

В.Н. Ряпухин, Н.А. Арсеньева, А.С. Онищенко

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
Харьков, Украина

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ ПЛИТ НА КОНТАКТЕ СЛОЕВ

Современные дорожные одежды являются многослойными и при их проектировании и расчетах необходимо иметь данные о напряженно-деформированном состоянии каждого отдельного слоя. Чем больше в конструкции слоев, тем сложнее зависимости для определения напряжений и перемещений.

Рассмотрено численное моделирование напряженно-деформированного состояния слоистой плиты переменной конструкции и расчетных схем нежестких дорожных одежд. Предложено использование методов математического моделирования на основе апробированных методов моделирования с учетом температурного режима покрытий и полученного решения для слоистых плит (на контакте слоев).

Ключевые слова: нежесткие дорожные одежды, напряженно-деформированное состояние, контакты слоев, слоистые системы, касательные напряжения, нормальные напряжения.

V.N. Riapukhin, N.A. Arsen'eva, A.S. Onishchenko

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov, Ukraine

CHARACTERISTICS OF STRESS-STRAIN STATE OF LAYERED PLATES TO CONTACT LAYERS

Modern pavements are layered and in their design and the calculations necessary to know the data on the stress-strain state of each individual layer. The more layers in the structure, the more difficult to determine the dependence of stresses and displacements.

In article numerical modeling intense stress-strain state of a layered plate of a variable design and settlement schemes of flexible pavements is considered. Use of methods of mathematical modeling on the basis of the approved methods of modeling taking into account a temperature mode of coverings and the received decision for layered plates (on contact piece of layers) is offered.

Keywords: flexible pavements, stress-strain state, contacts of layers, layered systems, shear stresses, the normal stresses.

Действующая на поверхности дорожной одежды колесная нагрузка вызывает в дорожной конструкции, прежде всего в покрытии, объемное напряженно-деформированное состояние.

Многослойные асфальтобетонные плиты нежестких дорожных одежд работают при различных температурных режимах. Не всегда

обеспечено достаточное сцепление слоев на контакте вследствие возможных нарушений или специфики технологии.

Что касается монолитности (спаянности) на контактах слоев из монолитных материалов, при проектировании дорожных одежд специальных расчетов не предусмотрено. Принято считать, что спаянность слоев обеспечивается конструктивно и специальными технологическими приемами [1–3].

При этом исходят из следующих соображений. Максимальные сдвигающие напряжения в монолитной слоистой плите возникают не на контактах слоев (плоскость, параллельная главной площадке $xу$), а на наклонной площадке скольжения (теория Кулона – Мора), угол наклона которой зависит от величины главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 [1–5].

Поэтому предполагается, что сдвиг прежде всего произойдет по наклонному сечению, так как прочность контактов слоев принимается не менее прочности асфальтобетона покрытия.

Одновременно с этим автоматически решается вторая проблема: обеспечивается, как наименее опасная с точки зрения прочности на растяжение при изгибе, расчетная схема со спаянными слоями [3].

В существующих методах конструирования и расчета нежестких дорожных одежд как одно из главных требований предусмотрено то, что монолитные (сплошные) слои одежды между собой должны быть омоноличены (спаяны на контакте) согласно ВБН В.2.3-218-186. В этом случае слоистая система работает как монолитная плита, в которой прогибы и растягивающие напряжения будут меньше.

На практике часто встречаются конструкции, которые под действием нагрузки и климатических факторов расслаиваются и быстрее разрушаются.

Кроме общих требований к технологии строительства покрытий нежестких дорожных одежд, конкретных расчетов прочности контактов слоев на сдвиг и разрыв не предусмотрено. Поэтому исследование напряженно-деформированного (НДС) состояния на контакте слоев является важной научно-технической задачей.

На основе ранее полученных решений [1–4] проведено моделирование напряженно-деформационного состояния слоистых систем на контактах слоев. Имитировалось поведение под нагрузкой верхней монолитной плиты нежестких дорожных одежд, состоящей из слоев покрытия и верхних монолитных слоев основания. В качестве материалов

слоев покрытия рассматриваются асфальтобетоны различных марок и типов, а для верхних монолитных слоев – материалы, обработанные органическим, неорганическим или комплексным вяжущим. Граничными условиями для расчетной трехслойной системы является единство напряжений и перемещений на контактах слоев (спаянные слои) [3–6].

Исследование НДС трехслойных плит на упругом полупространстве проводилось на основе анализа эпюр касательных (τ_{rk}) и нормальных (σ_k) напряжений на контактах слоев для различных расчетных схем моделей.

Для эпюр напряжений на контакте слоев характерно наличие максимумов. Эпюра касательных напряжений имеет два максимума, которые соответствуют краям площадки загрузки.

Максимальные значения касательных напряжений наблюдаются на оси « r » с относительной координатой $\frac{r_m}{D} = 0,49 \dots 0,51$, что соответствует краю площади загрузки (считая от оси приложения нагрузки $0,5D = R$).

Максимальные вертикальные напряжения наблюдаются по оси приложения нагрузки, имеют один максимум, который не совпадает в пространстве с максимумом касательных напряжений. В месте появления максимальных касательных напряжений ($\tau_{rz \max}$) вертикальное напряжение на контакте слоев почти в два раза меньше максимального, которое наблюдается по оси загрузки.

В пространстве поле касательных напряжений представляет собой выгнутую воронку. Поэтому при перемещении нагрузки (движущийся автомобиль) каждая точка монолитной плиты будет дважды подвергнута воздействию касательных напряжений, т.е. в два раза повышается опасность сдвига на контакте слоев. Несовпадение максимумов τ_{rz} и σ_z по вертикали в монолитной плите характерно для всех значений модулей слоев, толщин слоев и модулей основания ($E_{\text{осн}}$).

Такое специфическое поле напряжений на контакте слоев в общем виде было описано аналитически. Однако не обращалось внимание на то, что воздействие горизонтальных касательных напряжений будет при каждом проходе колеса повторяться дважды, направление касательных сдвигающих усилий меняется на противоположное и силы трения сцепления при максимуме касательных напряжений будут значительно меньше.

Касательные напряжения, переменные не только по абсолютной величине, но и по направлению, более агрессивны и быстрее приводят к разрыву связей слоев на контакте. Абсолютная величина максимальных значений τ_{rz} зависит от ряда параметров: модулей упругости и коэффициентов Пуассона слоев монолитной плиты, толщины монолитной плиты, модуля основания и величины нагрузки. Однозначно: чем выше модули упругости слоев монолитной плиты, тем максимальное касательное напряжение, при прочих равных условиях, больше. Однако влияние модуля слоев корректируется в первую очередь толщиной плиты. В толстых плитах влияние модулей упругости слоев плиты и модулей основания нивелируются за счет геометрических параметров плиты. Отсюда следует, что в толстых (толстослойных) монолитных плитах покрытий дорожных одежд максимальные касательные напряжения (τ_{rz}) будут в пределах до $\pm 10\%$ постоянны. В этом плане толстой (толстослойной) плитой по отношению к размерам площадки загрузки можно считать плиты, у которых h более $0,85D$.

Анализируя эпюры касательных напряжений было отмечено, что максимальные значения (τ_{rz}) находятся по вертикали под краем площадки загрузки ($r = 1/2D$). Но остается не выясненным вопрос, в каком месте по толщине плиты находится максимум, и каково влияние параметров плиты и нагрузки. Для исследования этого вопроса было проведено математическое моделирование распределения $\tau_{rz \max}$ по толщине плиты. Как видно из полученных данных толщина плиты, модули упругости плиты и основания влияют только на абсолютную величину τ_{rz} , а не на расположение τ_{\max} по толщине плиты.

Наиболее опасное по горизонтальному сдвигу сечение в однородных монолитных плитах зависит от размеров площадки загрузки и практически не зависит от параметров упругости плиты и основания.

В относительных координатах z/D месторасположение наиболее напряженного сечения фиксируется на постоянной отметке $z/D = 0,195 \dots 0,2$. Эти выводы весьма существенны для конструирования прочных и надежных дорожных покрытий. Характер и закономерности изменения напряжений мало чем отличаются для аналогичных условий загрузки, при модуле асфальтобетона $E_{аб} = 4500$ МПа и $\gamma = 0,15$. Существенно зависит от модуля упругости асфальтобетона и абсолютная величина касательных напряжений.

При всех прочих равных условиях касательные напряжения имеют большее значение в асфальтобетонной плите (слое) с большим модулем упругости. С повышением жесткости основания ($E_{\text{осн}}$) касательные напряжения в монолитной плите уменьшаются, а в более толстой плите напряжения меньше, чем в тонкой.

Был разработан и проведен численный эксперимент на моделях слоистой плиты переменной конструкции и расчетных схем. Рассмотрены модели трехслойной плиты со слоями разной толщины и разными модулями упругости и общей толщиной от 30 до 6 см.

Для всех моделей характерно, что чем толще монолитная плита, тем меньше величина максимальных касательных напряжений. Эта закономерность характерна для всех групп моделей, за исключением группы, где «жесткая» прослойка изменяет поле напряжений при толщине плиты менее $0,8D$.

В слоистых системах более жесткий слой всегда концентрирует напряжения вблизи себя. Однако это влияние не является абсолютным, так как максимальные касательные напряжения всегда располагаются в верхней части конструкции, и только при наличии внизу конструкции более жесткого слоя опускаются до 10 см. Но величина этих напряжений зависит от толщины плиты (в толстых плитах напряжения меньше).

В однородной слоистой плите, независимо от толщины плиты, максимальные касательные напряжения находятся на глубине 5,5–6,5 см от поверхности плиты. Если эпюра модулей слоев убывает по глубине, то максимальные сдвигающие напряжения могут незначительно подняться вверх и находятся на глубине 4–5 см. Такая же картина сохраняется и для расчетных схем со «слабым» или «более жестким» средним слоем. Исключение составляют модели с «более жестким» слоем понизу слоистой плиты. В этом случае максимальные касательные напряжения находятся на уровне ≈ 10 см ($z/D = 0,3$). Таким образом, можно констатировать, что практически для всех расчетных схем, кроме схемы с жестким слоем внизу, максимальные растягивающие напряжения, не зависимо от толщины плит, располагаются на уровне 5–6 см от верха плиты ($0,15$ – $0,09$) D . В этом же сечении нормальные вертикальные напряжения существенно меньше максимальных.

Для исследования поведения монолитных плит покрытий дорожных одежд с успехом могут быть использованы методы математического моделирования на основе апробированных методов моделирова-

ния температурного режима покрытий и полученного решения НДС слоистых плит на контакте слоев. В результате моделирования НДС различных конструкций (расчетных схем) дорожных одежд установлено следующее:

1. Максимальные касательные напряжения (τ_{rz}) возникают под краем площадки загрузки на расстоянии $1/2D$ от центра загрузки.

2. В пространстве поле касательных напряжений представляет «вогнутую воронку». Поэтому при перемещении площадки загрузки (колеса) каждая точка покрытия будет дважды испытывать воздействие противоположных по направлению горизонтальных касательных напряжений.

3. Максимум касательных напряжений не совпадает по вертикали с максимумом σ_z . При оценке прочности на сдвиг необходимо учитывать фактическую величину вертикального нормального напряжения, соответствующую $\tau_{rz\max}$.

4. В плитах значительной толщины ($h/D > 0,85$) величина максимальных касательных и вертикальных нормальных напряжений практически не зависит от других параметров плиты.

5. Наиболее опасное по горизонтальному сдвигу сечение монолитных плит находится на уровне $z/D = 0,19 \dots 0,2$, т.е. для реальных нагрузок на глубине 5–6(7) см. При наличии внизу плиты более «жесткого» слоя опасное сечение опускается до 8–10 см.

Список литературы

1. Плевако В.П., Ряпухин В.Н. Совершенствование метода расчета нежестких дорожных одежд // Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного университета. – 1999. – Вып. 9. – С. 51–56.

2. Плевако В.П. Общие решения в задачах теории упругости неоднородных сред. – Харьков: Основа, 1997. – 160 с.

3. Плевако В.П. Напружений стан неоднорідних покриттів // Машинознавство. – 2001. – № 3. – С. 24–28.

4. Гладкий А.В. Напряженно-деформированное состояние многослойных покрытий дорожных одежд // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2007. – № 6 (112). – С. 105–108.

5. Гладкий А.В., Ряпухин В.Н. Особенности расчетов на прочность многослойных покрытий и усиления нежестких дорожных одежд // Зб. наук. ст. ДержДорНДІ. – Київ, 2006. – Вип. 4. – С. 232–247.

6. Ряпухин В.Н., Псюрник В.А., Гладкий А.В. Особенности расчета и испытания на прочность многослойных асфальтобетонных покрытий // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2006. – № 34–35. – С. 9–11.

References

1. Plevako V.P., Riapukhin V.N. Sovershenstvovanie metoda rascheta nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Perfection of flexible pavement calculation]. *Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 1999, no. 9, pp. 51-56.

2. Plevako V.P. Obshchie resheniia v zadachakh teorii uprugosti neodnorodnykh sred [Basic solutions to problems of theory of of elasticity of inhomogeneous media]. Kharkov: Osnova, 1997, 160 p.

3. Plevako V.P. Napruzhenii stan neodnorodnykh pokrytii [Stressed state of inhomogeneous surface]. *Mashinostroyeniye*, 2001, no. 3, pp. 24-28.

4. Gladkii A.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie mnogosloinykh pokrytii dorozhnykh odezhd [Stress-strain state of multilayer surface pavements]. *Visnik Skhidnoukrains'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalia*, 2007, no. 6 (112), pp. 105-108.

5. Gladkii A.V., Riapukhin V.N. Osobennosti raschetov na prochnost' mnogosloinykh pokrytii i usileniia nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Peculiarities strength calculations of multilayer coatings and strengthening of flexible pavements]. *Zbirnyk naukovykh statei DerzhDorNDI*, 2006, no. 4, pp. 232-247.

6. Riapukhin V.N., Psiurnik V.A., Gladkii A.V. Osobennosti rascheta i ispytaniia na prochnost' mnogosloinykh asfal'tobetonnykh pokrytii [Features of the calculation and testing the strength of multilayer asphalt concrete coatings]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2006, no. 34-35, pp. 9-11.

Получено 15.10.2014

Об авторах

Ряпухин Виталий Николаевич (Харьков, Украина) – кандидат технических наук, профессор кафедры изысканий и проектирования дорог и аэродромов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (61002, Украина, г. Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua).

Арсеньева Наталия Александровна (Харьков, Украина) – ассистент кафедры изысканий и проектирования дорог и аэродромов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (61002, Украина, г. Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: nataliya_nechitaylo@mail.ru).

Онищенко Александр Сергеевич (Харьков, Украина) – студент Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (61002, Украина, г. Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua).

About the authors

Riapukhin Vitalii Nikolaevich (Kharkov, Ukraine) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Department of Researches and Designing of Highways and Airports, Kharkiv National Automobile and Highway University (25, Petrovskii st. Kharkov, 61002, Ukraine, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua).

Arsen'eva Nataliia Aleksandrovna (Kharkov, Ukraine) – Assistant, Department of Researches and Designing of Highways and Airports, Kharkiv National Automobile and Highway University (25, Petrovskii st. Kharkov, 61002, Ukraine, e-mail: nataliya_nechitaylo@mail.ru).

Onishchenko Aleksandr Sergeevich (Kharkov, Ukraine) – Student, Kharkiv National Automobile and Highway University (25, Petrovskii st. Kharkov, 61002, Ukraine, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua).