным перемещениям для балки справа, получим уравнение совместности деформаций в i -той точке конструкции. Составляя такие уравнения для всех n точек комбинированной балки, получим систему $2*n$ уравнений с $2*n$ неизвестными $T_1...T_n, S_1...S_n$.

Алгоритм программы расчета выглядит так.

1. Задаются исходные данные

q_1 – внешняя нагрузка на первую балку (каменный элемент)

q_2 – внешняя нагрузка на вторую балку (обойма)

b_1, b_2, h_1, h_2 – ширина и высота сечения первой и второй балки

l – пролет балки

n – количество связей

$x(i)$ – расстояния по горизонтали от начала координат до связи i (рис. 3)

$h(i)$ – расстояния по вертикали до i -той связи (рис. 2) от нейтральной оси (центра тяжести) элемента. При этом, если связь находится выше нейтральной оси, то $h(i)$ – положительное, если ниже – отрицательное.

2. Вычисляются геометрические характеристики

A_1, A_2, J_1, J_2 – площади и моменты инерций сечений первого и второго стержней;

EJ_1, EJ_2, EA_1, EA_2 – изгибные и осевые жесткости стержней.

3. Вычисляются перемещения анкеров от единичной силы для первого $anker_1$ и второго $anker_2$ стержней по формулам норм [2]:

$$anker_1 = \frac{1000}{d_s^3 E_1^2} + \frac{1}{d_s E_1}; \quad anker_2 = \frac{1000}{d_s^3 E_2^2} + \frac{1}{d_s E_2}$$

4. Внутри цикла (for $i=1$ to n) создается цикл (for $j=1$ to n). При этом i – точка, где рассматривается перемещение; j – точка, к которой приложена горизонтальная сила. На каждом шаге цикла принимаются значения: моментов M от действия единичных горизонтальных сил $T(j)=1$, равные произведению единицы на соответствующую высоту $h(j)$, т.е. $M=h(j)$; $a=x(j)$; $x=x(i)$; $EJ=EJ_1$; $EA=EA_1$. И с этими данными программа отсылается к подпрограмме определения углов поворота и вертикальных перемещений балки от действия горизонтальных сил. Подпрограмма выглядит так:

4.1. Вычисляется угол поворота в нулевом сечении балки

$$\theta_0 = -\frac{Ml}{6EJ} \left(2 - \frac{6a}{l} + \frac{3a^2}{l^2} \right)$$

4.2. Вычисляются угол поворота и вертикальное перемещение:

4.2.1. Если $x>a$, то $\varphi(x) = \theta_0 + \frac{-\frac{M}{2l} * x^2 + M(x-a)}{EJ}$

$$w(x) = \theta_0 x - \frac{Mx^3}{6EJl} + \frac{M(x-a)^2}{2EJ}$$

4.2.1. Если $x<a$, то $\varphi(x) = \theta_0 + \frac{-\frac{M}{2l} * x^2}{EJ}$

$$w(x) = \theta_0 x - \frac{Mx^3}{6EJl}$$

4.3. По результатам вычислений в подпрограмме присваиваются значения:

$$at_1(i, j) = -\varphi(x) * h(i) + x(i)/EA$$

$$ct_1(i, j) = w(x)$$

5. В таком же цикле как в п. 4 принимаются данные для второй балки и аналогично 4.1-4.3 вычисляются $at_2(i, j)$ и $ct_2(i, j)$

6. Внутри цикла (for $i=1$ to n) создается цикл (for $j=1$ to n). При этом i – точка, где рассматривается перемещение; j – точка, к которой приложена вертикальная сила. На каждом шаге цикла принимаются значения от действия единичных вертикальных сил $P=1$; $a=x(j)$; $b=l-x(j)$; $x=x(i)$; $EJ=EJ_1$; $EA=EA_1$. И с этими данными программа отсылается к подпрограмме определения углов поворота балки. Подпрограмма выглядит так

6.1. Вычисляется угол поворота в нулевом сечении

$$\theta_0 = -\frac{Pl^2}{6EJ} \left(-\frac{b^3}{l^3} + \frac{b}{l} \right)$$

6.2. Вычисляются угол поворота и перемещение

6.2.1. если $x>a$, то $\varphi(x) = \theta_0 + \frac{\frac{Pb}{l} * \frac{x^2}{2} - \frac{P(x-a)^2}{2}}{EJ}$

$$w(x) = \theta_0 x + \frac{P * b * \frac{x^3}{6l} - \frac{P(x-a)^3}{6}}{EJ}$$

6.2.2. если $x < a$, то $\varphi(x) = \theta_0 + \frac{\frac{Pb * x^2}{l} - \frac{P}{2}}{EJ}$

$$w(x) = \theta_0 x + \frac{P * b * \frac{x^3}{6l}}{EJ}$$

6.3. По результатам вычислений в подпрограмме формируется массив

$$as_1(i, j) = -\varphi(x) * h(i) \\ cs_1(i, j) = w(x)$$

7. В таком же цикле как в п. 6 принимаются данные для второй балки и аналогично 6.1-6.3 вычисляются $as_2(i, j)$ и $cs_2(i, j)$

8. Создается цикл (for $i=1$ to n). Внутри цикла принимаются значения $x=x(i)$; $EJ=EJ_1$; $q=q_1$. И с этими данными программа отсылается к подпрограмме определения углов поворота и перемещений от внешней нагрузки. Подпрограмма выглядит так:

8.1. Вычисляется угол поворота в нулевом сечении

$$\theta_0 = -\frac{ql^3}{24EJ} \\ \varphi(x) = \theta_0 + \frac{\frac{qlx^2}{4} - \frac{qx^3}{6}}{EJ} \\ w(x) = \theta_0 x + \frac{-\frac{qx^4}{24} + \frac{qlx^3}{12}}{EJ}$$

8.2. По результатам вычислений в подпрограмме формируется массив $bqgor_1(i) = -\varphi(x)h(i)$; $bqvert_1(i) = w(x)$.

9. В таком же цикле как п. 8 принимаются данные для второй балки и формируется массив $bqgor_2(i)$; $bqvert_2(i)$.

10. Далее формируется массив коэффициентов системы уравнений:

10.1. В циклах (for $i=1$ to n) и (for $j=1$ to n)

если $i=j$, то $a(i, j) = at_1(i, j) - at_2(i, j) + anker_1 + anker_2$

если $i \neq j$, то $a(i, j) = at_1(i, j) - at_2(i, j)$

10.2. В циклах (for $i=1$ to n) и (for $j=n+1$ to $n*2$)

$$a(i, j) = as_1(i, j - n) - as_2(i, j - n)$$

10.3. В циклах (for $i=n+1$ to $n*2$) и (for $j=1$ to n)

$$a(i, j) = ct_1(i - n, j) - ct_2(i - n, j)$$

10.4. В циклах (for $i=n+1$ to $n*2$) и (for $j=n+1$ to $n*2$)

если $i=j$, то

$$a(i, j) = cs_1(i - n, j - n) - cs_2(i - n, j - n) - anker_1 - anker_2$$

если $i \neq j$, то $a(i, j) = cs_1(i - n, j - n) - cs_2(i - n, j - n)$

11. Формируется массив свободных членов уравнений

11.1. В цикле (for i=1 to n)

$$b(i) = -bqgor_1(i) + bqgor_2(i)$$

11.2. В цикле (for i=n+1 to n*2)

$$b(i) = -bqvert_1(i - n) + bqvert_2(i - n)$$

12. После формирования массивов свободных членов и коэффициентов уравнений программа отсылается к подпрограмме решения системы уравнений, решение которой дает нам неизвестные:

при значениях i от 1 до n неизвестные $x(i)$ соответствуют определенным горизонтальным силам $T(i)$; при значениях i от $n+1$ до $2n$ неизвестные $x(i)$ соответствуют определенным вертикальным силам $S(i-n)$.

После определения неизвестных каждая из двух балок рассчитывается как статически определимая конструкция, на которую действуют внешние силы и определенные из решения системы уравнений по вышеприведенному алгоритму неизвестные усилия $T_1...T_n, S_1...S_n$ в связях.

В таблице 1 приведены результаты расчета комбинированной балки пролетом 3000мм, состоящей из газобетонных блоков толщиной (шириной сечения) 200 мм и высотой 300 мм, усиленных односторонней обоймой из тяжелого бетона толщиной b_2 (варьируется) с количеством анкеров n (варьируется). Диаметр анкеров d_s (варьируется), расстояние от оси балки до места расположения анкеров по высоте $h=50$ мм. По длине балки анкера распределены симметрично. На газобетонную часть балки действует нагрузка $q=10$ кН/м. В таблице приведен коэффициент усиления k , равный отношению максимального момента неусиленной газобетонной части к максимальному моменту усиленной балки.

Таблица 1

вариант №	b_2	n	Коэф. усиления k при d_s равном				k_{max}/k
			3	6.5	10	14	
1	10	2	1,5	1,61	1,64	1,65	1,1
2	10	3	1,8	1,93	1,96	1,97	1,09
3	10	5	1,79	1,87	1,88	1,88	1,05
4	20	2	1,75	2,04	2,11	2,15	1,23
5	20	3	2,4	2,9	3,01	3,06	1,27
6	20	5	2,44	2,73	2,78	2,8	1,15
7	40	2	2,0	2,59	2,79	2,89	1,44
8	40	3	3,24	4,93	5,47	5,74	1,77
9	40	5	3,45	4,45	4,68	4,77	1,38

Как видно из таблицы, на эффективность усиления влияет диаметр анкеров d_s , толщина бетонной обоймы b_2 , количество анкеров. Существенное увеличение диаметра анкера мало влияет на увеличение коэффициента усиления. Так, при диаметре 14 и 10 мм коэффициенты усиления отличаются незначительно. Разница коэффициентов усиления при различных диаметрах

анкеров (последняя графа таблицы 1) тем больше, чем толще железобетонная обойма. Из таблицы можно также сделать вывод, что для небольших пролетов наиболее эффективным оказывается небольшое количество анкеров (в данном случае 3), соединяющих каменную балку с железобетонной обоймой усиления, что отличается от требований расположения анкеров при устройстве железобетонных обойм [7].

Следует отметить, что результаты, приведенные в таблице 1, получены без учета трещинообразования в балке и учета нелинейных свойств материалов. Учет нелинейных свойств материала обоймы и каменной балки, их трещинообразования можно производить итерационно [1].

Таким образом, разработанный алгоритм расчета, основанный на методике [1], позволяет проводить детальный анализ эффективности усиления при варьировании различных факторов. При этом программа (например, в среде Mathcad) достаточно проста, однако эффективность ее использования высока с точки зрения подбора необходимой проектировщику толщины обоймы, количества и диаметра анкеров, связывающих обойму с усиливаемым каменным изгибаемым элементом.

Выводы и перспективы исследований.

Разработан алгоритм расчета комбинированной каменной балки, усиленной односторонней железобетонной обоймой, позволяющий без применения программных комплексов рассчитывать названные конструкции, достаточно быстро и эффективно варьировать параметры каменной балки, усиленной железобетонной обоймой.

В перспективе предполагается экспериментально проверить достоверность разработанной методики, а также разработать алгоритм расчета с учетом нелинейных свойств материалов.

1. Азизов Т.Н. К расчету каменных элементов, усиленных односторонней железобетонной обоймой / Т.Н. Азизов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 61 – Одеса: ОДАБА, 2016. – С. 3-8. **2.** Азизов Т.Н. Определение крутильной жесткости железобетонных элементов с трещинами / Т.Н. Азизов // Дороги і мости. Збірник наукових праць. Вип. 7. Том 1. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – С. 3-8. **3.** Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будинків та споруд: Навчальний посібник. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2008. – 108 с. **4.** Гриневич Є.О. Підсилення залізобетонних балок локальним обтисненням додатковою зовнішньою арматурою: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Є.О.Гриневич. - Х., 2004. – 19 с. **5.** Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-162:2010. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 97 с. **6.** Каменные и армокаменные конструкции: СНиП II-22-81. – М.: Стройиздат, 1983. – 40 с. **7.** Мальганов А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий / А.И. Мальганов, В.С. Плевков, А.И. Полищук. – Томск: Из-во Томского ун-та, 1992. – 456 с. **8.** Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.