

УДК 624 : 534 : 624.137.5

И.Я.ЛУЧКОВСКИЙ, д-р техн. наук, Д.А.ЧЕПУРНОЙ
Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАССИВНОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛОСОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПКИ

Впервые исследовано влияние местной нагрузки засыпки q на характер распределения пассивного отпора грунта.

Вперше досліджено вплив місцевого навантаження засипки q на характер розподілу пасивного відпору ґрунту.

In this article influence of local loading q on character of distribution of passive repulse of a ground.

Ключевые слова: активное давление грунта, пассивный отпор грунта, подпорная стенка, поверхность скольжения, полосовая нагрузка.

Известно [1, 2], что пассивное давление на подпорную стенку при ее горизонтальном смещении в сторону грунта существенно выше активного давления засыпки. При этом в случае сплошной нагрузки q на поверхности интенсивность пассивного давления определяется зависимостью

$$\sigma_n = (\gamma z + q) \lambda_n + 2c \sqrt{\lambda_n}. \quad (1)$$

Здесь γ – объемный вес грунта; z – глубина сечения; c – коэффициент сцепления; λ_n – коэффициент пассивного давления грунта, равный

$$\lambda_n = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта.

Отметим, что наличие сплошной равномерно распределенной нагрузки q не влияет на наклон невыгоднейших поверхностей скольжения, равных

$$\theta_0 = \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (3)$$

В.В.Соколовским [1] было доказано, что при отсутствии трения грунта по стенке решение теории предельного равновесия полностью совпадает с решением Ш.Кулона. При этом следует подчеркнуть, что получаемое решение дает минимальное значение пассивного давления, хотя численно оно может в несколько раз превосходить величину активного давления грунта, если стенка получит значительное горизонтальное перемещение в сторону засыпки.

Рассматривая полосовую нагрузку на поверхности, нами установлено, что при полосовой нагрузке наклон плоскостей сдвига меняется с глубиной по разным законам. Учитывая особенности расположения плоскостей сдвига по глубине сыпучего, получим три основных расчетных случая распределения нагрузки q относительно стенки.

1. Сплошная распределенная нагрузка q , отстоящая от стенки на расстоянии a (рис.1)

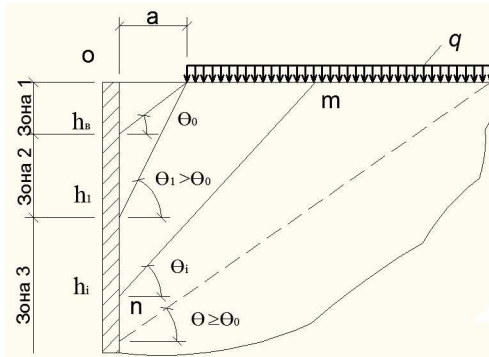


Рис.1 – Расположение плоскостей сдвига при сплошной нагрузке q , отстоящей от стенки

Численные исследования доказали, что в данном случае имеется три характерные зоны (1, 2, 3), внутри которых существуют свои закономерности наклона плоскостей сдвига (θ_i) и распределения равнодействующих пассивного отпора грунта E_{ni} .

Рассматривая условия равновесия призм выпирания в пределах каждой зоны, нетрудно получить невыгоднейшие значения θ_i и E_{ni} в этих зонах.

1.1. Зона 1 (при $c=0$)

$$\theta = \theta_0 = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}; \quad \overline{E_{ni}} = \frac{\overline{h}^2}{q} \lambda_n, \quad (4)$$

где $\overline{E_n} = \frac{E_n}{qa}$; $\overline{q} = \frac{2q}{\gamma a}$; $\overline{h} = \frac{h}{a}$.

1.2. Зона 2

В этой зоне все плоскости сдвига (выпора) приходят на поверхности к левой границе нагрузки q , поэтому нетрудно получить в этой зоне

$$tg\theta = \bar{h}; \quad \overline{E_{n2}} = \frac{\bar{h}(\bar{h} + tg\varphi)}{\bar{q}(1 - htg\varphi)}. \quad (5)$$

1.3. Зона 3

В этом случае плоскости сдвига пересекают нагрузку q в точке m .

Вес призмы выпирания « omn » равен

$$G = \frac{\gamma h^2}{2} \left(1 + \frac{2q}{\gamma h} \right) ctg\theta - qa,$$

а равнодействующая пассивного отпора на глубине h_i может быть представлена в виде:

$$\overline{E_{n3}} = kF_1 - F_2, \quad (6)$$

где F_1 и F_2 – функции влияния, равные:

$$F_1 = F_2 ctg\theta; \quad F_2 = tg(\theta + \varphi); \quad (7)$$

$$k = \bar{h} \left(1 + \frac{\bar{h}}{\bar{q}} \right). \quad (8)$$

Представив функцию F_2 в виде:

$$F_2 = \frac{1 + tg\varphi ctg\theta}{ctg\theta - tg\varphi},$$

найдем значение угла θ_i , соответствующее минимуму пассивного давления. При этом получим

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F_1}{\partial(ctg\theta)} = - \frac{tg\varphi(1 - ctg^2\theta + 2tg\varphi + ctg\varphi)}{(ctg\theta - tg\varphi)^2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial(ctg\theta)} = - \frac{1 + tg^2\varphi}{(ctg\theta - tg\varphi)^2} \end{array} \right. ; \quad (9)$$

$$ctg^2\theta - 2tg\varphi ctg\theta - 1 + \frac{1 + tg^2\varphi}{k tg\varphi} = 0,$$

откуда невыгоднейший угол наклона плоскостей сдвига в зоне 3 определяется из равенства

$$ctg\theta = tg\varphi + \frac{1}{\cos\varphi} \sqrt{1 - \frac{1}{k tg\varphi}}. \quad (10)$$

При $h \rightarrow \infty$ ($k \rightarrow \infty$) нетрудно заметить, что

$$\theta \rightarrow \theta_0 = \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right).$$

1.4. Определение границы зон 2 и 3 – h_1

Граница смежных зон 2 и 3 находится из условия равенства на глубине h_1 равнодействующих пассивного давления E_{n2} и E_{n3} .

Предварительно найдем с использованием (10) значение величины F_2

$$\operatorname{tg}(\theta + \varphi) = \frac{1 + \operatorname{tg}\varphi \operatorname{ctg}\theta}{\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{tg}\varphi} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{k_1 \operatorname{tg}\varphi}}} + \sin\varphi \right) \frac{1}{\cos\varphi},$$

а затем величину равнодействующей \bar{E}_{n3} на глубине h_1

$$\bar{E}_{n3} = \left[\frac{k_1}{\cos\varphi} \left(\sin\varphi + \sqrt{1 - \frac{1}{k_1 \operatorname{tg}\varphi}} \right) - 1 \right] \left(\sin\varphi + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{k_1 \operatorname{tg}\varphi}}} \right) \frac{1}{\cos\varphi}. \quad (11)$$

Величина равнодействующей E_{n2} при $h = h_1$ определяется из (5)

$$\bar{E}_{n2} = \frac{\bar{h}_1 (\bar{h}_1 + \operatorname{tg}\varphi)}{\bar{q} (1 - \bar{h}_1 \operatorname{tg}\varphi)}. \quad (12)$$

Приравнявая (11) и (12), получим исходное уравнение для определения \bar{h}_1

$$\bar{h}_1^2 + \bar{h}_1 \operatorname{tg}\varphi (1 + \bar{q} \bar{E}_{n3}) - \bar{q} \bar{E}_{n3} = 0. \quad (13)$$

Глубина \bar{h}_1 , как нетрудно заметить, находится в диапазоне $\operatorname{tg}\varphi < \bar{h}_1 < \operatorname{ctg}\varphi$, что позволяет достаточно просто решить задачу итерационно. Задаваясь значением h_1 , определяем величину \bar{E}_{n3} по формуле (11), где k_1 вычисляется по зависимости (8) при $\bar{h} = \bar{h}_1$, а затем решаем уравнение (13) и при необходимости продолжаем процесс приближений.

2. «Широкая» полосовая нагрузка

Особенность полосовой нагрузки состоит в том, что плоскости сдвига зоны 3, пересекают только часть нагрузки q , а на глубине $h = h_2$ происходит резкое падение наклона нижней плоскости к горизонту, которая на поверхности выходит за нагрузку (рис.2).

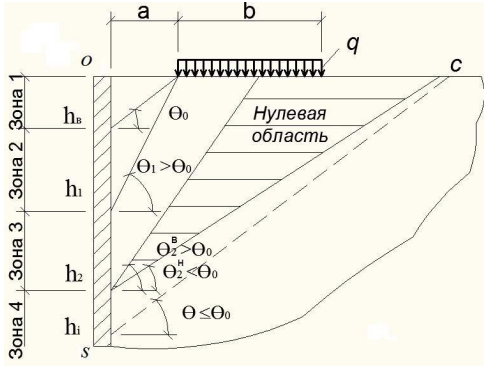


Рис.2 – Распределение плоскостей сдвига при «широкой» полосовой нагрузке q

Следовательно, через точку h_2 проходят две плоскости сдвига, между которыми находится «нулевая область», не имеющая плоскостей скольжения, а ниже глубины h_2 появляется зона 4, все плоскости которой проходят за нагрузкой.

2.1. Зона 4

Рассматривая равновесие призмы выпирания OCS , имеющей вес G , равный

$$\sigma_n = \frac{\gamma h^2}{2} \operatorname{ctg} \theta + b ,$$

нетрудно получить значение равнодействующей пассивного давления на глубине h_i зоны 4

$$\overline{E_{n4}} = \frac{\bar{h}^2}{\bar{q}} F_1 + \bar{b} F_2, \tag{14}$$

где $\bar{b} = b/a$.

Минимальное значение пассивного давления $\overline{E_{n4}}$ найдем, используя зависимости (9) для производных $F_1'(\theta)$ и $F_2'(\theta)$. При этом получим для определения невыгоднейшего угла сдвига уравнение

$$ctg^2\theta - 2tg\varphi ctg\theta - 1 - \frac{\bar{q}\bar{b}(1+tg^2\varphi)}{\bar{h}^2} = 0, \quad (15)$$

из которого найдем для зоны 4

$$ctg\theta = tg\varphi + \frac{1}{\cos\varphi} \sqrt{1 + \frac{\bar{q}\bar{b}}{\bar{h}^2 tg\varphi}}. \quad (16)$$

2.2. Определение границы зон 3 и 4 – h_2 .

Для установления границы h_2 приравняем значение равнодействующих E_{n3} и E_{n4} при $h = h_2$, что приводит к уравнению, решаемому итерационно:

$$\begin{aligned} & \left(\sin\varphi + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{1 - \frac{1}{k_2 tg\varphi}}}}} \right) \left[\frac{k_2}{\cos\varphi} \left(\sin\varphi + \sqrt{1 - \frac{1}{k_2 tg\varphi}} \right) - 1 \right] = \\ & = \left(\sin\varphi + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\bar{q}\bar{b}}{\bar{h}_2^2 tg\varphi}}} \right) \left[\frac{\bar{h}_2^{-2}}{\bar{q}\cos\varphi} \left(\sin\varphi + \sqrt{1 + \frac{\bar{q}\bar{b}}{\bar{h}_2^2 tg\varphi}} \right) + \bar{b} \right]. \quad (17) \end{aligned}$$

3. «Узкая» полосовая нагрузка

Рассматривая «широкую» полосовую нагрузку, мы отметили, что при таком внешнем нагружении засыпки и перемещении сооружения на грунт происходит образование плоскостей сдвига в трех характерных зонах грунтового массива (рис.3), а также «нулевой области», неподверженной сдвигам. Естественно, что при уменьшении ширины « b » полосы q зона 3 будет сужаться за счет поднятия отметки точки h_2 , и при некотором граничном значении $b = b_{cp}$ точка h_2 сольется с h_1 , т.е. третья зона исчезнет. При дальнейшем сужении полосы начнет уменьшаться высота второй зоны (рис.3). Однако, пока существует внешнее нагружение засыпки зоны 1, 2, 4 сохраняются (рис.3).

3.1. Определение граничной ширины полосы нагружения b_{cp} .

Принимаем, что граница деления полос на «узкие» и «широкие» – b_{cp} соответствует отсутствию зоны 3 при полной высоте зоны 2 ($h = h_1$).

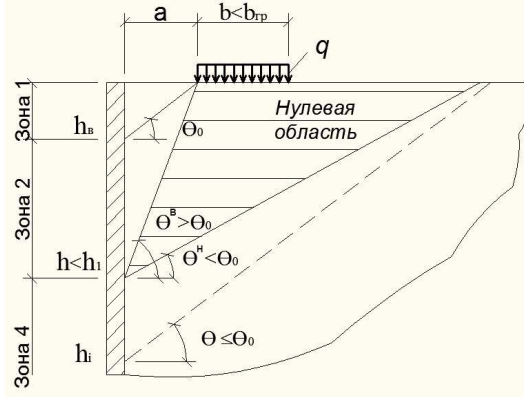


Рис. 3 – Распределение плоскостей сдвига при «узкой» полосовой нагрузке q

Тогда для определения граничной ширины b_{cp} следует приравнять значения E_{n2} и E_{n4} при $h = h_1$. Опуская промежуточные вычисления, представим получаемое уравнение в виде:

$$\alpha_1 = \left(\sin\varphi + \frac{1}{\sqrt{1 + f_1 \bar{b}_{cp}}} \right) \left[\beta_1 (\sin\varphi + \sqrt{1 + f_1 \bar{b}_{cp}}) + \bar{b}_{cp} \right], \quad (18)$$

где $\alpha_1 = \frac{\bar{h}_1 (\bar{h}_1 + tg\varphi)}{\bar{q} (1 - \bar{h}_1 tg\varphi)} \cos\varphi$; $\beta_1 = \frac{\bar{h}_1}{\bar{q} \cos\varphi}$; $f_1 = \frac{\bar{q}}{\bar{h}_1^2 g\varphi}$.

После ряда преобразований получим исходное кубическое уравнение для определения \bar{b}_{cp} :

$$\bar{b}_{cp}^3 f_1 \sin^2\varphi - \bar{b}_{cp}^2 (m_1^2 + 2t_1 f_1 \sin\varphi - \sin^2\varphi) + \bar{b}_{cp} (t_1^2 f_1 - 4\beta_1 m_1 \sin\varphi - 2t_1 \sin\varphi) + t_1^2 - 4\beta_1^2 \sin^2\varphi = 0, \quad (19)$$

где $t_1 = \alpha_1 - \beta_1 (1 + \sin^2\varphi)$; $m_1 = 1 + \beta_1 f_1 \sin\varphi$.

Отметим, что используемая здесь величина \bar{h}_1 определяется из уравнения (13) для сплошной полосы.

3.2. Определение границы зон 2 и 4 для «узкой» полосы ($b < b_{cp}$).

В этом случае граница зон 2 и 4 – h может быть найдена из равенства на границе равнодействующих пассивного отпора E_{n2} и E_{n4} .

Аналогично уравнению (13), в этом случае получим уравнение

$$\bar{h}^2 + \bar{h} \operatorname{tg} \varphi (1 + \bar{q} \bar{E}_{n4}) - \bar{q} \bar{E}_{n4} = 0, \quad (20)$$

где

$$\bar{E}_{n4} = \left(\sin \varphi + \frac{1}{\sqrt{1 + f \bar{b}}} \right) \left[\beta \left(\sin \varphi + \sqrt{1 + f \bar{b}} \right) + \bar{b} \right] \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (21)$$

Здесь, как и ранее, решение находится итерационным методом.

4. Экспериментальные и численные исследования.

Экспериментальное изучение характера распределения плоскостей сдвига при горизонтальном перемещении подпорной стенки на засыпке проводилось в лотке с использованием замедленной фотосъемки. В качестве сыпучего использовались зерна проса с характеристиками $\gamma = 0,762 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 22^\circ$. Ширина лотка – 5 см, высота – 22 см, длина – 50 см. Нагружение поверхности осуществлялось системой узких полосовых грузов при $q \leq 7,89 \text{ г/см}^2$.

4.1. Эксперимент №1

Нагружение осуществлялось сплошной нагрузкой, отстоящей от стенки на расстоянии $a = 5 \text{ см}$, $q = 7,89 \text{ г/см}^2$. Результаты эксперимента показаны на рис.4 и сведены в табл.1.

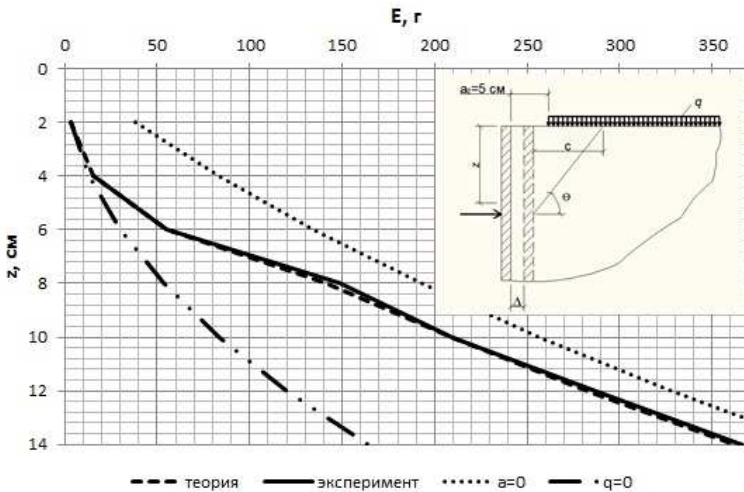


Рис.4 – Зависимость « $E_n - z$ » в эксперименте №1

Таблиця 1

z, см	Експеримент			Теорія		
	c, см	$\theta, ^\circ$	$E_n, \text{г}$	c, см	$\theta, ^\circ$	$E_n, \text{г}$
2	—	—	—	2,96	34	3,34
4	3,5	48,8	15,32	3,5	48,81	15,33
6	3,5	59,7	55,13	3,5	59,74	55,14
8	11	36,0	148,51	7,20	48	140,60
10	11,5	41,0	209,95	11,11	42	209,80
12	12	45	287,24	14,30	40	283,25
14	15	43,03	366,58	17,92	38	362,60

4.2. Експеримент №2

Нагруження здійснювалось нагрузкою шириною $b=7,5\text{см}$, відтощою від стінки на відстані $a = 5 \text{ см}$, $q = 7,89 \text{ г/см}^2$. Результати експерименту показані на рис.5 і свідені в табл.2.

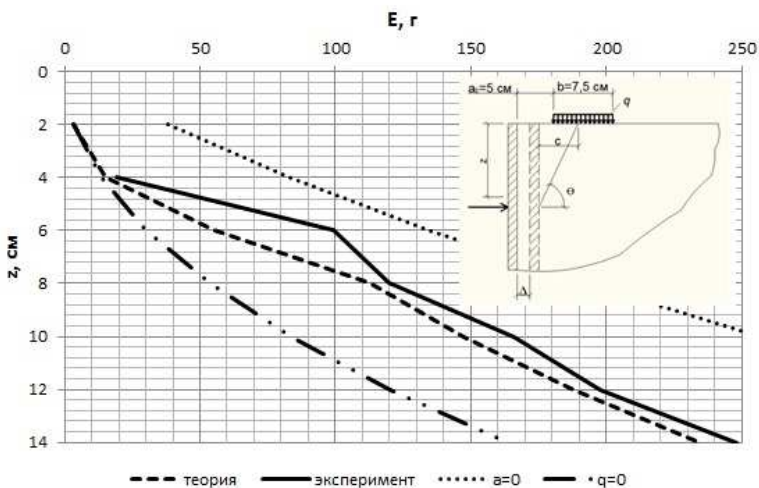


Рис. 5 – Зависимость « $E_n - z$ » в эксперименте №2

Таблиця 2

z, см	Експеримент			Теорія		
	c, см	$\theta, ^\circ$	$E_n, \text{г}$	c, см	$\theta, ^\circ$	$E_n, \text{г}$
2	—	—	—	2,97	34	3,35
4	3,72	47,07	19,37	3,5	48,81	15,33
6	11,72	27,11	99,28	3,5	59,74	55,14
8	17,1	25,07	119,65	26,17	17	112,50
10	15,86	32,23	166,03	27,47	20	147,53
12	20,68	30,13	197,65	29,70	22	188,28
14	21,79	32,72	247,92	31,44	24	234,96

4.3. Выводы по результатам эксперимента

1. При проведении экспериментов установлено, что в процессе горизонтального перемещения подпорной стенки на засыпку плоскости сдвига образуются при значительных смещениях, составляющих в экспериментах $\Delta \approx 1,5$ см. Такие смещения вызывают существенное уплотнение сыпучего, что было замечено ранее В.А.Флориным [3]. Следовательно, расстояние a в процессе опытов снижается до $a_{min} = 3,5$ см.

2. Неравномерность уплотнения сыпучего в пределах призмы выпирания вызывает некоторое отклонение экспериментальных значений углов θ_z от теоретических значений, найденных для однородного массива.

3. Численное определение значений равнодействующих пассивного отпора E_n по установленным в экспериментах углам θ_z оказались достаточно близкими к теоретическим значениям.

4. Для объяснения этого факта нами были проведены исследования кривых изменения E_n на различных глубинах z при всех возможных значениях угла наклона плоскостей сдвига θ (рис.6). Представленные графики показывают, что значения E_n , близкие к минимуму, лежат в широком диапазоне изменения угла θ_z . Поэтому небольшое отличие экспериментальных и теоретических значений этих углов слабо влияет на значение равнодействующей пассивного отпора.

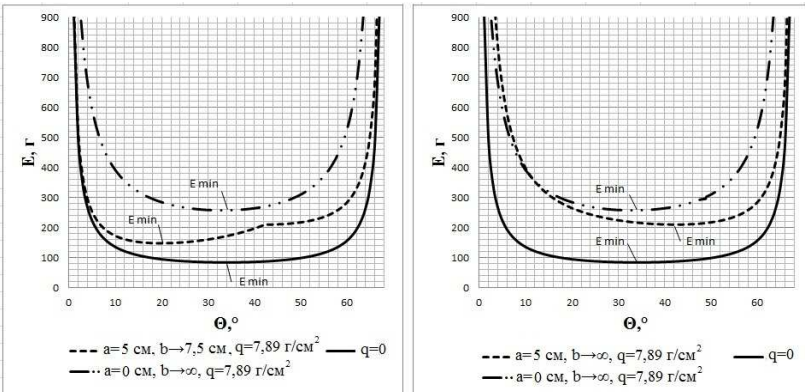


Рис.6 – График зависимости E от θ при $z=10$ см

5. При наличии полосовой нагрузки на поверхности невыгодней-

ший угол наклона плоскостей сдвига θ может оказаться либо больше, либо меньше θ_0 в зависимости от ширины полосы b и интенсивности нагрузки q .

6. Как видно из рис.4, 5, наличие постоянной полосовой нагрузки может существенно повысить значение равнодействующей пассивного отпора.

1.Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – 3-е изд. – М.: Гостехиздат,1955. – 274 с.

2.Клейн Г. К. Расчет подпорных стен. – М.: Высш. шк., 1964. – 196 с.

3.Флорин В. А. Основы механики грунтов. Т.1. – М.: Госстройиздат, 1961. – 543 с.

Получено 20.12.2010

УДК 624.012.45 : 624.046

А.О.ДМИТРЕНКО, канд. техн. наук, Т.А.ДМИТРЕНКО

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ НА ПРОДАВЛЮВАННЯ ПЛИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ БЕЗ ПОПЕРЕЧНОЇ АРМАТУРИ

Викладено розрахунок міцності на продавлювання у залізобетонних плитних конструкціях без поперечного армування з урахуванням поздовжнього армування; проведено порівняння з експериментальними даними.

Приведен расчет прочности на продавливание в железобетонных плитных конструкциях без поперечного армирования с учетом продольного армирования, проведено сравнение с экспериментальными данными.

In article durability calculation on punching shear in ferro-concrete slabby designs without cross-section reinforcing taking into account longitudinal reinforcing is considered; comparison with experimental data is spent.

Ключові слова: продавлювання, плитні конструкції, армування.

Існуюча нормативна методика розрахунку міцності плитних конструкцій на продавлювання без поперечного армування не бере до уваги низку факторів, які впливають на міцність, і потребує їх урахування.

Розрахунок міцності залізобетонних плитних конструкцій на продавлювання без поперечного армування проводиться на основі формули для визначення виникнення похилих тріщин при прольоті зрізу, що рівний 1, тобто під кутом 45^0 , оскільки небезпека руйнування таких елементів після виникнення похилих тріщин досить висока.

На основі дослідних даних для елементів із важкого бетону без попереднього напруження О.С.Залесов та інші вчені рекомендують здійснювати розрахунок виникнення похилих тріщин за формулою (1)