УДК 624.164

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТА НАСЫПИ ПОДХОДА ЗА ИНТЕГРАЛЬНЫМ УСТОЕМ ОДНОПРОЛЕТНОГО КРИВОЛИНЕЙНОГО МОСТА

Канд. техн. наук, профессор **В.И. Попов**,
аспирант **Нгуен Мань Ха**
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ))
Конт. информация: +7 (925)010-10-97;
+7 (963)961-32-06;
vpopov@stpr.ru;
manhhamta@gmail.com

В статье приведены результаты анализа работы грунта насыпи подхода за интегральным устоем однопролетного криволинейного моста в условиях Вьетнама. Приведены результаты расчетов осадок и выпучиваний грунта насыпи подхода за устоем, изгибающих моментов в переходной плите под нагрузками при различных вариантах расположения переходной плиты. Сделаны выводы о преимуществах армирования насыпи подхода за интегральным устоем, что значительно улучшает условия проезда на участке сопряжения моста с дорогой за счет существенного снижения деформаций грунта насыпи.

***Ключевые слова**: интегральный устой, кривизна пролетного строения, грунт, просадка грунта, выпучивание грунта, геотекстиль, переходная плита.*

Введение

Мост с интегральными устоями характеризуется отсутствием в них деформационных швов и опорных частей, и поэтому на его работу существенно влияет воздействие перепада температур [**1-3**].

Перемещения, вызванные сезонными и суточными изменениями температур, накапливаются по концам переходных плит. Из-за знакопеременных деформаций тела устоя грунт в зоне сопряжения моста с дорогой претерпевает просадки и выпирание.

Применение поверхностных и заглубленных переходных плит, жестко соединенных с телом интегрального устоя, позволяет снизить отрицательное влияние вертикальных деформаций грунта насыпи

подхода, но эффект от их участия в работе с устоем несколько разнится, что требует детального анализа [**2**].

В настоящей статье проведена оценка работы таких вариантов с помощью конечно-элементной программы *Plaxis 2D v. 8.2* [**4**].

Как было показано в работе [**3**], криволинейное пролетное строение с интегральными устоями под действием внешних нагрузок и воздействий испытывает перемещения по трем направлениям Dx, Dy и Dz одновременно; кроме того, возникает закручивание относительно осей Ox и Oz. Однако перемещение вдоль продольной оси Dx является наибольшим по величине и значительно влияет на работу насыпи за устоем. Учитывая это, из пространственной задачи выделяли только продольные перемещения и производили их оценку в зависимости от различных исходных данных.

Исходные параметры

Рассматривается однопролетный криволинейный мост с интегральными устоями пролетом 30 м, с радиусом кривизны R = 700 м. Пролетное строение представляет собой железобетонную монолитную плитную конструкцию с напрягаемой арматурой. В основании устоев расположены стальные трубчатые сваи (О508х12,7) с шагом 1 м и постоянной длиной 15 м.

Решение задачи на базе программного комплекса *Plaxis 2D v.8.2* позволяло оценить работу грунта насыпи с системой устоев, свай и переходных плит, учитывая полное их взаимодействие под действием сочетания нагрузок при учете сезонных изменений температуры.

Выделение двухмерной модели из пространственной, ранее принятой в программном комплексе *Midas Civil 2011* [**5**], показано на **рис. 1**.

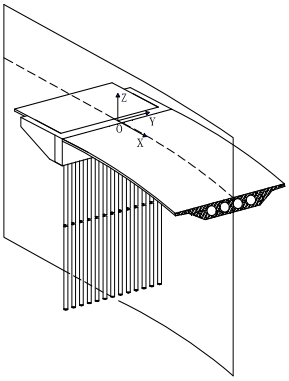

Рис. 1. Получение двухмерной модели

При проведении исследований были приняты два расчетных случая:

- CH1 – при учете всех постоянных нагрузок, временной подвижной нагрузки HL-93 (в том числе в пределах переходной плиты), положительного перепада температуры TU (+) = +18,2°C;
- CH2 – то же, но при учете отрицательного перепада температуры TU (-) = -11,6°C, что соответствовало условиям Вьетнама (Ханоя).

Основные размеры интегрального устоя, мощности слоев грунтов насыпи и основания представлены на **рис. 2**.

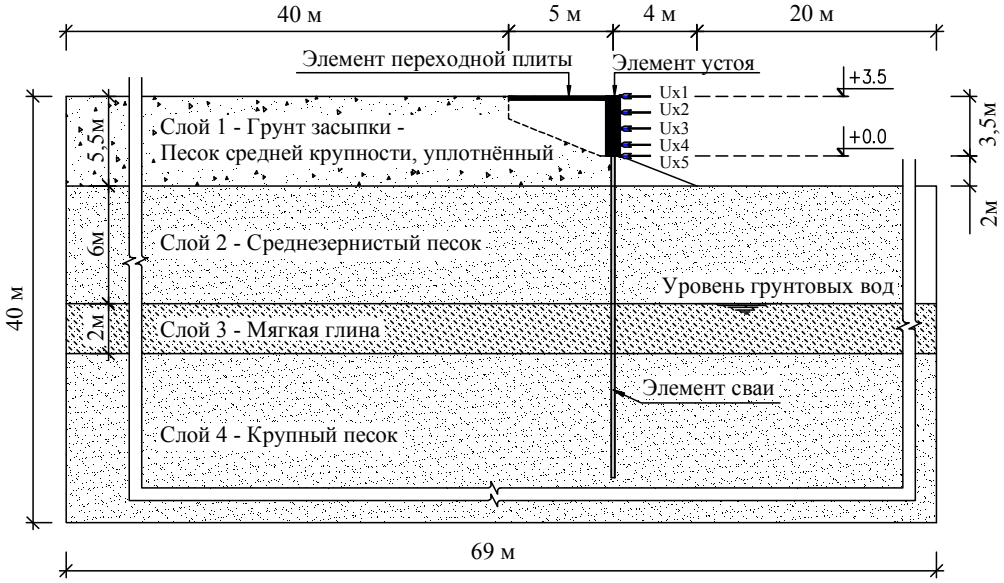

Рис. 2. Интегральный устой в грунтовом массиве

В принятой расчетной модели части конструкций моделированы балочными элементами. Грунты моделировались на основе теории Мора-Кулона. Взаимодействие интегрального устоя с грунтами обеспечивалось интерфейсными элементами, виртуальная толщина которых определяется произведением среднего размера конечного элемента на коэффициент виртуальной толщины, равным 0,1.

Результаты перевода перемещений из пространственной задачи, реализуемой в *Midas Civil 2011*, в двухмерную программного комплекса *Plaxis 2D v.8.2* отражены в **табл. 1**.

Таблица 1

Обозначения перемещений	*Ux1 (мм)*	*Ux2 (мм)*	*Ux3 (мм)*	*Ux4 (мм)*	*Ux5 (мм)*	*Uz (мм)*
Сочетание нагрузок СН1	-15,2	-15,4	-15,7	-16,2	-16,9	-2,1
Сочетание нагрузок СН2	+21,7	+18,6	+14,1	+11,0	+8,1	-4,2
Отметки точек тела устоя	Верх устоя (+3,5м)	(+2,5м)	(+1,5м)	(+0,5м)	Верх сваи (+0,0м)	Верх устоя (+3,5м)

Исходные параметры пространственной конструкции, трансформированные в двухмерную модель, приведены в **табл. 2**.

Таблица 2

Параметр	*Обозначения*	*Элементы конструкции*			*Ед. изм.*
		Переходная плита	*Элемент устоя*	*Элемент сваи*	
Модель материала	Model	Линейно-упругая	Линейно-упругий	Линейно-упругий	-
Нормальная (осевая) жесткость	EA	7,30E+6	3,50E+7	3,99E+6	кН/м
Изгибная жесткость	EI	3,80E+4	4,20E+6	1,23E+5	кН/м^2/м
Коэффициент Пуассона	ν	0,2	0,2	0,3	-

В качестве грунтов основания приняты слои, чередование которых наиболее характерно для условий Ханоя. Характеристики грунтов основания приведены в **табл. 3**.

Таблица 3

Параметр	*Обозначения*	*Слои грунтов*				*Ед. изм.*
		1	*2*	*3*	*4*	
Модель материала	Model	Кулона-Мора				-
Поведение грунта	Type	Дренирующий				-
Толщина слоя	-	5,5	6,0	2,0	17	м
Вес в ненасыщенном водой состоянии	γ_{unsat}	19,6	18,7	19,5	20,9	кН/м^3
Вес в водонасыщенном состоянии	γ_{sat}	20,5	19,4	20,9	21,4	кН/м^3
Модуль Юнга	E_{ref}	26500	24100	6700	38500	кН/м^2
Коэффициент Пуассона	ν	0,3	0,3	0,3	0,3	-
Сцепление грунта	c_{ref}	0	7,2	23,0	24,5	кН/м^2
Угол внутреннего трения	φ	30,00	31,09	15,47	21,17	градус

Анализ результатов

Результаты определения перемещений D_x точек устоя и свай, полученные расчетами по программам *Plaxis 2D v.8.2* и *Midas Civil 2011* по двум сочетаниям нагрузок (СН1 и СН2), показаны на **рис. 3**.

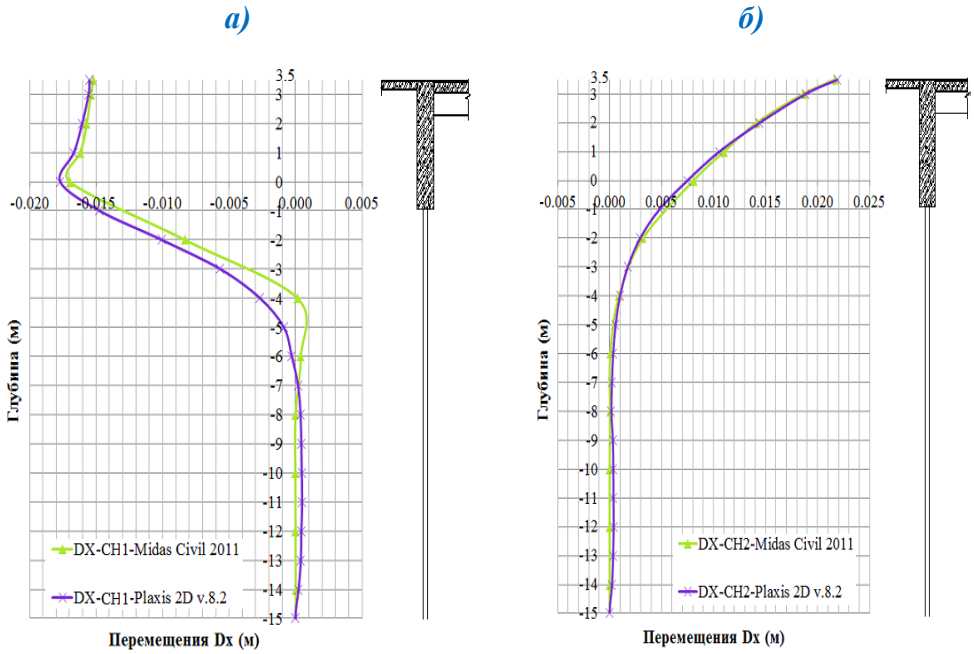

Рис. 3. Эпюры продольных перемещений D_x устоя и свай

Из эпюр **рис. 3** видно, что результаты расчетов по программным комплексам *Midas Civil 2011* и *Plaxis 2D v.8.2* достаточно близки между собой. В то же время можно отметить, что в модели, принятой в *Midas Civil 2011*, на глубине 7 м сваи почти не деформируются, а в модели по программе *Plaxis 2D v.8.2* сваи хотя и незначительно, но деформируются до глубины 14 м. Это показывает, что модель, принятая авторами в программе *Plaxis 2D v.8.2*, несколько лучше отражает реальную работу интегрального устоя в грунтовом массиве, чем в программе *Midas Civil 2011*.

Взаимодействие между грунтом и конструкцией в *Midas Civil 2011* заменяется упругими пружинами, которые работают по трем направлениям с разной жесткостью, а модель в программе

Plaxis 2D v.8.2 учитывает более полное взаимодействие между грунтом и конструкцией; грунт моделирован конечными элементами; взаимодействие между грунтом и конструкцией отражен интерфейсными элементами, и поэтому получаемый результат более точный, правильно отражает реакцию насыпи за устоем. Результаты также показывают, что отличие становится более выраженным, когда насыпь находится в состоянии пассивного давления (**рис. 3 а**).

При сезонном изменении температуры, а также под воздействием постоянных и временных нагрузок насыпь подхода за интегральным устоем попеременно находится в состояния сжатия и растяжения. На **рис. 4** показана конечно-элементная картина деформаций модели интегрального устоя с грунтом насыпи и основания под воздействием сочетаний нагрузок СН1 и СН2 соответственно.

а) ***б)***

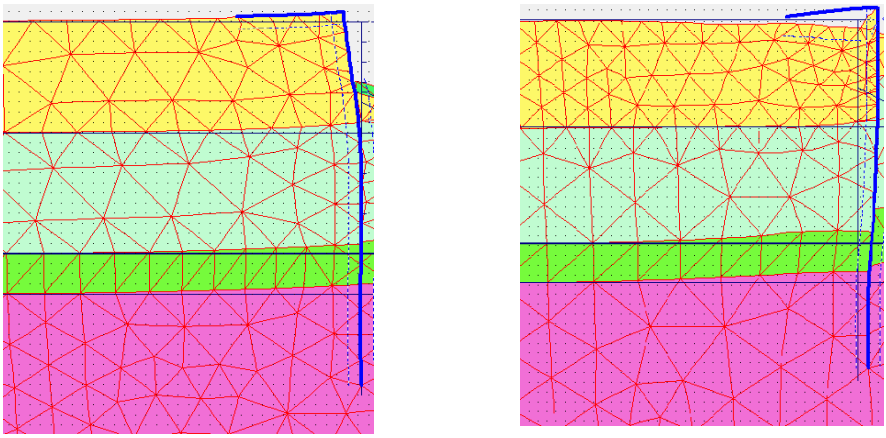

Рис. 4. Деформация насыпи подхода за интегральным устоем:
а – при сжатии; б – при растяжении

Расчеты показали, что при положительном температурном градиенте насыпь за устоем выпучивается до максимальной величины 3 см за пределами переходной плиты, и далее по длине около 35 м это выпучивание снижается практически до нуля. При отрицательном градиенте осадки насыпи происходят на участке несколько большей длины, максимальная величина осадки составила 2,8 см (**рис. 5**).

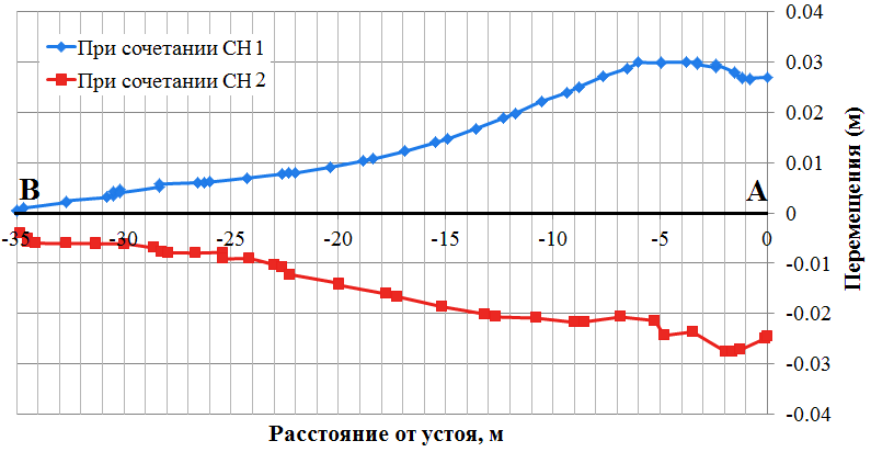

Рис. 5. Деформация грунта насыпи подхода за устоем

Под действием повторяющихся процессов выпучивания и оседания насыпи образуется зона просадки. Грунт в итоге уплотняется в виде клина за телом интегрального устоя. Применение жестко объединенной с телом устоя переходной плиты позволяет перекрыть локальную зону просадки и тем самым сохранить ровность проезда в зоне сопряжения устоя с насыпью подхода.

Влияние расположения переходной плиты на просадки насыпи

Рассмотрено два варианта расположения переходной плиты за телом интегрального устоя: поверхностный (тип 1) и заглубленный (тип 2) (**рис. 6**). Об особенностях их работы было показано в работе одного из авторов [**1**].

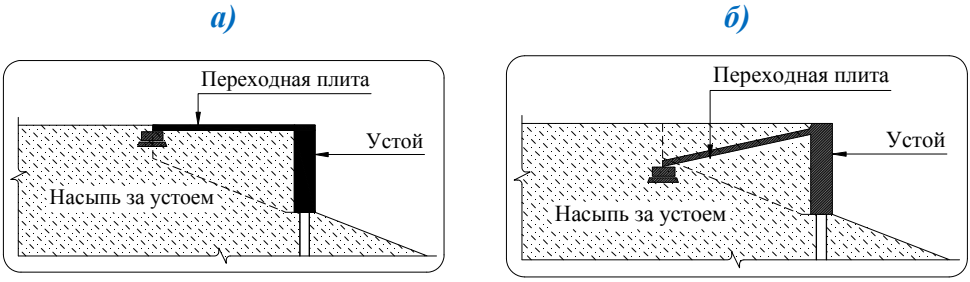

Рис. 6. Варианты расположения переходной плиты:
а – тип 1; б – тип 2

Деформации грунтов и интегрального устоя по типу 2 под действием сочетания нагрузок СН2 показаны на **рис. 7**.

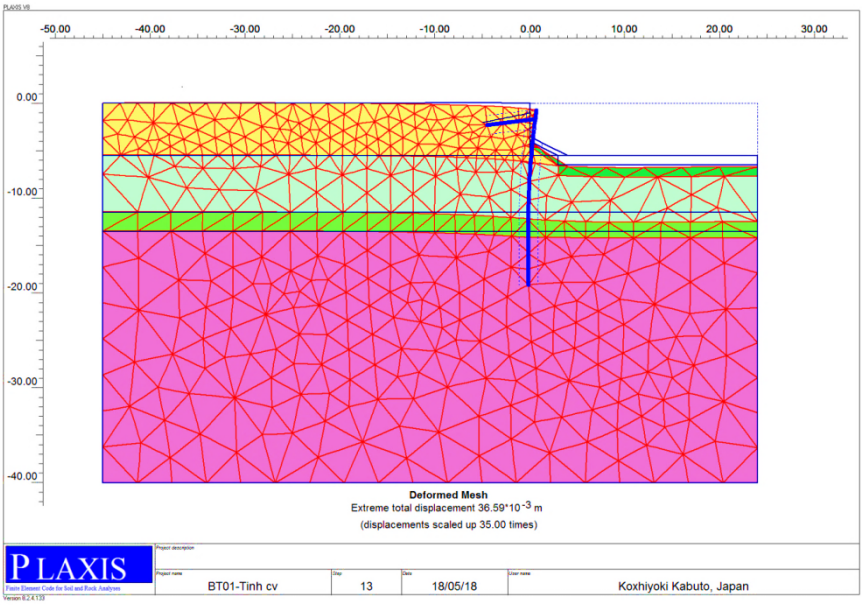

Рис. 7. Развитие деформаций насыпи и интегрального устоя

На **рис. 8** представлены сравнительные данные по просадке насыпи подхода D_y за устоем с переходными плитами по типу 1 и типу 2 под действием сочетаний нагрузок СН1 и СН2.

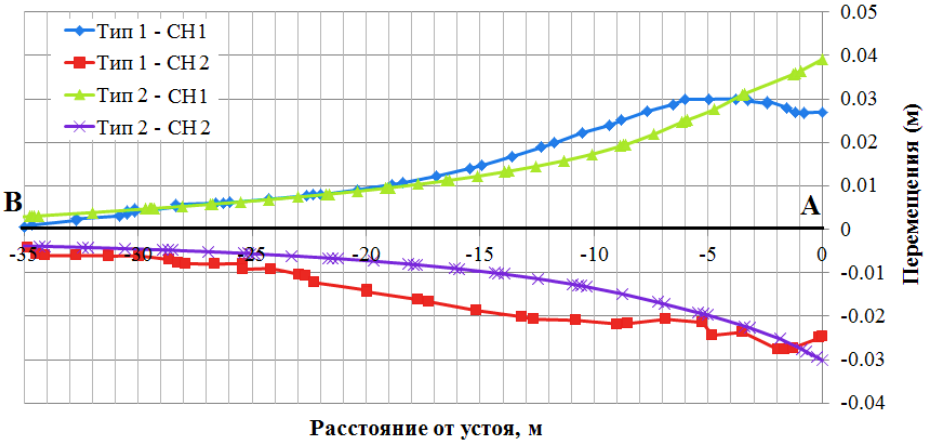

Рис. 8. Деформации насыпи подхода за устоем при различном расположении переходных плит

Из эпюр перемещений грунта насыпи очевидно, что при учете положительного градиента температур грунт насыпи выпирает, и в случае переходной плиты по типу 2 это выпирание на участке длиной около 4 м превышает до 30 % выпирания для случая по типу 1. Просадка грунта в месте сопряжения переходной плиты с телом устоя для типа 1 меньше, чем для типа 2 (3,1 см) примерно на 15 %. Однако в насыпи за устоем типа 2, особенно в области, отстоящей на 5 м от устоя, просадки насыпи уменьшаются в сравнении с конструкцией устоя типа 1.

Представленные эпюры деформаций также показывают, что применение заглубленных переходных плит ведет к более плавным просадкам грунта. В то же время поверхностные переходные плиты обеспечивают меньшие по величине перемещения (выпирание и просадки) в пределах своей длины.

Результаты расчетов изгибающих моментов в переходной плите под действием вертикальной временной нагрузки, расположенной в пределах длины переходной плиты показали, что максимальные значения изгибающих моментов в случае устоев типа 1 и 2 соответственно составили 15,7 кНм и 14,9 кНм.

Из приведенного выше можно сделать вывод о том, что применение заглубленных переходных плит в целом обеспечивает более плавную кривую деформация насыпи за телом устоя и незначительно уменьшает изгибающие моменты в переходной плите. В то же время абсолютная величина просадок и выпучивания грунта насыпи при использовании поверхностных переходных плит меньше до 30 % по сравнению со случаем заглубленных плит.

Влияние армирования насыпи на просадки за интегральным устоем

Достаточно распространенным способом улучшения свойств грунта насыпи подходов в настоящее время является армирование грунта геосинтетическими полотнами. Используя долговечный синтетический материал как арматурный элемент насыпного грунта, удается существенно снизить деформации грунта за устоем. Полотна геотекстиля, расположенные рядами, создают плотную грунтовую конструкцию, снижающую вертикальные перемещения грунта под нагрузками [**7**]. Аналогичное решение было использовано для однопролетного криволинейного путепровода с интегральными устоями и поверхностной переходной плитой (**рис. 9**).

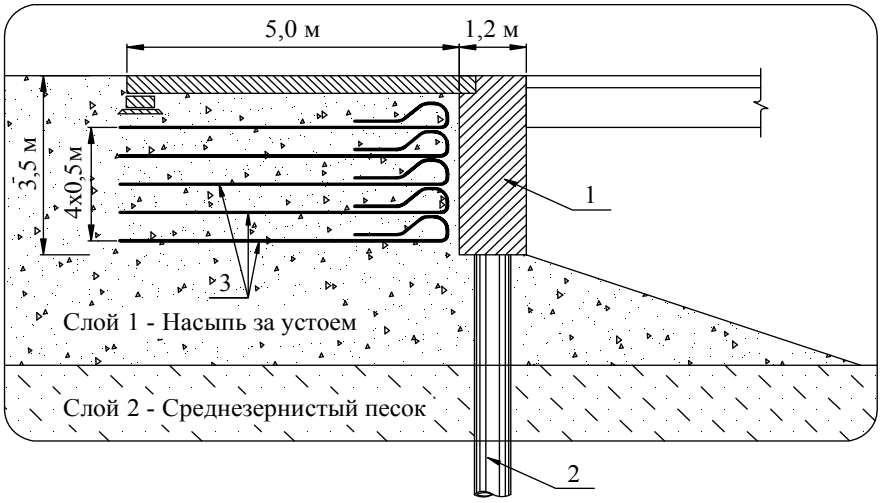

Рис. 9. Конструкция армогрунтовой засыпки за интегральным устоем:
1 – тело устоя, 2 – свая, 3 – геосинтетические полотна

Развитие деформаций армированной насыпи за устоем под действием сочетания нагрузок СН1 и СН2 показано на **рис. 10**.

а) ***б)***

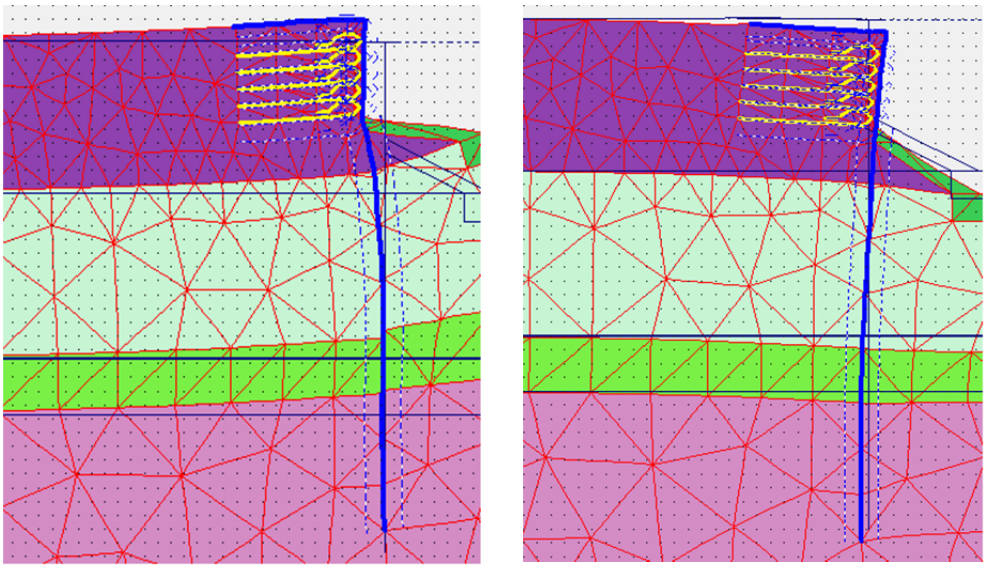

Рис. 10. Развитие деформаций армированной насыпи за устоем при сочетаниях нагрузок:
а – СН1; б – СН2

Сравнение расчетных вертикальных деформаций насыпи Dy с геотекстилем и без него представлено на эпюрах ниже (**рис. 11**).

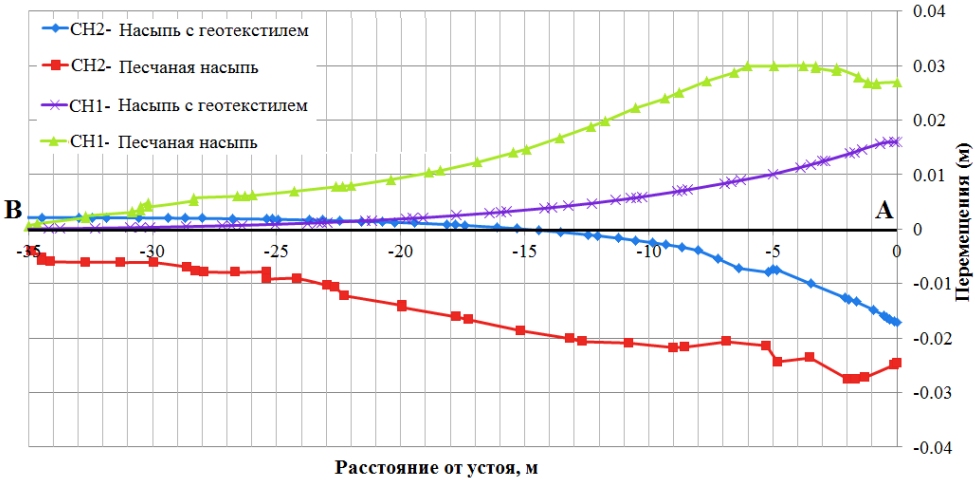

Рис. 11. Эпюры просадок и выпучивания грунта насыпи с геотекстилем и без него

Из **рис. 11** видно, что просадки насыпи с геотекстилем существенно меньше, чем без него: непосредственно за стенкой устоя уменьшаются с 2,5 см до 1,7 см или на 32 % в сравнении со случаем без геотекстиля.

Присутствие геотекстиля в теле насыпи также влияет и на выпучивание грунта: уменьшение достигало около 2 см (с 3 см до 1 см).

Затухание деформаций армированного грунта за интегральным устоем происходит быстрее, и эти деформации развиваются достаточно плавно.

Таким образом, можно заключить, что армирование насыпи за интегральным устоем значительно улучшает условия проезда на участке сопряжения моста с дорогой за счет существенного снижения деформаций грунта насыпи подхода.

ВЫВОДЫ

1. Работа грунта насыпи подхода за интегральными устоями удовлетворительно описывается при использовании

программных комплексов *PLAXIS* и *MIDAS*. В целом тот и друдругой программные комплексы дают близкие результаты по перемещениям интегральных устоев. Для однопролетных мостовых криволинейных сооружений продольные перемещения устоев при положительном и отрицательных температурных градиентах не превышают 2 см.

2. Деформация песчаного грунта насыпи подхода за интегральными устоями для условий Вьетнама происходит по длине до 35 м с наибольшими значениями просадок и выпучивания вблизи стенки устоев до 3 см.
3. Применение заглубленных переходных плит, жестко объединенных с телом интегрального устоя, обеспечивает более плавную кривую деформаций насыпи, но просадки и выпучивание грунта оказываются до 30 % больше, чем при поверхностных переходных плитах.
4. Армирование грунта насыпи на подходах существенно (до 3-х раз) снижает деформации песчаной насыпи по длине распространения деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Попов В.И. Способы сопряжения конструкций путепроводов с насыпями подходов / В.И. Попов, А.А. Прохоров // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – № 5 (24). – Сентябрь-октябрь. – С. 44-54 . – Электрон. данные. – URL: https://naukovedenie.ru/PDF/25KO514.pdf (дата обращения 15.10.2018).*
2. *Попов В.И. Роль и значение переходных плит в мостах с интегральными устоями / В.И. Попов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 4. – С. 23-25.*
3. *Popov V. Operation Features of Integral Abutment in Curved Bridges / V. Popov, Nguyen Manh Ha // Danish Scientific Journal. – 2017. – № 5. – PP. 112-118.*
4. *Plaxis 2D version 8.2. / R.B.J. Brimkgreve & W. Broere. Plaxis b.v, the Netherlands. – 2006. – Электрон. данные. – URL: https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/Version%208%20Introductory/Manuals/English/V84-1_GenInfo.pdf (дата обращения 15.10.2018).*

5. *Попов В.И. Анализ поведения однопролетных путепроводов с интегральными устоями / В.И. Попов, Фам Туан Тхань, Нгуен Ван Хиен, Нгуен Мань Ха // Дороги и мосты. – 2017. – С. 233-246.*
6. *GS. TSKH. Cao Văn Chí, PGS.TS. Trịnh Văn Cương – Cơ học đất. Nhà xuất bản Xây dựng. – Hà nội. – 2003. – P. 309.*
7. *Соколов А.Д. Армогрунтовые системы автодорожных мостов и транспортных развязок: монография / А.Д. Соколов. – СПб: ООО Отраслевая медиа-корпорация «Держава», 2013. – 504 с.*

L I T E R A T U R A

1. *Popov V.I. Sposoby soprjazhenija konstrukcij puteprovodov s nasypjami podhodov / V.I. Popov, A.A. Prohorov // Internet-zhurnal «Naukovedenie». – 2014. – # 5 (24). – Sentjabr'-oktjabr'. – S. 44-54 . – Jelektron. dannye. – URL: https://naukovedenie.ru/PDF/25KO514.pdf (data obrashhenija 15.10.2018).*
2. *Popov V.I. Rol' i znachenie perehodnyh plit v mostah s integral'nymi ustojami / V.I. Popov // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli. – 2017. – # 4. – S. 23-25.*
3. *Popov V. Operation Features of Integral Abutment in Curved Bridges / V. Popov, Nguyen Manh Ha // Danish Scientific Journal. – 2017. – # 5. – PP. 112-118.*
4. *Plaxis 2D version 8.2. / R.B.J. Brimkgreve & W. Broere. Plaxis b.v, the Netherlands. – 2006. – Jelektron. dannye. – URL: https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/Version%208%20Introductory/Manuals/English/V84-1_GenInfo.pdf (data obrashhenija 15.10.2018).*
5. *Popov V.I. Analiz povedenija odnoproletnyh puteprovodov s integral'nymi ustojami / V.I. Popov, Fam Tuan Than', Nguen Van Hien, Nguen Man' Ha // Dorogi i mosty. – 2017. – S. 233-246.*
6. *GS. TSKH. Cao Văn Chí, PGS.TS. Trịnh Văn Cương – Cơ học đất. Nhà xuất bản Xây dựng. – Hà nội. – 2003. – P. 309.*
7. *Sokolov A.D. Armogruntovye sistemy avtodorozhnyh mostov i transportnyh razvjazok: monografija / A.D. Sokolov. – SPb: OOO Otraslevaja media-korporacija «Derzhava», 2013. – 504 s.*

RESEARCH ON SOIL BEHAVIOR OF APPROACH EMBANKMENT AFTER SINGLE-SPAN CURVED BRIDGE INTEGRAL ABUTMENT

Ph. D. (Tech.) ***V.I. Popov****,*
Postgraduate Student ***Nguyen Manh Ha***
(Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI))
Contact information: +7 (925)010-10-97; +7 (963)961-32-06; vpopov@stpr.ru; manhhamta@gmail.com

The article presents the analysis results of soil behavior of approach embankment after single-span curved bridge integral abutment in Vietnam conditions. The calculation results of soil settlement and buckling of approach embankment after abutment, as well as bending moments in approach slab under loads for different configurations of approach slab are given. The conclusions about advantages of approach embankment reinforcement are presented, that significantly improves passage conditions in a transition zone between the bridge and the road due to important reduction of soil deformation of approach embankment.
Key words: *integral abutment, curvature of span, soil, soil settlement, soil buckling, geotextile, approach slab.*

Рецензент: канд. техн. наук В.А. Селиверстов (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 19.05.2018 г.