Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и тоннелей

УДК 625.731.7

© М. П. Клековкина, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: 123megapolis@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-184-188

© М. P. Klekovkina, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: 123megapolis@rambler.ru

ВОПРОСЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО СЛОЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЖЕСТКОСТИ В КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

THE ISSUES CONCERNING THE PLACEMENT OF CEMENT CONCRETE LAYER OF VARIABLE STIFFNESS IN THE DESIGN OF ROAD CLOTHES

Рассматривается задача обеспечения эффективной работы дорожной конструкции с асфальтобетонным покрытием и цементобетонным основанием. Выполнен анализ материалов по регулированию жесткости дорожной одежды на основе размещения цементобетонного несущего слоя в конструкции дорожной одежды. Показано, что разработка конструктивных схем типа «обойма» («линзобразных»), в которых промежуточные слои имеют меньший модуль упругости, чем верхний и нижний слои, позволит совершенствовать теорию регулирования жесткости дорожных одежд. Особое значение, в том числе для ремонта асфальтобетонных покрытий, приобретает оценка непосредственной связи между асфальтобетонным покрытием и совмещенным с ним или разделенным прослойкой цементобетонным несущим слоем.

Ключевые слова: регулирование жесткости дорожных одежд, жесткость прослойки, расчетная схема со скачком, связь двух монолитных слоев.

The article considers the problem of efficient performance of the road structure with asphalt concrete pavement and cement concrete base. There has been made an analysis of materials concerning the stiffness regulation of road pavement by means of placing the cement concrete base layer in the pavement structures. It is shown that further improvement of the theory of regulating the pavement stiffness should be focused on the development of construction schemes such as «clip» («lenticular»), in which the upper and lower layers have more modules than the intermediate one. Of particular importance, including the situation with the repair of asphalt concrete pavement, is currently the assessment of the direct connection between the asphalt covering and a concrete bearing layer combined with it or separated with a layer of cement.

Keywords: regulation of pavement stiffness, interlayer stiffness, design scheme with a jump, relationship of two monolithic layers.

При развитии дорожной сети, реконструкции и ремонте дорожной конструкции при наличии старой инфраструктуры, как и в условиях тяжелого и интенсивного движения, сложных грунтово-гидрологических условиях, возникает необходимость использования нетрадиционных дорожных одежд с совмещением слоев на основе минеральных и органических вяжущих.

В реальной практике разработки проектов комбинированных дорожных одежд для реконструкции и строительства, кроме непосредственного контакта слоев асфальтобетона и цементобетона, возникают варианты необходимого их разделения промежуточными слоями для обеспечения эффективной работы конструкции как обоймы или линзы; обеспечения необходимой связи слоев (эффективной связи асфаль-

тобетонного покрытия через щебеночную прослойку с цементобетонным несущим слоем), позволяющей также упростить ремонт асфальтобетонного покрытия холодным или горячим фрезерованием, упростить и удешевить проведение капитального ремонта снятием верхних (над цементобетонным слоем) слоев и усилением конструкции и т. п.

На практике по объективным причинам иногда используют конструкции [7, 9], отличающиеся от принятых типовых схем изменения с постепенным снижением модулей по глубине. В частности, при реконструкции дорожных одежд это может происходить в связи с использованием прослоек между старым покрытием и новыми слоями, в результате чего образуются «системы со скачком», так как прослойки имеют значения жесткости больше или меньше, чем у покрытия.

Вначале целесообразно рассмотреть расчетные схемы конструкции с возможностью регулирования жесткости конструкции [1] за счет прослоек из разных материалов, размеров, с разными формами элементов, характеристиками связей элементов.

При рассмотрении вопросов конструирования дорожных одежд на основе модулей упругости может быть получена исходная расчетная схема, являющаяся первой стадией в рамках действующих методик расчета дорожных одежд.

В данном случае обычно при расчете используют эллиптическую нагрузку, которую приводят к равномерно распределенной, при этом соблюдается непрерывность перемещений и напряжений. Модули упругости или модули деформации изменяются (уменьшаются или увеличиваются) с глубиной по экспоненциальной кривой с плавным или скачкообразным (прерывистым) переходом в область подстилающего полупространства. На участке непрерывного изменения модулей последние описываются зависимостью

$$E_z = E_n \cdot e^{-\beta \frac{z}{H}}, \quad (1)$$

где E_n — минимальный модуль в нижней части дорожной одежды (в частном случае равный модулю упругости грунтового основания E_0); β — коэффициент, характеризующий интенсивность изменения модуля; H — толщина дорожной одежды; z — координата рассматриваемой точки.

При $z = 0$ $E_z = E_n$. При $z = -H$ из (1) следует

$$E_b = E_n \cdot e^{-\beta}, \quad (2)$$

где E_b — модуль упругости верхней части слоя.

Параметр β определяется путем логарифмирования (2) при известных E_b и E_n :

$$\beta = \ln \frac{E_b}{E_n}. \quad (3)$$

Тогда по (3) определяется β при известных модулях упругости в верхней E_b и нижней E_n частях дорожной одежды.

В этом случае используется график, который объединяет шесть величин, а именно отношение радиуса круга загрузки R к толщине одежды H ; отношение модуля упругости верхнего слоя дорожной одежды E_b к расчетному или эквивалентному модулю всей одежды E_a ($\alpha = E_b/E_a$); отношение модуля упругости верхнего слоя E_b к модулю упругости нижнего слоя E_n ($m = E_b/E_n$).

Такой график представлен на рис. 1. По вертикальной оси отложены значения $\alpha = E_b/E_a$, по горизонтальной оси — значения R/H . Цифрами на кривых обозначены значения m [2].

Показатель степени у экспоненты может быть положительным или отрицательным. Знак плюс относится к убывающей, а минус — к возрастающей схеме жесткости по глубине.

Для случая плавного убывания модулей по глубине при $E_0 = E_n$ были разработаны расчетные графики [2].

По графикам можно рассчитать толщину дорожной одежды вновь проектируемой или реконструируемой дороги. В данном случае наиболее характерной расчетной схемой в нашем случае является «схема со скачком».

Графики построены применительно к различным соотношениям между модулем упругости подстилающего полупространства и модулем упругости нижнего слоя $m_1 = E_0/E_n$.

Расчетные графики дают возможность выполнять сравнение различных вариантов дорожных одежд с разнообразными дорожно-строительными материалами. В частности, при одинаковой толщине, но с применением жесткого слоя можно получить проектный (требуемый) модуль одежды выше по сравнению с традиционной расчетно-конструктивной схемой, а при одинаковом проектном модуле, соответственно, толщина всей дорожной одежды будет меньше.

Рис. 1. Номограмма для расчета нежестких дорожных одежд $E_0/E_n = 1$

Несомненный интерес представляет анализ изменения жесткости основания, а также изучение влияния толщины основания, так как с ее ростом положительное воздействие жесткости основания снижается, и определение взаимосвязи изменения эквивалентного модуля всей одежды E_3 в модуль упругости грунтового основания E_0 .

Для $m > 1$ с увеличением m_1 при всех толщинах α становится меньше, эквивалентный модуль всей одежды E_3 растет. То есть E_3 увеличивается при уменьшении разницы между значениями E_n и E_b , чему способствует влияние относительно жесткого основания E_0 .

Для $m > 1$ при увеличении толщины дорожной одежды при прочих равных условиях увеличивается E_3 . Влияние жесткости основания становится значительно меньше при толщинах $R/H = 0,2-0,4$ в сравнении с малыми толщинами благодаря перераспределению нагрузки между слоями.

В случае, когда модуль упругости увеличивается по глубине, то есть $m < 1$, при увеличении толщины дорожной одежды величина E_3

уменьшается, потому что слои с низкими модулями упругости укладываются на более жесткое грунтовое основание или слой, тогда становится уместным использование конструкций с тонкими слоями.

При достаточно небольших значениях m_1 (от 1,2 до 2,0) влияние жесткости грунтового основания уже ведет к увеличению E_3 .

Использование таких схем, где модуль упругости увеличивается по глубине, также имеет смысл при слабых основаниях, при использовании относительно жестких нижних слоев.

Использование метода проектирования дорожных одежд с характерными расчетными схемами дорожных конструкций позволит развить теорию регулирования жесткости, которая позволит решить такие вопросы, как рациональное размещение слоев в конструкции по жесткости, использование жестких прослоек в конструкции.

Расчетная схема, приведенная на рис. 2, позволит решить такие задачи. Это слоистая система с верхней и нижней частью, модули упругости или модули деформации изменяются с глубиной по экспоненциальной кривой (уменьшающейся или увеличивающейся), которые разделены слоем

Рис. 2. Расчетная схема дорожной одежды с промежуточным слоем конечной жесткости

Зависимость модулей упругости от жесткости и относительной толщины

$E_{01}/E_{1н}$	$E_2/E_{1н}$	E_2/E_{03}	$E_{03}/E_{3н}$	h_1/R	h_2/R	h_3/R	E_{01}/E_3
4,0	9,00	4,0	4,0	1,00	1,00	2,0	2,884
2,0	0,33	1,0	2,0	0,33	0	1,0	7,874
2,0	0,33	1,0	4,0	0,33	0	1,0	12,720
2,0	3,00	2,0	4,0	1,00	1,00	2,0	3,050
4,0	3,00	2,0	4,0	3,00	1,00	2,0	2,430
4,0	3,00	2,0	8,0	1,00	1,00	2,0	4,510
4,0	3,00	2,0	8,0	1,00	1,00	4,0	3,660

конечной толщины между собой с постоянным модулем E_2 .

Показанные толщины h_1 и h_3 могут состоять из одного или нескольких слоев, с любыми соотношениями между модулями слоев.

Толщина h_2 допускается равна нулю, тогда две экспоненты могут плавно соединяться или иметь скачок, параметры их могут быть одинаковыми или разными.

Расчетная схема имеет следующие исходные данные: слои взаимосвязаны друг с другом, нет горизонтальных перемещений. Нагрузка интенсивности P распределена равномерно по поверхности, радиус площадки загрузки R .

В слоях 1 и 3 модули упругости E изменяются с глубиной по экспоненциальной кривой, в слоях 2 и 4 — неизменны.

В таблице представлены результаты расчетов.

Получены следующие выводы по проведенному анализу расчетов конструкций с прослойкой конечной жесткости и конечной толщины.

Повышение жесткости прослойки ведет к увеличению E_3 новых и реконструированных одежд, однако при увеличении толщины слоев над прослойкой влияние ее жесткости снижается. Рекомендуемая глубина от поверхности дорожной одежды не более $1,5R$, где R — радиус отпечатка колеса расчетного автомобиля.

При реконструкции дорог можно уменьшить влияние малой жесткости подстилающих слоев старой конструкции увеличением жесткости прослойки, и тогда становится возможным использовать относительно малую толщину наращивания дорожной одежды.

Расчеты показывают возможность за счет жесткости прослойки эффективно регулировать и повышать жесткость всей конструкции, чем будет достигаться существенная экономия.

Дальнейшее совершенствование теории регулирования жесткости дорожных одежд должно быть направлено на разработку конструктивных схем типа «обойма» («линзообразных»), в которых промежуточные слои имеют меньший модуль упругости, чем верхний и нижний слои. Такие конструкции по результатам расчетов также приводят к относительно высоким E_3 , что может быть полезным для решения актуальных задач проектирования дорожных одежд с интенсивным, скоростным и тяжелым движением, а также случаев дорог на слабых основаниях.

Библиографический список

1. Калужский Я. А., Никитин О. Ф. Некоторые варианты конструктивной схемы многослойной нежесткой дорожной одежды // Материалы Всесоюзной межвуз. науч.-техн. конф. по прочности дорожных одежд. Харьков, 1969.
2. Коган Б. И., Зинченко В. Д. Напряженное состояние неоднородного слоя, покоящегося на упругом полупространстве // Известия вузов «Строительство и архитектура». 1960. № 3. С. 8–18.
3. Методические указания по проектированию жестких дорожных одежд / руководители работ: В. М. Юмашев, В. Д. Казарновский. М.: ФГУП «Информавтодор», 2004. 128 с.
4. Справочная энциклопедия дорожника. Т. 5. Проектирование автомобильных дорог / под ред. Г. А. Федотова, П. И. Поспелова. М., 2007. 815 с.
5. Бируля А. К. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1964. 168 с.
6. Калужский Я. А. Принципы конструирования дорожных одежд // Автомобильные дороги. 1965. № 10. С. 6–7.
7. Кривисский А. М. Конструирование и расчет дорожных одежд по местному предельному равновесию. М.: Автотрансиздат, 1963. 76 с.

8. Клековкина М. П. Состояние и недостатки конструирования и расчета дорожных одежд с цементобетонным покрытием // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 1 (54). С. 136–140.

9. Бондарева Э. Д., Клековкина М. П. Изыскание и проектирование автомобильных дорог. В 2 ч. СПб.: СПбГАСУ, 2012. Ч. 1. 127 с. Ч. 2. 94 с.

10. Карпов Б. Н., Клековкина М. П. Эффективные конструктивно-технологические решения дорожных одежд // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. URL: www.science-education.ru/103-6325 (дата обращения: 25.06.2012).

11. Радовский Б. С. Строительство дорог с цементобетонными покрытиями в США: Новые тенденции (Организация и направления исследований в области цементобетонных покрытий) // Дорожная техника. 2010. № 10. С. 62–70.

12. Березин В. И., Виноградова А. П., Иванов В. Н. и др. Управление состоянием жестких покрытий аэродромов. М.: Воздушный транспорт, 2010. 124 с.

13. Darter M. I., Hudson W. R., Haas R. C. G. Selection of optimal pavement designs considering reliability, performance and costs // Transp. Research Record. 1974. Vol. 485. Pp. 67–79.

14. Arand W., Pohimann P. Thermischinduzierte Zugspannungen in Asphaltbefestigungen // Asphaltstrasse. 1990. Vol. 24, № 2. S. 13–18.

References

1. Kaluzhskiy Ya. A., Nikitin O. F. *Nekotorye varianty konstruktivnoy skhemy mnogosloynnoy nezhestkoy dorozhnoy odezhdy* [Some variants of the construction scheme of multilayer non-rigid road clothes]. *Materialy Vsesoyuznoy mezhvuz. nauch.-tekhn. konf. po prochnosti dorozhnykh odezhd* [Proc. of All-Union inter-university sci. and tech. conf. devoted to durability of pavement]. Kharkov, 1969.

2. Kogan B. I., Zinchenko V. D. *Napryazhennoe sostoyanie neodnorodnogo sloya, pokoyashchegosya na uprugom poluprostranstve* [Stress state of an inhomogeneous layer resting on an elastic half-space]. *Izvestiya vuzov «Stroitel'stvo i arkhitektura» – Bulletin of higher schools "Construction and architecture"*, 1960, no. 3, pp. 8–18.

3. *Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu zhestkikh dorozhnykh odezhd* [Methodic guidelines for rigid road pavement design]. Study supervised by Yumashev V. M., Kazarnovskiy V. D. Moscow, Informavtodor Publ., 2004, 128 p.

4. *Spravochnaya ehntsiklopediya dorozhnika. T. 5. Proektirovanie avtomobil'nykh dorog* [Reference

encyclopedia of road builders. Vol. 5. Design of roads]. Ed. by Fedotov G. A., Pospelov P. I. Moscow, 2007, 815 p.

5. Birulya A. K. *Konstruirovaniye i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd avtomobil'nykh dorog* [Design and calculation of non-rigid road pavement]. Moscow, Transport Publ., 1964, 168 p.

6. Kaluzhskiy Ya. A. *Printsipy konstruirovaniya dorozhnykh odezhd* [Principles of road pavement design]. *Avtomobil'nye dorogi – Automobile Highways*, 1965, no. 10, pp. 6–7.

7. Krivisskiy A. M. *Konstruirovaniye i raschet dorozhnykh odezhd po mestnomu predel'nomu ravновесию* [Design and analysis of road pavement in accordance with the local equilibrium limit]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1963, 76 p.

8. Klekovkina M. P. *Sostoyaniye i nedostatki konstruirovaniya i rascheta dorozhnykh odezhd s tsementobetonnyim pokrytiem* [The condition and disadvantages of design and calculation of road clothes with cement-concrete coating]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 1 (54), pp. 136–140.

9. Bondareva E. D., Klekovkina M. P. *Izyskanie i proektirovanie avtomobil'nykh dorog. Ucheb. posobie* [Survey and design of motor roads. Teaching manual]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2012, Pt. 1, 127 p. Pt. 2, 94 p.

10. Karpov B. N., Klekovkina M. P. *Ehffektivnyye konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya dorozhnykh odezhd* [Effective construction-technology solutions of road clothes design]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 3. Available at: www.science-education.ru/103-6325 (accessed: 25.06.2012).

11. Radovskiy B. S. *Stroitel'stvo dorog s tsementobetonnyimi pokrytiyami v SShA: Novyye tendentsii (Organizatsiya i napravleniya issledovaniy v oblasti tsementobetonnykh pokrytiy)* [Construction of roads with cement concrete coatings in the United States: New trends (Organization and direction of research in the field of concrete pavements)]. *Dorozhnaya tekhnika – Road building equipment*, 2010, no. 10, pp. 62–70.

12. Berezin V. I., et al. *Upravleniye sostoyaniem zhestkikh pokrytiy aehrodromov* [Control of the condition of airfield hard road coating]. Moscow, Vozdushnyy Transport Publ., 2010, 124 p.

13. Darter M. I., Hudson W. R., Haas R. C. G. Selection of optimal pavement designs considering reliability, performance and costs. *Transp. Research Record*, 1974, vol. 485, pp. 67–79.

14. Arand W., Pohimann P. Thermischinduzierte Zugspannungen in Asphaltbefestigungen. *Asphaltstrasse*, 1990, vol. 24, no. 2, pp. 13–18.