

УДК 625.745.12

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ОДНОПРОЛЕТНЫХ ПУТЕПРОВОДОВ С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ УСТОЯМИ

Канд. техн. наук **В.И. Попов**,
аспирант **Фам Туан Тхань**,
аспирант **Нгуен Ван Хиен**,
аспирант **Нгуен Мань Ха**

(Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ))

Конт. информация: +7 (925)010-10-97;

+7 (968)475-34-79;

+7 (965)299-80-68;

+7 (963)961-32-06;

popov@stpr.ru;

rthanh_2008@mail.ru;

nvhienmadi@gmail.com;

manhhamta@gmail.com

В статье приведены результаты анализа теоретических исследований работы однопролетных путепроводов с интегральными устоями с прямым, косым и криволинейным расположением в плане. Рассмотрены случаи применения в интегральных устоях стальных свай Н-образного и трубчатого сечений и показано, что для путепроводов с интегральными устоями трубчатые сваи наиболее предпочтительны. Установлено, что включение в работу путепроводов переходных плит снижает величину изгибающих моментов в сваях и уровень нормальных напряжений в их сечениях. Рекомендовано для косых и криволинейных путепроводов применять заглубленные переходные плиты, а для прямых в плане – поверхностные, образующие с устоем и пролетным строением единую конструкцию.

Ключевые слова: интегральный устой, путепровод, переходные плиты, перемещения, напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные публикации инженеров и исследователей из США по работе мостов с интегральными устоями позволяют говорить о том, что такие сооружения имеют большое будущее благодаря своим неоспоримым преимуществам по сравнению с мостами других систем [1-4]. В России и Вьетнаме пока не построено ни одного моста с инте-

гральными устоями, и для пролетов до 33 м в большинстве случаев применяют железобетонные балочные пролетные строения. Для уменьшения числа деформационных швов при многопролетной схеме мостов, путепроводов и эстакад устраивают неразрезную плиту проезжей части, превращая систему в температурно-неразрезную. При этом число опорных частей сохраняется таким же, как и в обычной балочно-разрезной системе. Как известно, в мостах с интегральными устоями опорные части отсутствуют вовсе.

В целях получения результатов, которые позволили бы установить целесообразность применения в практике проектирования мостов с интегральными устоями в условиях Вьетнама, а также России, в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ) на кафедре мостов, тоннелей и строительных конструкций с 2014 г. проводятся исследования особенностей работы однопролетных путепроводов с интегральными устоями, анализ части результатов таких исследований приведен ниже.

В качестве объектов исследования были приняты однопролетные мостовые сооружения, которые в виде путепроводов возводят над автомобильными и железными дорогами.

В российской и зарубежной практике в 30-50-е годы прошлого столетия для путепроводов широко использовали однопролетные конструкции из монолитного железобетона рамной системы, которые являются прообразами современных мостов с интегральными устоями (**рис. 1 а**). Опоры таких рамных путепроводов выполняли в виде отдельных стоек, которые могли воспринимать значительные деформации, возникающие от внешних нагрузок и температурных воздействий. Позднее, в 70-х годах прошлого столетия стали применять многопролетные рамные мосты с малыми пролетами до 20 м, у которых стойки выполняли из стандартных железобетонных свай, погруженных в грунт или заделанных в фундамент (**рис. 1 б**). Такие мосты также не имели деформационных швов, а роль опорных частей выполняли гибкие стойки.

Основной недостаток упомянутых конструкций состоял в том, что в сопряжении мостов с насыпью подходов легко образовывались просадки грунта, которые создавали дополнительное динамическое воздействие от проезжающих автомобилей. Применение начиная с 70-х годов прошлого столетия в практике России переходных плит длиной 4-8 м позволило снизить глубину просадок грунта в сопряжении мостов с насыпью дороги, но полностью их не исключило. Благодаря использованию в последние годы армогрунтовых конструкций насыпей подходов к мостам удалось значительно улучшить свойства грунтов насыпи и тем самым снизить вероятность образования просадок перед мостами.

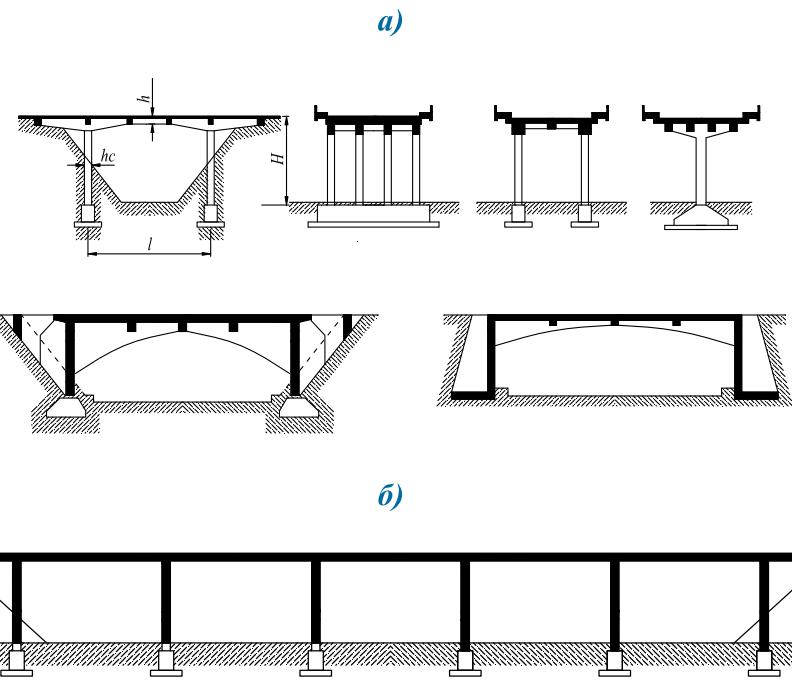


Рис. 1. Мосты рамной системы:
а – однопролетные монолитной конструкции;
б – многопролетные с гибкими опорами-стойками

Экономические потери, связанные с содержанием опорных частей, деформационных швов и мест сопряжения с насыпью, составляют в среднем около 10% от сметной стоимости мостового сооружения. В масштабе всего парка мостовых сооружений в России потери оцениваются уже как значительные.

Современная конструкция моста с интегральными устоями создает более благоприятные условия для его совместной работы с подходами. Устои, снабженные переходными плитами, образующими одно целое с телом устоев, и опирающиеся на гибкие стальные сваи, способствуют образованию небольших по величине перемещений верха пролетных строений и, очевидно, исключению необходимости применения сложных и дорогостоящих деформационных швов по концам поверхностных переходных плит. В случае применения заглубленных переходных плит деформационные швы исключаются полностью. Эти и другие особенности работы мостов с интегральными устоями способствовали проведению ряда исследований с однопролетными путепроводами различного типа (прямыми, косыми и криволинейными в плане).

Исходные данные

Как показало ознакомление с выполненным в университете штата Юта [5] обзором построенных мостов с интегральными устоями, переходные плиты применяют не во всех странах, где такие мосты эксплуатируются. По этой причине авторами были проведены расчеты на базе конечно-элементной модели однопролетного сталежелезобетонного путепровода (длина пролета – 30 м) с учетом переходной плиты и при ее отсутствии. Простейшие деформационные швы при этом устраиваются по концам переходных плит (рис. 2).

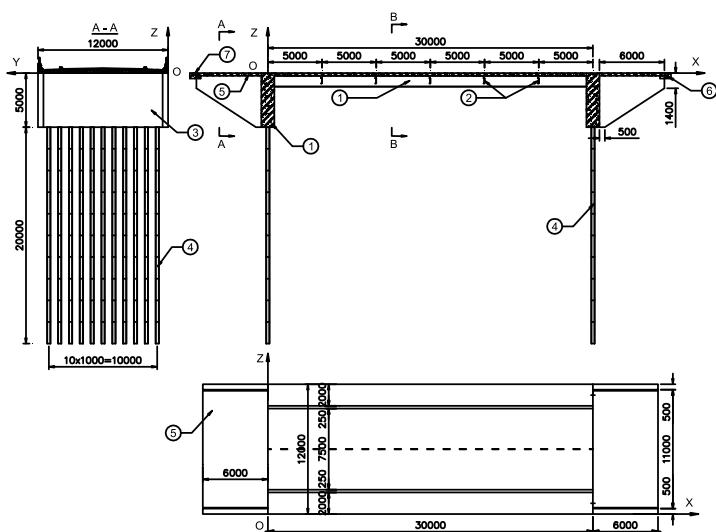


Рис. 2. Схема путепровода с интегральными устоями и переходной плитой:

- 1 – главные балки;*
- 2 – поперечные балки;*
- 3 – устои;*
- 4 – сваи;*
- 5 – переходная плита;*
- 6 – подушка;*
- 7 – деформационный шов*

Для оценки работы расчетной модели путепровода под нагрузками приняли неблагоприятное сочетание, включающее все постоянные нагрузки, перепад температуры, подвижную нагрузку HL-93K с торможением [6]. Схема приложения нагрузки HL-93K приведена на рис. 3.

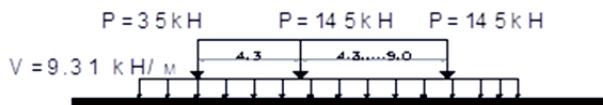


Рис. 3. Схема приложения нагрузки HL-93К

Анализ полученных результатов

Результаты расчетов показали, что учет влияния переходной плиты ведет к уменьшению изгибающих моментов в сваях до 30% (рис. 4 а). Что касается перемещений, то для верха устоя в модели с переходной плитой они меньше на 10-15%, чем в модели без переходной плиты. На уровне низа тела устоя разница в величине перемещений больше и составляет до 30% для рассмотренных размеров свай (рис. 4 б). В то же время при наличии переходной плиты сваи также деформируются меньше. Максимальные перемещения верха свай во всех рассмотренных случаях не превышали 21 мм.

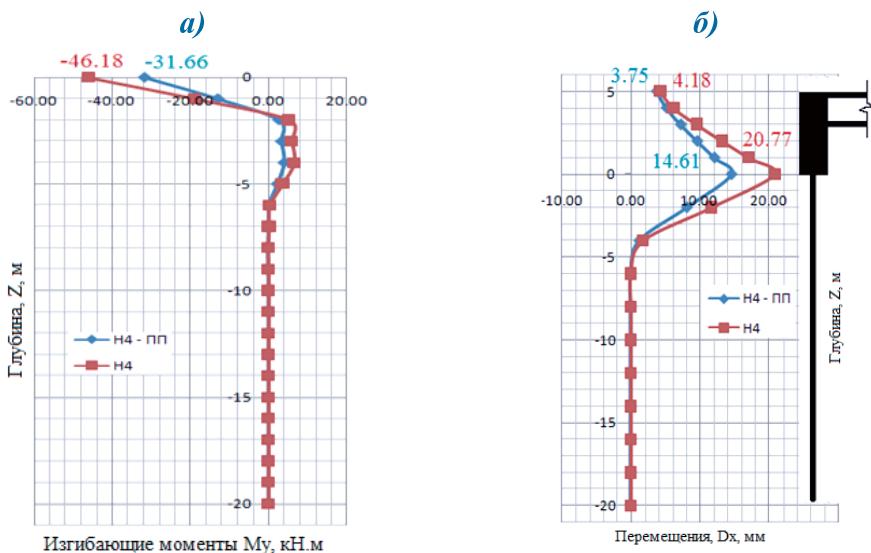


Рис. 4. Эпюры изгибающих моментов (а) и перемещений (б) свай и интегрального устоя

Поверхностные переходные плиты под действием нагрузок, приложенных на пролетное строение и устои, деформируются, и их конец испытывает продольные и вертикальные перемещения (прогибы). Продольные перемещения воспринимаются простейшим деформационным швом, расположенным за концевой гранью переходной плиты, а вертикальные перемещения создают неровность в уровне проезда и должны быть сведены к минимуму (**рис. 5**).

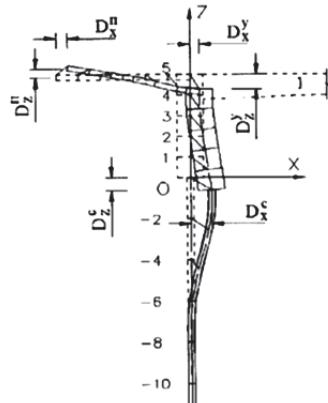


Рис. 5. Деформации интегрального устоя с переходной плитой

Изменяя параметры переходной плиты можно добиться минимальной величины подъема ее конца. При изменении толщины переходной плиты от 25 до 45 см при ее длине 6,0 м удается вертикальное перемещение плиты снизить на 60% (**рис. 6**).

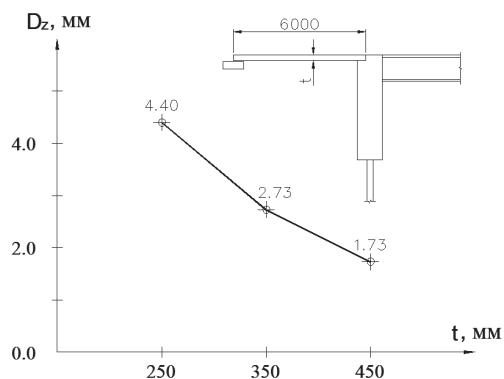
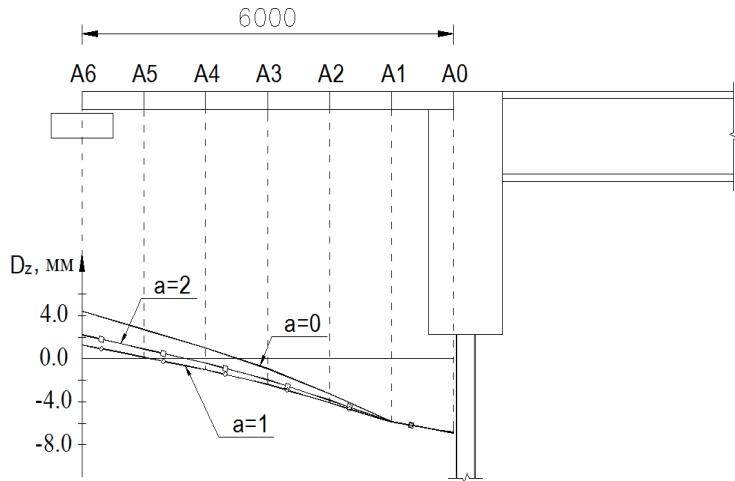


Рис. 6. Влияние толщины переходной плиты на ее прогибы

Другим способом увеличения жесткости переходной плиты является устройство в ней продольных ребер жесткости. На графиках рис. 7 представлены эпюры прогибов переходных плит шириной 12 м с продольными ребрами и без них.



*Рис. 7. Прогибы переходной плиты
с ребрами жесткости и без них:
а – расстояние между ребрами жесткости*

Как показали расчеты, применение ребристой плиты ведет к уменьшению перемещений концов переходных плит в вертикальной плоскости – от 4,40 до 1,29 мм.

Для городских путепроводов косое расположение устоев является не редкостью. Изменение угла косины от 0° до 45° показывает, что даже под действием постоянных нагрузок (боковое давление грунта на устой и собственный вес пролетного строения и устоев) пролетное строение с интегральным устоем поворачивается в горизонтальной плоскости. При этом для Н-образных свай, ориентированных симметрично относительно продольной оси X путепровода, продольные перемещения при угле косины 45° до 11% меньше по сравнению со случаем, когда ось Y поперечного сечения расположена перпендикулярно косине пролетного. При использовании трубчатых свай с такой же примерно площадью сечения продольные перемещения уменьшаются до 31% (рис. 8).

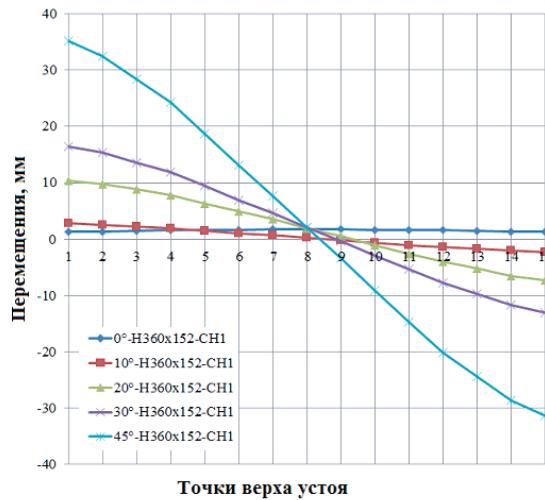
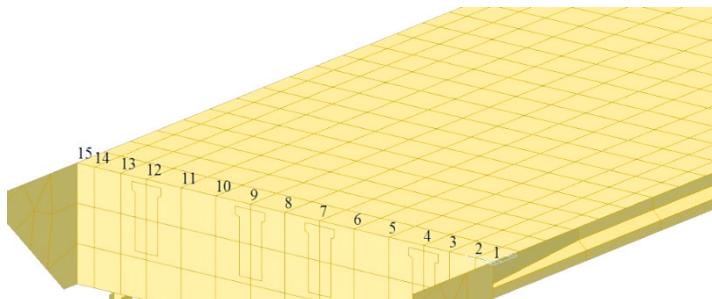


Рис. 8. Графики продольных перемещений устоя при действии постоянных нагрузок (сваи H360x152)

Нумерация точек на верху интегрального устоя представлена на **рис. 9.**



*Рис. 9. Нумерация точек верха устоя
(точка 1 находится в остром углу)*

При этом загружение CH1* соответствует действию только постоянных нагрузок, а сочетание CH2 учитывает также действие подвижной нагрузки, перепада температуры и силы торможения.

* CH1, CH2 – новое сочетание нагрузок.

При загружении CH2 наблюдается та же тенденция в отношении продольных перемещений, но по абсолютной величине перемещения становятся меньше до 3% для Н-образных свай и до 4% – для трубчатых при наибольшем угле косины 45° .

В целом можно констатировать, что, изменяя расположение по-перечного сечения Н-образных свай или применяя трубчатые сваи, можно добиться снижения продольных перемещений устоя до 30%. Графики изменения наибольших перемещений D_x относительно оси X представлены на **рис. 10 а.**

По сравнению с перемещениями D_x перемещения в направлении поперечной оси D_y при угле косины пролетного строения от 11° до 45° оказываются больше чем в 3 раза (**рис. 10 б**).

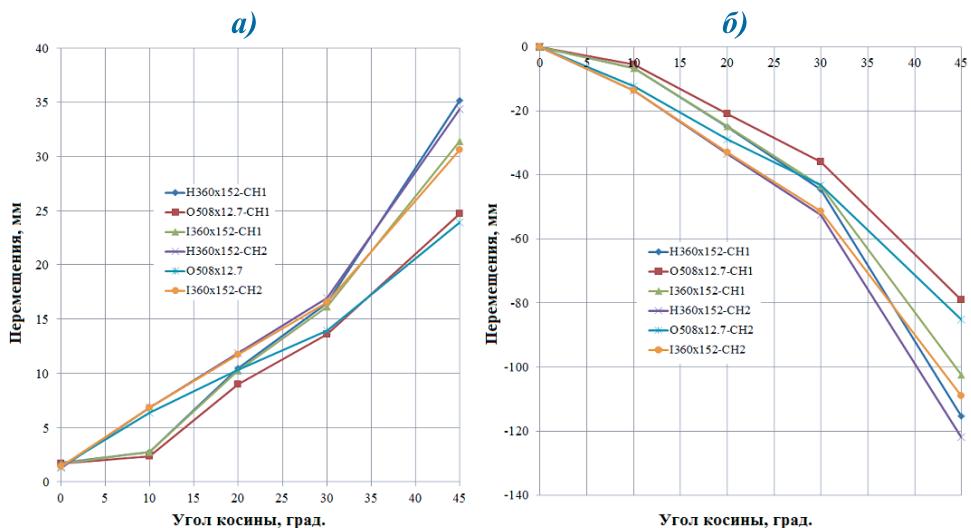


Рис. 10. Графики продольных (а) и поперечных перемещений (б) верха устоя при двух загружениях CH1 и CH2

Для стальных свай интегральных устоев должна быть обеспечена их работа в упругой стадии, хотя, по мнению некоторых исследователей, можно допустить образование пластических деформаций [5]. Для сравнения уровней нормальных напряжений в сваях Н-образного и трубчатого сечений при примерно одинаковой площади их поперечных сечений были построены графики изменения наибольших напряжений по глубине свай (**рис. 11**).

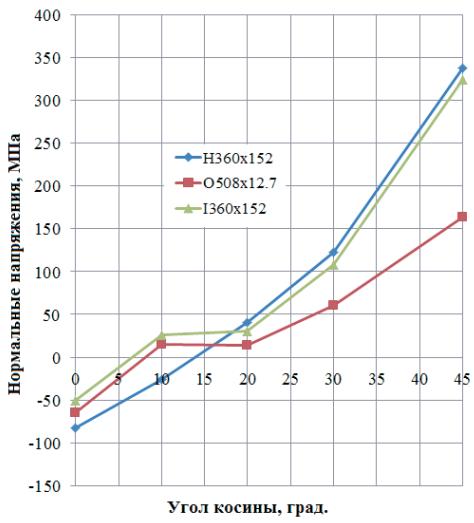


Рис. 11. Изменения нормальных напряжений в сваях при разной косине пролетного строения

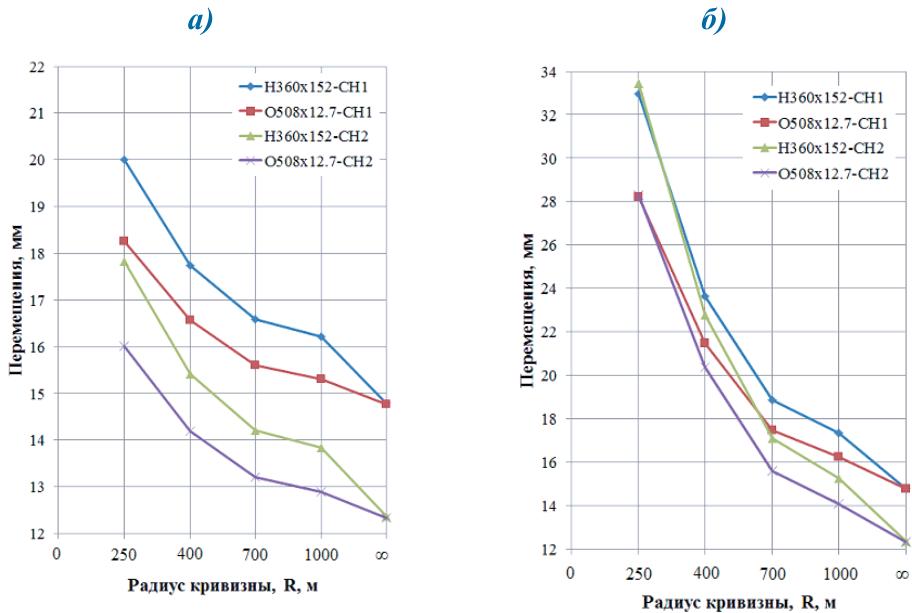


Рис. 12. Продольные перемещения D_x (а) и результирующие перемещения D_{xy} в криволинейных пролетных строениях при загружениях CH1 и CH2

В криволинейных пролетных строениях с уменьшением радиуса кривизны перемещения вдоль продольной оси D_x и результирующие перемещения D_{xy} возрастают. На графиках **рис. 12** показано изменение наибольших перемещений верха интегрального устоя при использовании Н-образных и трубчатых свай. При этом при трубчатых сваях результирующие линейные перемещения оказываются до 15% меньше, чем при Н-образных сваях (**рис. 12 б**).

По напряжениям разница при наименьшем радиусе кривизны 250 м в применении Н-образных или трубчатых свай небольшая и составляет не более 10%, что видно из графиков **рис. 13**.

Для Н-образных свай из стали A709M [6] предел текучести 250 МПа достигается при косине 40° , а для свай трубчатого сечения – при косине 45° .

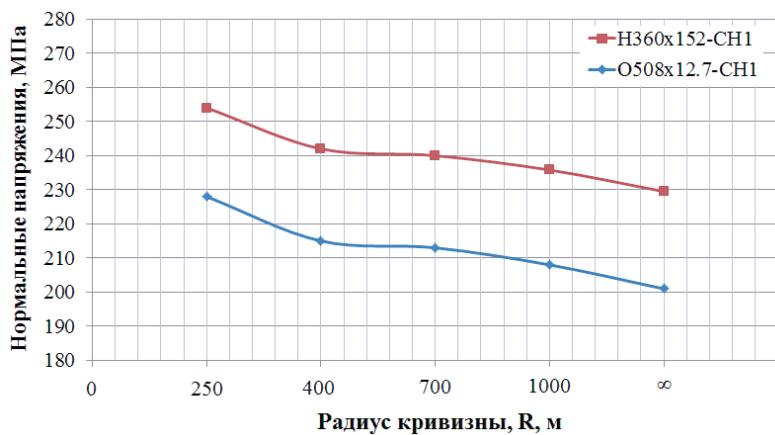


Рис. 13. Нормальные напряжения в сваях

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показали, что в косых и криволинейных мостовых сооружениях (мосты, эстакады и путепроводы) с отдельными пролетами до 35 м по концам интегральных устоев под действием учитываемых нормами нагрузок и воздействий создаются перемещения в горизонтальной плоскости, равнодействующие которых направлены под углом по отношению к продольной оси. Данные перемещения изменяются по ширине интегральных устоев и по абсолютной величине их наибольшие значения при обеспечении прочности свай могут составлять 40 мм и более в зависимости от геометрических параметров путепровода. При таких условиях применение поверхно-

ной переходной плиты становится нецелесообразным, и поэтому рекомендуется устраивать заглубленную переходную плиту с шарнирным опиранием на выступ тела интегрального устоя, как это обычно делается в мостах с традиционными устоями.

Как показывает анализ построенных мостов с интегральными устоями, Н-образные стальные сваи в основном применяют в США. Сечения этих свай ориентируют относительно продольной оси мостового сооружения так, чтобы момент инерции при изгибе был минимальным. Но как показывают расчеты авторов данной статьи, полые стальные трубчатые сваи с той же площадью поперечного сечения обеспечивают работу свай в упругой стадии при больших изгибающих моментах. При ориентировании поперечного сечения Н-образных свай относительно продольной оси моста по направлению наибольшей жесткости удается снизить величину перемещений верха устоя и самих свай и обеспечить почти такой же эффект, что и для равных по площади сечения трубчатых свай. Все отмеченное имеет отношение к прямым в плане мостам.

Для косых и криволинейных мостов с интегральными устоями характерно закручивание пролетного строения в горизонтальной плоскости, и в этом случае применение более жестких на кручение трубчатых свай предпочтительнее, чем Н-образных свай при любой ориентации поперечных сечений относительно продольной оси. При этом для косых пролетных строений применение трубчатых свай эффективнее, чем для криволинейных. Если принять во внимание тот факт, что в криволинейных пролетных строениях устои в большинстве случаев располагают по косому направлению, то это еще раз подтверждает целесообразность использования трубчатых свай.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zordan T. Analytical Formulation Limit Length of Integral Bridges / T. Zordan, B. Brisegholla, Jan Cheng // Structural Engineering International. – 2011. – August. – Vol. 2, № 3. – PP. 1-15.*
2. *Baptiste K.T. Parametric study and Length Limitations for Presstressed Concrete Girder Integral Abutment Bridges / K.T. Baptiste, W.S. Kim, J.A. Laman // Structural Engineering International. – 2011. – May. – Vol. 21, № 2. – PP. 151-156.*
3. *Olson S.M. Thermal Behavior of IDOT Integral Abutment Bridges and Proposed Design Modifications / S.M. Olson, K.P. Holloway,*

J.M. Buenker, J.M. Lafave. – Illinoise Centre for Transportation. – 2013. – 63 p.

4. *Naji M. Integral Abutment Bridges – Development of Soil Model for Soil Structure Interaction in Time History Analysis / M. Naji, A.R. Khalim // International Journal of Engineering Research and Development. – 2014. – March. – Vol. 10, Iss. 3. – PP. 31-40.*
5. *Barr P.J. Behavior and Analysis of Integral Abutment Bridge / P.J. Barr, M.W. Hallimg, C. Huffaker, H. Boyle / Utah State University. – Logan, 2013. – September. – PP. 1-61.*
6. *Нормы проектирований мостов. 22TCN272-05. – Вьетнам, 2005. – 400 с. – Вьетн.*

LITERATURA

1. *Zordan T. Analytical Formulation Limit Length of Integral Bridges / T. Zordan, B. Brisegholla, Jan Cheng // Structural Engineering International. – 2011. – August. – Vol. 2, № 3. – RR. 1-15.*
2. *Baptiste K.T. Parametric study and Length Limitations for Presstressed Concrete Girder Integral Abutment Bridges / K.T. Baptiste, W.S. Kim, J.A. Laman // Structural Engineering International. – 2011. – May. – Vol. 21, № 2. – PP. 151-156.*
3. *Olson S.M. Thermal Behavior of IDOT Integral Abutment Bridges and Proposed Design Modifications / S.M. Olson, K.P. Holloway, J.M. Buenker, J.M. Lafave. – Illinoise Centre for Transportation. – 2013. – 63 p.*
4. *Naji M. Integral Abutment Bridges – Development of Soil Model for Soil Structure Interaction in Time History Analysis / M. Naji, A.R. Khalim // International Journal of Engineering Research and Development. – 2014. – March. – Vol. 10, Iss. 3. – PP. 31-40.*
5. *Barr P.J. Behavior and Analysis of Integral Abutment Bridge / P.J. Barr, M.W. Hallimg, C. Huffaker, H. Boyle / Utah State University. – Logan, 2013. – September. – PP. 1-61.*
6. *Normy proektirovaniij mostov. 22TCN272-05. – V'etnam, 2005. – 400 s. – V'etn.*

.....

BEHAVIOR ANALYSIS OF SINGLE-SPAN OVERPASS WITH INTEGRAL ABUTMENTS

*Ph. D. (Tech.) V.I. Popov,
Post-graduate Student Pham Tuan Thanh,
Post-graduate Student Nguyen Van Hien,
Post-graduate Student Nguyen Manh Ha
(Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University (MADI))
Contact Information: +7 (925)010-10-97;
+7 (968)475-34-79;
+7 (965)299-80-68;
+7 (963)961-32-06;
[vpopov@stpr.ru;](mailto:vpopov@stpr.ru)
[pthanhtuan2008@mail.ru;](mailto:pthanhtuan2008@mail.ru)
[nvhienmadi@gmail.com;](mailto:nvhienmadi@gmail.com)
manhhamta@gmail.com*

The article deals with the results of theoretical researches of single-span overpasses with integral abutments with straight, skewed and curved alignments. The use cases of steel H-shaped and pipe piles in integral abutments are considered and it is shown that for overpasses with integral abutments pipe piles are the most preferred. It is revealed that including approach slabs in overpass work may decrease bending moment value in piles and level of normal stresses in their sections. It is recommended to apply the embedded approach slabs for skewed and curved overpasses and for straight ones surface slabs forming the entire construction with abutment and span.

Key words: *integral abutment, overpass, approach slab, displacements, stresses.*

Рецензент: канд. техн. наук Б.П. Кутько (Федеральное дорожное агентство (Росавтодор)).

Статья поступила в редакцию: 13.06.2017 г.