

ПОДВИЖКИ ГРУНТА И ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕЦ ОБЛИЦОВКИ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПОДЗЕМНОГО ТУННЕЛЯ В НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТАХ В НЕАПОЛЕ

И. БИЛОТТА, ДЖ. РУССО, К. ВИДЖИАНИ – *Университет Napoli Federico II, факультет геотехники, (Неаполь, Италия).*

В Неаполе реализуется крупный проект, в рамках которого строится продолжение восточной линии метрополитена. Проектом предусмотрено сооружение двойных туннелей, которые прокладываются с помощью двух тоннелеукладчиков ($d = 6,74$ м). На сегодняшний день закончено строительство первого отрезка длиной примерно 1 км, который проходит в песчаных грунтах с высоким уровнем грунтовых вод. Для проведения мониторинга в нескольких секциях устанавливали измерительные датчики в тех местах, где при использовании оптического нивелирования и глубинной измерительной аппаратуры наблюдались осадки поверхности и глубокие подвижки грунта. При помощи тензометров были также измерены деформации в четырех секциях предварительно отлитых бетонных колец обвязки. В настоящей работе приводятся полученные результаты и даются предварительные комментарии.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство продолжения первой линии метро в Неаполе ведется в чрезвычайно плотно застроенном районе города. Первоначально предполагалось использовать способ откопки с раскреплением стен котлована, но впоследствии было решено осуществить прокладку туннеля с помощью бурового щита. Строительство двойных туннелей круглого сечения ведется на различной глубине (примерно до 45 м) и в различных грунтовых условиях.

Начало выработки расположено в шахте на глубине примерно 17 м от дневной поверхности, затем туннель опускается на глубину около 20 м. Первый участок полностью пробурен в слое аллювиальных и пылеватых песков при высоком давлении поровой воды, так как уровень грунтовых вод находится всего на несколько метров ниже земной поверхности. На расстоянии примерно 1 км от начала выработки туннели входят в слой торфяных образований (неаполитанский желтый торф), которые располагаются на различной глубине либо под аллювиальными песками, либо под пирокластическими пылеватыми песками (пуццолан).

В настоящий момент две тоннелеукладочные машины производят бурение круглых туннелей и их обделку сборными бетонными секциями (внутренний $d = 5,85$ м, внешний $d = 6,45$ м). Каждое кольцо обвязки состоит из 7 сегментов (6 + замковый) и имеет форму цилиндра с непараллельными сторонами. Это позволяет следовать неидеально прямой траектории, благодаря вращению колец вокруг продольной оси. Каждый сегмент в кольце имеет форму параллелограмма (исключение составляют замковый и противо-замковый сегменты в форме трапеции). Изгиб шести больших сегментов составляет $56,8^\circ$, а замкового сегмента – $19,2^\circ$. Вдоль стыков в целях гидроизоляции на сегментах устраиваются неопреновые резиновые ленты. Схематичный поперечный разрез секции облицовки и пример типичной последовательности двух колец обвязки показаны на рис. 1.

При проектировании сегментной обвязки следует учитывать процесс производства, хранения, транспортировки и установки сегментов кольца до начала работ, а также боковое давление тоннелеукладчика на кольцо и давление грунта после установки кольца.

© И. Билотта, Дж. Руссо, К. Виджиани, 2005

Internet: www.georec.spb.ru

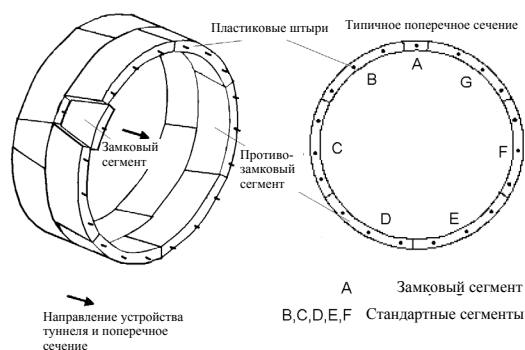


Рис. 1. Схематическое изображение облицовки

Прогноз величины давления грунта представляет собой сложную задачу, так как это давление является результатом взаимодействия грунта основания и обвязки, а также значительного влияния процессов выемки грунта и установки колец обвязки.

Боле того, трудно понять и смоделировать структурное поведение обвязки. На практике сегментная природа обвязки часто не принимается во внимание при проектировании и, таким образом, получается консервативная оценка уровня нагрузки в сегментах. Однако последние исследования [3, 4] показали, что стыки между сегментами значительно снижают уровень нагрузки.

Поэтому представляется, что мониторинг обвязки в процессе строительных работ будет способствовать улучшению расчетных методов. Итак, на нескольких кольцах обвязки было установлено измерительное оборудование, и поведение колец постоянно отслеживалось.

1. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

На каждом сегменте колец, оборудованных измерительной аппаратурой, было установлено по 5 датчиков для измерения деформаций (рис. 2).

Для проведения калибровки сегментов в кольцах их испытывали в условиях известных усилий и затем измеряли возникшие деформации (рис. 3). К каждому сегменту, закрепленному в треугольной стальной раме, прикладывали нагрузку при помощи двух гидравлических домкратов. Домкраты передавали усилие на короткие боковые стороны сегментов через специально спроектированные стальные кли-

нья, что позволило прикладывать усилия параллельно осям сегментов. Общее усилие воспринималось стальной пластиной. Каждое из трех усилий (два воздействия и противодействие) измерялись тензометрами. Испытания проводились на площадке производителя (рис. 4).

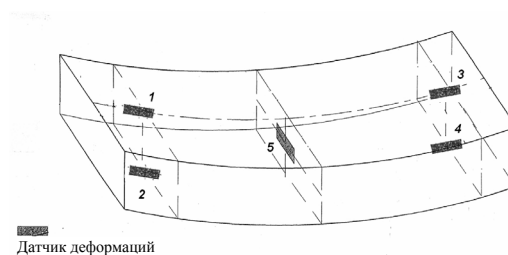


Рис. 2. Схема размещения аппаратуры на сегменте

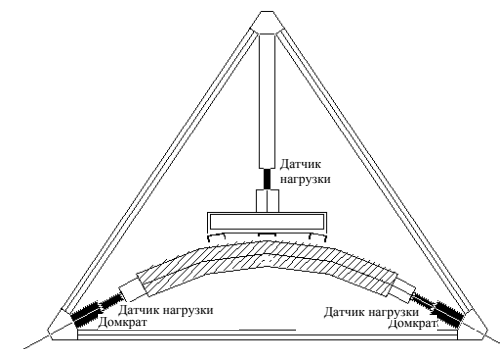


Рис. 3. Схема проведения испытаний

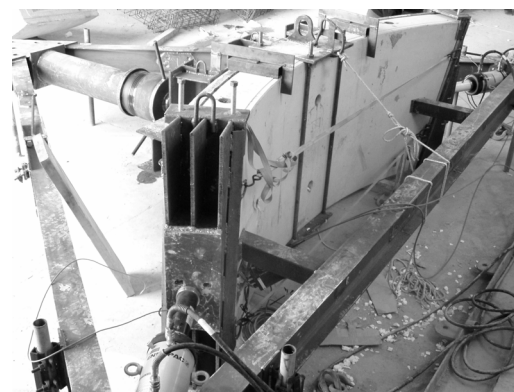


Рис. 4. Проведение испытаний

Деформации измерялись парами датчиков 1–2 и 3–4 соответственно на внутренней и внешней сторонах сегмента.

Нагрузка в сегменте достигала нормального усилия N и изгибающего момента M ,

значения которых известны для каждого сегмента из условия простого равновесия. Поэтому деформации в каждой секции можно рассчитывать исходя из гипотезы, что сегмент ведет себя как изогнутая балка.

На рис. 5 приведена зависимость измеренных деформаций от приложенного номинального усилия (отрицательные значения – для сжатия). Во избежание разрушения сегментов прикладываемое в процессе испытаний усилие не превышало 700 кН. По результатам испытаний всех 24 оборудованных аппаратурой сегментов наблюдается некоторый разброс показаний. В реальности геометрия сегментов не совпадает на 100% из-за конусообразной формы кольца. Кроме того, небольшие различия от испытания к испытанию возникают из-за допустимых отклонений в системе приложения нагрузки, а также из-за местоположения датчиков внутри сегмента.

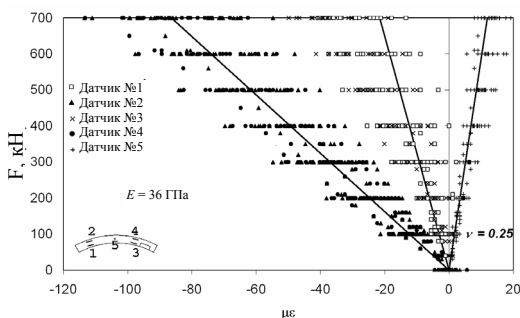


Рис. 5. Общие результаты испытаний

Соединяя экспериментальные точки прямыми линиями, можно получить средние значения модуля Юнга для бетона $E = 36$ ГПа (мин. 15 ГПа, макс. 82 ГПа) и средние значения коэффициента Пуассона $\nu = 0,25$. Полученное значение E несколько ниже $E = 38$ ГПа, которое постоянно при удельной кубической прочности бетона ($R_{ck} = 450$). Это, вероятно, объясняется тем, что многие сегменты были испытаны за несколько дней до нормального срока твердения бетона (28 сут). С другой стороны, хотя возможны более низкие значения коэффициента Пуассона, колебания значения модуля Юнга также оказывают влияние на расчеты.

2. МОНИТОРИНГ

2.1. Подвижки грунта

Первый участок туннелей проходит в несвязном грунте ниже уровня грунтовых вод. Там была организована система мониторинга, состоящая из четырех секций, оборудованных измерительной аппаратурой, марок оптического теодолита, экстензиометрических и инклинометрических трубок и колец обвязки, оборудованных измерительной аппаратурой.

Кроме того, марки оптического теодолита были выровнены по оси туннеля. Частоту измерений варьировали в зависимости от хода строительных работ. Типичный поперечный разрез секции с измерительной аппаратурой показан на рис. 6.

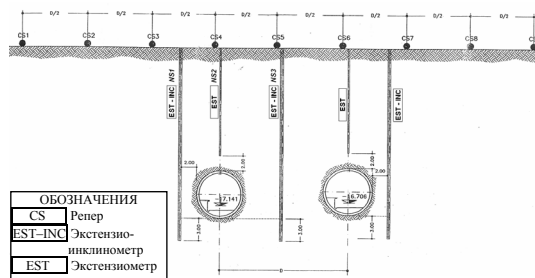


Рис. 6. Типичный разрез с расположением измерительной аппаратуры

Осадки поверхности измеряли вдоль поперечной секции 1 на различных этапах после прохождения забоя южного (левого) туннеля (рис. 7). Можно заметить, что результаты измерений повторяются. Это свидетельствует о том, что мульда поверхности не изменилась. На самом деле в грунте данного типа осадки в результате консолидации грунта не ожидались.

Все множество величин зарегистрированной мульды оседания аппроксимировалось кривой Гаусса, было установлено совпадение максимальных средних величин осадок и определено положение точки перегиба кривой i . Отсюда были рассчитаны средние значения объема мульды: $V_i = 0,46\%$ и $K = 0,4$ (глубина оси туннеля $z_0 = 14$ м).

Эти величины близки к ожидаемым для данных типов грунтов и технологии выемки грунта [1, 5, 6]

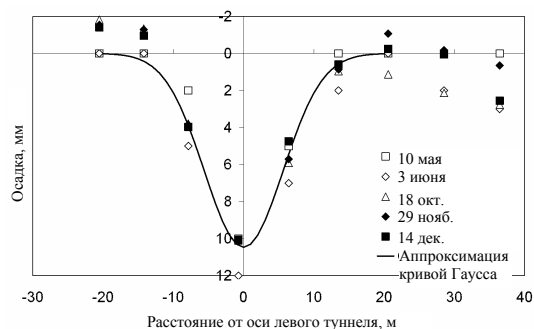


Рис. 7. Осадки в сечении 1, измеренные после прохождения первого туннеля

После прохождения второго туннеля (северного, или правого) сечения 1 были зафиксированы осадки, показанные на рис. 8 треугольниками. Показания снимались примерно один раз в день во время работ по откопке грунта. Представленные результаты относятся ко времени, когда начало туннеля находилось в нескольких диаметрах от сечения 1. Аппроксимирующая кривая на рис. 8 получена путем суммирования данных измерений по кривой Гаусса от 14 декабря и данных по увеличению осадок на той же кривой начиная с этой даты. Обозначенное выше совпадение позволило вычислить $V_t = 0,50\%$ и $K = 0,6$, причем последняя величина оказалась немного меньше ожидаемой при прокладке одного туннеля в данных грунтах. Так как расстояние между осями двух туннелей практически равно двум диаметрам, могло возникнуть взаимодействие между двумя процессами откопки [2].

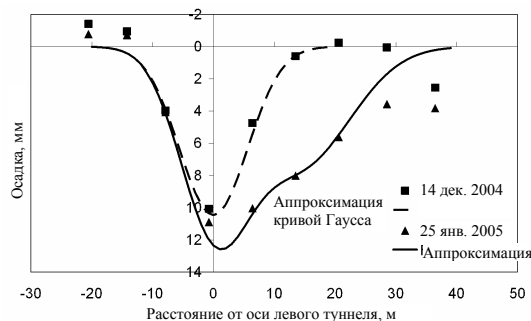


Рис. 8. Осадки в сечении 1, измеренные после прохождения второго туннеля

В сечении 1 также были установлены инклинометры и экстензиометры, как показано на рис. 6. Вертикальные инклинометры NS1 и NS3 расположены соответственно на левой и правой сторонах южного туннеля (на рис. 6 изображена левая сторона), который откапывался первым. Результаты измерений (рис. 9) относятся к трем различным этапам после откопки южного туннеля, когда прокладка северного туннеля еще не достигла данной сечения. На рисунке отмечены смещения в плоскости сечения (положительные значения — по направлению к туннелю): азимутальные величины показывают, что горизонтальные смещения вдоль NS1 произошли в основном в плоскости сечения 1, в то время как в смещениях, зафиксированных NS3 на глубине, наблюдался постоянный внеплоскостной компонент. По результатам расчетов можно предположить, что концы труб инклинометра, уходящие примерно на 3 м ниже дна туннеля, были жестко закреплены.

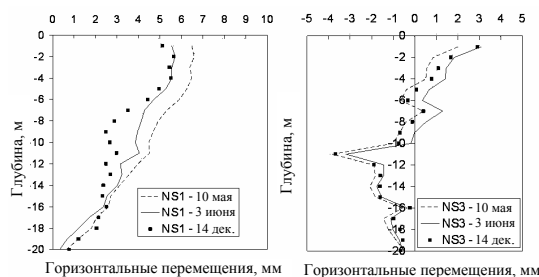


Рис. 9. Горизонтальные смещения грунта (секция 1)

На рис. 10 показаны осадки вдоль вертикальных линий NS1, NS2 и NS3, измеренные в те же дни. Линии NS2 хорошо соотносятся с осью южного туннеля. В данном случае осадка труб определялась по величине осадки верха труб, замеренной нивелиром. Разница между графиками скорее объясняется разбросом данных по измерениям верха труб, нежели реальными подвижками грунта во времени.

Однако из рис. 9, 10 видно асимметричное поле глубоких осадок, которое постоянно отмечалось и в последующих измерениях. Так как две вертикальные трубы NS1 и NS3 практически симметричны по оси туннеля, наблюдаемая несимметричность должна быть еще изучена.

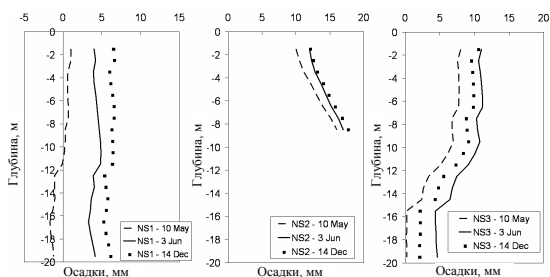


Рис. 10. Осадки по глубине (секция 1)

2.2. Деформации в кольцах обвязки

На сегодняшний момент зарегистрированы деформации в двух кольцах обвязки северного туннеля и в одном кольце южного.

Прокомментируем общие тенденции на основе результатов измерений, полученных в нескольких из 6 сегментов, оборудованных измерительной аппаратурой, в кольце 70 южного туннеля. Аппаратура была снабжена радиопередатчиками, что облегчило процесс мониторинга.

На рис. 11 показаны деформации во времени в сегменте B2 начиная с ранних сроков твердения бетона. Расширение считается положительной деформацией. Жирной непрерывной линией показана температура, измеренная термоэлементом, заглубленным в бетон недалеко от датчика № 5.

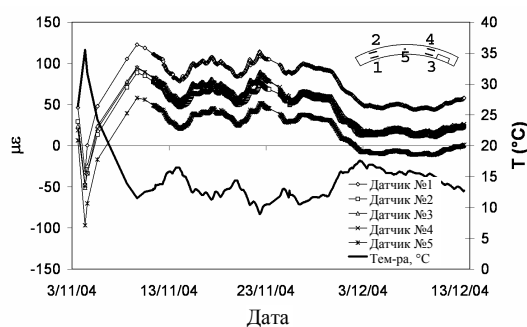


Рис. 11. Деформации в сегменте B2 в процессе твердения бетона

Аналогичная картина деформаций зафиксирована всеми датчиками с необходимой поправкой на начальных этапах бетонирования. Такое поведение не было неожиданным,

так как наблюдаемые деформации обусловлены одинаковыми температурными изменениями внутри опалубки в процессе твердения бетона.

При более высокой частоте измерений (одно измерение в час) наблюдались небольшие деформации из-за ежедневных колебаний температуры. Калибровка (см. рис. 5) была проведена в конце данного периода. На рис. 12 отмечены деформации по результатам измерений в сегменте F2, проведенных во время его хранения у производителя, при транспортировке и разгрузке на площадке недалеко от начала туннеля. Отмечена зависимость появления деформаций от колебаний температуры наружного воздуха. В правой половине графика зафиксированы большие перепады температуры (примерно 10° C за один день), что объясняется попаданием прямого солнечного света на сегмент, находящийся на площадке.

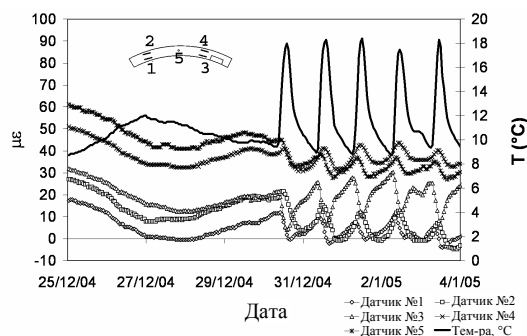


Рис. 12. Деформации в сегменте F2 во время хранения на площадке (до установки)

Перевозка сегмента от производителя на строительную площадку не оказала заметного влияния на деформации.

Данные по сегменту D2, полученные в процессе комплексной установки, представлены на рис. 13: деформации, снятые с датчика №1, взяты как наиболее типичные для ближайших датчиков (№№ 2–4), показания которых сходны. Во время установки сегмента продольный датчик (№ 5) попадает в зону сжатия (нагрузка от домкратов), а четыре других – в зону растяжения (эффект Пуассона). Обычно процесс установки кольца (включая откопку) занимает примерно 2 ч.

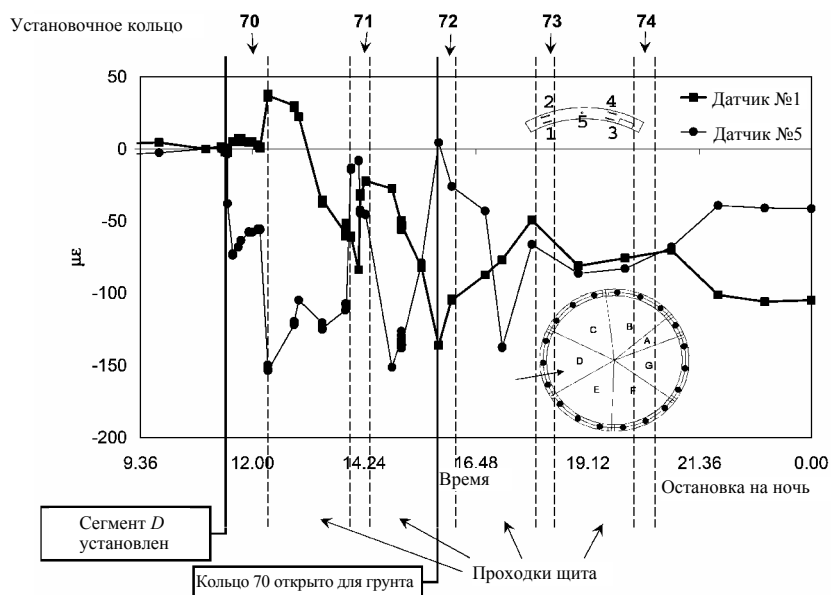


Рис. 13. Деформации в сегменте D2 во время и после установки

После установки всего кольца распор от продвигающегося щита вызывает дополнительную компрессию – по показаниям датчика № 5 и растяжение – по показаниям других датчиков. Цикл компрессии–декомпрессии (датчик №5) указывает на стадии последующей откопки грунта и установки колец. Кольцо, оборудованное датчиками, вынимают из щита до установки кольца № 72: когда грунт начинает действовать на кольца обвязки, датчики указывают на тенденцию ко все большей компрессии.

Как видно из рис. 14, давление, оказываемое щитом на следующий день, по-прежнему приводит к деформации кольца, снабженного датчиками: очевиден цикл компрессии–декомпрессии с преобладанием компрессии.

Данные по деформациям в том же сегменте примерно за две недели показаны на рис. 15 вместе с данными по температуре. Систематически наблюдались изменения температуры, предположительно обусловленные твердением раствора, инъецированного в конце проходки в пространство между обвязкой и окружающим грунтом.

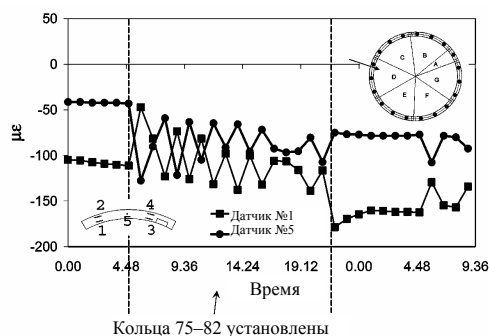


Рис. 14. Деформации в сегменте D2 после установки кольца

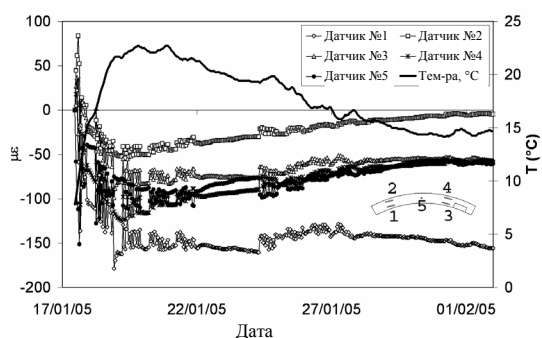


Рис. 15. Деформации в сегменте D2 в течение двух недель после установки кольца

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены некоторые результаты мониторинга при строительстве линии метрополитена № 1 в Неаполе. Представлены и прокомментированы данные, полученные с секций, оборудованных измерительной аппаратурой. В частности, измерялись деформации в четырех секциях готовых бетонных колец обвязки туннеля. Для получения более точных результатов перед установкой колец, оборудованных измерительной аппаратурой, в туннель была произведена калибровка всех колец обвязки, несущих аппаратуру. Измерения показаны с момента твердения бетона на площадке производителя; затем отслеживались все основные события. В настоящий момент все данные обрабатываются для более глубокого изучения влияния прикладываемых усилий на внутренние силы колец обвязки.

БЛАГОДАРНОСТЬ

И в заключение авторы выражают признательность компании G.T.V. s.c.a.r.l. за финансовую и техническую поддержку.

Список литературы

1. *Bilotta, E., Russo, G. & Viggiani, C.* 2002. Cedimenti indotti da gallerie superficiali in ambiente urbano. Proc. XXI AGI Conf.: 487–494 (in Italian).
2. *Hansmire, W.H. & Cording, E.J.* 1985. Soil tunnel test section: case history summary. J. Geotechnical Engineering (ASCE) 111 (11): 1301–1320.
3. *Hefny, A.M., Tan, F.C. & Macalevey, N.F.* 2004. Numerical Study on the Behaviour of Jointed Tunnel Lining. J. The Institution of Engineers of Singapore 44(1): 108–118.
4. *Lee, K.M & Ge, X.W.* 2001. The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure. Canadian Geotechnical Journal 38(3): 461–483.
5. *O'Reilly, M.P. & New, B.M.* 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude и prediction. Proc. Tunnelling '82 Symp., Inst. Mining & Metallurgy, London: 55–64.
6. *Oteo, C.S. & Sagaseta, C.* 1996. Some Spanish experiences on measurement и evaluation of ground displacements around urban tunnels. Proc. Int. Symp. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, Mair & Taylor (eds): 731–736.