

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ГРУНТА ВО ВРЕМЯ ЭКСКАВАЦИИ

Р. ДЖ. ФИННО – Факультет гражданского и экологического строительства, Северо-западный университет, США.

Лекция, прочитанная на научно-практическом семинаре TC207 «Soil-Structure interaction and Retaining Walls» ISSMGE в г. Дубровник, Хорватия, 2–8 октября 2011 г.

В данной статье обобщаются положения подхода адаптивного управления для прогнозирования, мониторинга и контроля смещений грунта, связанных с экскавацией в условиях городской застройки. Успешное применение данных мониторинга для усовершенствования прогнозов работы укрепленных котлованов в равной степени зависит от разумного численного моделирования работы грунта, данных мониторинга, используемого для наблюдений, и технологий оптимизации, применяемых для минимизации различий между прогнозами и наблюдаемой работой. В данной статье в общих чертах рассматриваются все эти факторы, и подчеркивается их взаимозависимость. Для иллюстрации возможностей данного подхода приводятся примеры использования данных технологий, полученные из случаев из практики.

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье обобщаются положения подхода адаптивного управления для прогнозирования, мониторинга и контроля смещений грунта, связанных с экскавацией в условиях городской застройки. Цель данного анализа – позволить инженеру использовать наблюдаемое на ранних стадиях проекта поведение грунта для объективной калибровки модели прогноза, чтобы сделать надежный прогноз о последующей работе. Успешное применение таких технологий зависит от модели прогнозирования. В данном случае это моделирование строительства с использованием метода конечных элементов, данных мониторинга и инверсивной технологии. В настоящей статье иллюстрируется данный подход применительно к укрепленным котлованам, устроенным в слабых глинах и глинах средней прочности. Даются комментарии относительно того, каким образом на результаты, полученные при помощи данной методики, влияют детали конечно-элементного моделирования, оснащения измерительной аппаратурой и сбора данных, а также инверсивной технологии.

Представлены несколько примеров котлованов с использованием данных технологий.

2. МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Развитие сенсорных технологий, информационных технологий и методов численного анализа позволяют автоматизировать цикл наблюдения и усовершенствовать прогноз работы.

Этот автоматизированный подход наблюдения может рассматриваться как адаптивное управление, он резюмируется на рис. 1. В левой колонке представлены расчеты, выполненные на стадиях проектирования и усовершенствования проекта, они включают расчеты методом конечных элементов применительно к глубоким котлованам.

Центральная колонка посвящена оптимизации, необходимой для совершенствования прогнозов, основанных на измерениях. В правой колонке приводятся данные полевых наблюдений, обычно данные инклинометра, но также и данные оптического наблюдения, давления поровой воды и датчиков деформации. Эти данные ежедневно оптимизируются как данные наблюдений, относительно которых оцениваются численные прогнозы.

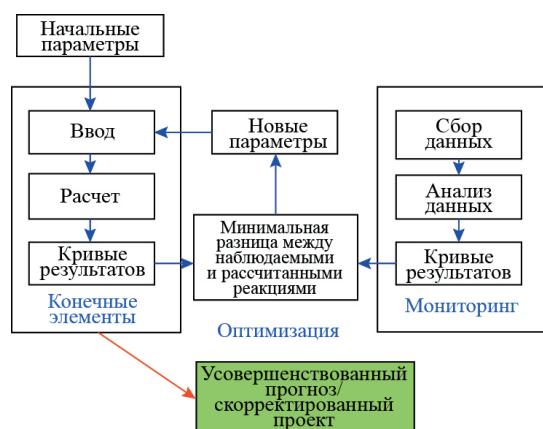


Рис. 1. Метод адаптивного управления

Примеры использования данного подхода для укрепленных котлованов описаны в работах Finno & Calvello (2005), Finno & Langoussis (2007). В идеальном случае этот процесс действует автоматически; все данные, полученные в полевых условиях, передаются в реальном времени на центральный компьютер, где они могут быть обработаны в формате, совместимом с численным анализом. В этом случае усовершенствованные прогнозы работы могут быть сделаны практически в реальном времени.

Основой процесса адаптивного управления геотехническими системами является оптимизация. Различные части модели изменяются, и, таким образом, измеренные величины согласуются с эквивалентными расчетными величинами до тех пор, пока результирующая откалиброванная модель не будет точно представлять основные аспекты реальной системы. Инструменты оптимизации всегда доступны. Например, MATLAB содержит наборы инструментов для оптимизации, которые также могут соединяться с конечно-элементными кодами для коммерческого использования.

Успешное применение данного подхода в равной степени зависит от разумного численного моделирования работы грунта, типа данных мониторинга, используемого для наблюдений, и технологий оптимизации, применяемых для минимизации различий между прогнозами и наблюдаемой работой, что изложено ниже.

2.1. Численный анализ

Ключом к успешному конечно-элементному моделированию является логичное представление в рамках численного моделирования предполагаемых действий в полевых условиях во время строительства. Кроме того, существует несколько других важных факторов для моделирования процессов строительства, которые влияют на рассчитанные реакции, в том числе базовая модель, размерность задачи и начальные напряжения в грунте. Эти факторы описаны в работе Finno (2010) применительно к укрепленным котлованам.

2.2. Оптимизация

Использование инверсивной модели обеспечивает получение результатов и статистики, предлагает мощные инструменты для анализа модели и во многих случаях ускоряет процесс корректировки величин параметров. Фундаментальным преимуществом инверсивного моделирования является его способность автоматически рассчитывать величины, которые обеспечивают максимальное соответствие между результатами наблюдений и вычислений.

Обычный метод инверсивного анализа, используемый в геотехнике, – это оптимизация градиентным методом. При данном подходе выполняется идентификация локальных параметров основного уравнения. Многие ранние оценки данных работы с таким подходом проводились с использованием очень простых моделей грунта, что существенно ограничивало возможность точного отражения данных полевых наблюдений в расчетах, вне зависимости от применения инверсионных технологий. Очевидно, что если базовая модель не способна представлять реакцию грунта в точке измерения для определенного сценария нагружения, данный подход не будет успешным.

Когда технология оптимизации применяется к полевым задачам, существует следующее основополагающее допущение: единственной неопределенностью является реакция материала, все остальные факторы известны и безошибочны. Когда делается прогноз реакции, очевидно, что это предположение неверно.

Однако, если полевые наблюдения за работой используются для калибровки модели во время строительства, и строительные процессы точно известны, этот источник неопределенности устраняется.

2.3. Наблюдения

При использовании инверсивной технологии необходимо осторожно выбирать типы данных и места расположения измерительных точек. Данные инклинометра, основанные на измерениях вблизи подпорной стены, наиболее полезны, когда предполагается, что работу грунта представляют типичные упруго-пластические базовые модели (например, конечно-элементные программы, доступные на рынке). Когда используется базовая модель, учитывающая нелинейность малых деформаций и дилатансию, эти данные могут быть дополнены осадками поверхности грунта (Finno, 2010).

Достижения в области сенсорной технологии позволяют проводить измерения автономно и посылать данные на центральный компьютер для обработки, пользуясь дисплеем, работающим в реальном времени. Этот процесс используется в инверсивном анализе. Например, станции общего наблюдения с дистанционным считыванием показаний датчиков могут быть установлены для наблюдения за смещением оптических призм (Finno & Blackburn, 2005). Инклинометры могут использоваться для дистанционного измерения бокового перемещения стен подпорной системы и прилегающего грунта. Струнные пьезометры могут устанавливаться для мониторинга давлений поровой воды в прилегающем грунте. Датчики деформаций могут помещаться на конструктивных опорах для измерения деформаций в отдельных точках временных систем раскрепления, вызванных нагружением грунта, собственным весом, температурными изменениями и не предусмотренными нагрузками во время строительства. Инклинометры могут устанавливаться на конструктивных элементах. Результаты измерений при помощи инклинометров используются для расчета угловых отклонений конструкции.

3. ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.1. Оптимизация параметров на ранних стадиях откопки

Данный подход обеспечивает получение оптимизированных параметров на ранней стадии откопки, что дает возможность надежного прогноза последующей работы конструкции. Рассмотрим это на примере реконструкции подземного перехода между Чикаго авеню и улицей Стейт в Чикаго (Finno & Calvello, 2005). В рамках этого проекта предусматривалась откопка котлована 12,2 м в грунте из слабой глины и глины средней прочности на расстоянии 2 м от школы, опирающейся на фундаменты мелкого заложения. На рис. 2 показана конечно-элементная схема, используемая при анализе. Система поддержки состояла из стены секущих свай с тремя уровнями опор, в том числе трубчатых распорок (первый уровень) и предварительно напряженных анкеров (второй и третий уровни). Инженерно-геологические условия площадки представлены насыпью из песка средней плотности с включениями строительного мусора, которую подстилают четыре слоя, образовавшихся в результате продвижения и отступления ледника времен формирования реки Висконсин. Три верхних слоя – ледниковые маргинальные отложения, образовавшиеся под водой. За исключением глиняной корки в верхнем слое эти отложения слегка переуплотнены в результате понижения уровня грунтовых вод после отложения и/или со временем.

Полное описание работы котлована можно найти в работе Finno et al. (2002). На рис. 3 обобщены боковые перемещения котлована и подпорной системы на восточной стороне экскавации. На этом рисунке показаны боковые перемещения и осадки. Однако оптимизация основывалась исключительно на боковых перемещениях. Эти перемещения произошли, когда секущая свайная стена проходила через все сжимаемые слои. При использовании данных наблюдений для калибровки параметров при помощи инверсивных технологий важно учитывать, что эти смещения происходили на ранней стадии откопки.

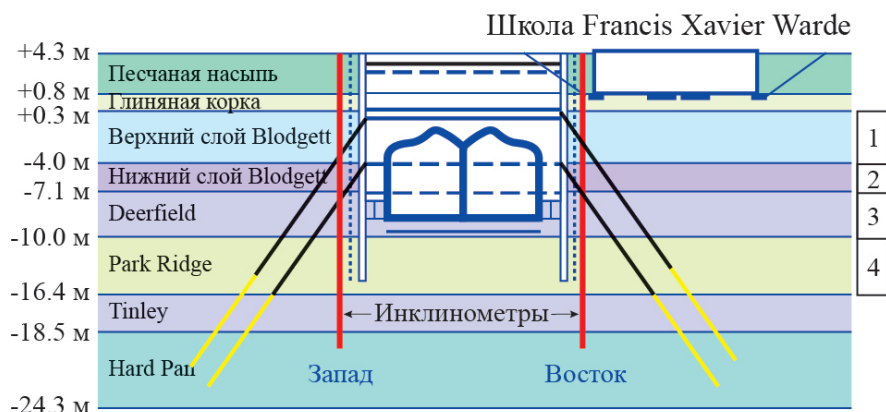


Рис. 2. Конечно-элементная сетка для котлована Чикаго-Стейт

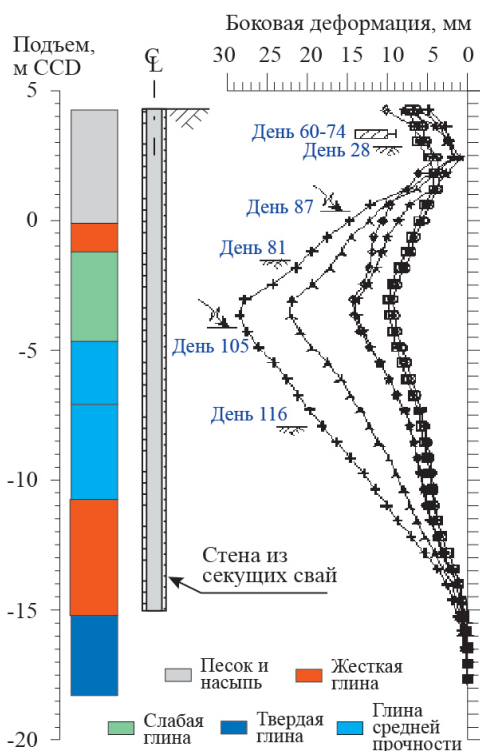


Рис. 3. Перемещения подпорной стенки при экскавации в проекте Чикаго-Стейт

Результатов этих наблюдений оказалось достаточно для оптимизации параметров во всех слоях. Таким образом, можно было спрогнозировать перемещения на последующих стадиях откопки. Важно понимать, что модель H-S, используемая для данного анализа, не учитывает эффекты нелинейности малых деформаций, следовательно, для того, чтобы сделать любые корректировки параметров

модели, требовались относительно большие смещения.

Очень небольшие перемещения за пределами тех, которые происходили во время установки стены, наблюдались до того, как котлован опустился ниже EL -1,4 м CCD; в результате откопки до этой отметки возникли дополнительные боковые перемещения величиной до 4 мм. Согласно такой работе можно

предположить, что верхние слои глины изначально были относительно жесткими, что указывает на нелинейность малых деформаций данных грунтов. Секущая свайная стена постепенно перемещалась к котловану, что было реакцией на снятие напряжений в процессе откопки. Когда откопка достигла последней стадии, максимальное боковое смещение составляло 28 мм. Здание школы получило осадку, поскольку секущая свайная стена смещалась в боковом направлении. Максимальная осадка здания школы в конце откопки также составила 28 мм, когда экскавация достигла проектной отметки.

В таблице 1 показаны фазы расчета и этапы строительства, используемые при конечно-элементном моделировании. Отметим, что трубы тоннеля и здание школы, расположенное недалеко от котлована, были в основном смоделированы на 12 первых стадиях моделирования, чтобы учесть влияние строительства на грунт вокруг котлована. Стадии 1–5 в процессе оптимизации относятся к стадиям строительства, для которых результаты расчетов сравнивались с данными, полученными при помощи двух инклинометров, расположенных на противоположных сторонах котлована. Этапы строительства, не обозначенные как «консолидация» в таблице 1, моделировались как недренированные. Параметры жесткости для модели упрочнения грунта (Schanz et al., 1999) оптимизировались для каждого сжимаемого слоя глины. В работе Calvello (2002) приводятся детали определения конечно-элементной задачи, стадий расчета и параметров модели.

Визуальная оценка распределения горизонтальных перемещений в местах расположения инклинометров представляет собой самый простой способ оценки согласованности между рассчитанными и измеренными полевыми результатами. Когда выполнялись расчеты на основе параметров, полученных из результатов трехосных испытаний в дренированных условиях, в конечно-элементной модели рассчитывались значительно большие смещения, чем на каком-либо этапе строительства (Finno & Calvello, 2005). Величины максимальных горизонтальных перемещений были примерно в два раза больше измеренных. Профили таких рассчитанных перемещений указывали на значительные и нереальные

смещения в нижних слоях глины. Как можно было ожидать, эти результаты свидетельствовали о том, что свойства жесткости для слоев глины, полученные на основании традиционных испытаний на трехосное сжатие, были меньше полевых величин.

На рис. 4 показано сравнение между данными, полученными в полевых условиях с обеих сторон котлована, и рассчитанными величинами горизонтальных смещений (когда параметры оптимизировались согласно первой стадии наблюдений). Улучшение согласованности между рассчитанными и измеренными реакциями значительно. Несмотря на то, что оптимизированный набор параметров рассчитывается с использованием только первой стадии наблюдений, положительное влияние на рассчитанную реакцию существенно для всех стадий строительства. В конце строительства (т.е. на стадии 5) максимальная рассчитанная величина перемещений превышает измеренную величину всего лишь на 15%. Эти результаты важны, так как успешная перекалибровка модели на ранней стадии строительства положительно отражается на дальнейших прогнозах поведения грунта во время всего строительства.

Таблица 1. Конечно-элементное моделирование процесса строительства

Фаза	Этапы строительства	Стадия
0	Начальные условия	
1–4 5	Строительство тоннеля (1940) Консолидация	
6–10 11–12	Строительство школы (1960) Консолидация	
13	Устройство секущей свайной стены (1999)	
14	Заливка бетона в стену	1
15	Консолидация (20 дней)	
16	Откопка и установка распорок	2
17	Откопка ниже первого уровня анкеров	
18	Предварительное напряжение первого уровня анкеров	3
19	Откопка ниже второго уровня анкеров	
20	Предварительное напряжение второго уровня анкеров	4
21	Откопка до конечного уровня	5

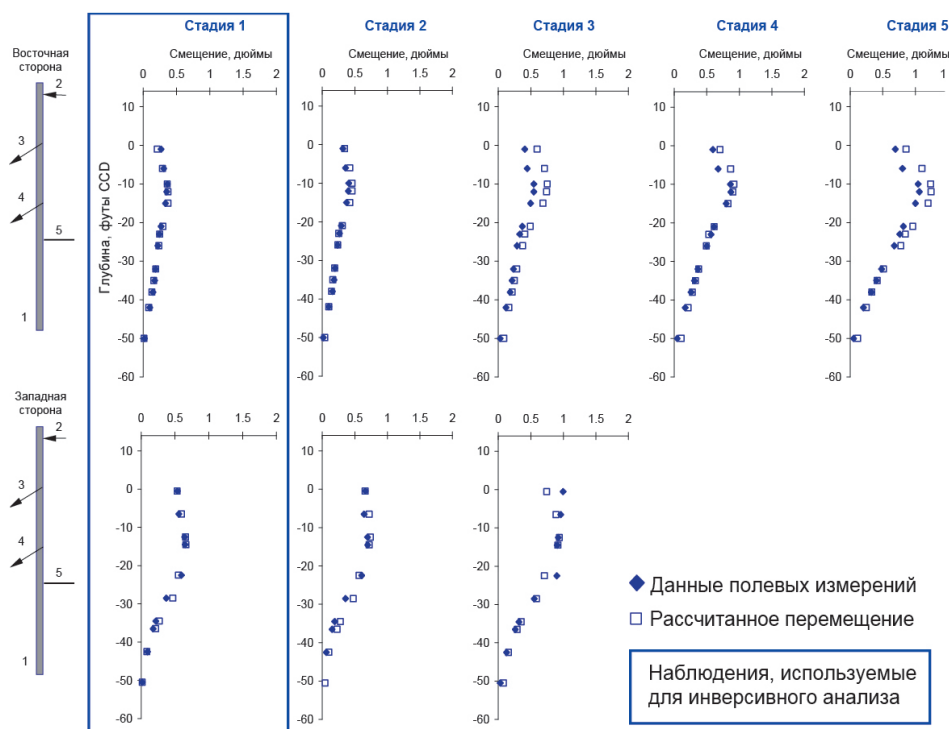


Рис. 4. Наблюдаемые и рассчитанные горизонтальные перемещения на основе оптимизации на стадии 1

Также выполнялся анализ при параметрах, перекалиброванных на каждой стадии до окончания строительства (стадия 5). На каждой новой стадии строительства данные инклинометра добавлялись к уже доступным наблюдениям. Результаты показывают, что различие между графиками на рис. 4 и величинами, откорректированными после каждой стадии, не значительно. С помощью инверсивного анализа, проведенного после первой стадии строительства, параметры модели перекалибровывались таким образом, что основная работа слоев грунта могла быть точно спрогнозирована для всего процесса строительства.

3.2. Применимость оптимизированных параметров в похожих геологических условиях

Для того, чтобы проиллюстрировать применимость оптимизированных параметров, которые обеспечили хорошую согласованность данных на рис. 4, к другим площадкам, где проводилась экскавация (с такими же

слоями грунта), на рис. 5 приводятся результаты численного моделирования данных оптимизированных параметров для условий на площадке Lurie (Finno & Roboski, 2005). Геологическое происхождение наиболее сжимаемых материалов на обеих площадках практически одинаково, но эти площадки расположены на расстоянии 2 км. Следовательно, необходимо ожидать некую изменчивость реальных параметров на каждой площадке.

Проводя сравнительный анализ слоев глины ниже уровня EL -5 м CCD для площадки Lurie (см. рис. 5), можно наблюдать относительную согласованность на стадиях 5, 6, при этом отмечается значительное расхождение на стадии 4. Скорее всего, это вызвано тем фактом, что используемая в данном исследовании модель H-S не учитывает значительное уменьшение жесткости при малых деформациях. Как обсуждалось ранее, нужно выбирать модули, которые представляют среднюю величину деформации в массиве грунта. Когда перемещения грунта незначительны, средние

модули должны быть больше в той модели, в которой не учитывается уменьшение модуля малых деформаций. Как отмечалось выше, соотношение между рассчитанной и наблюдаемой реакциями подходило для последующих этапов откопки, где боковые смещения были более значительными.

Схожее соотношение отмечалось при использовании таких же оптимизированных параметров при откопке во время выполнения работ для Ford Design Center (Blackburn & Finno, 2007). Как показано на рис. 6, результаты численного моделирования соответствовали тенденциям, полученным по данным наблюдений, но с большими величинами. Пара-

метры, используемые в анализе, основывались на больших деформациях, чем те, которые наблюдались на площадке Чикаго-Стейт, что приводило к более значительным деформациям, чем на площадке Ford Center. В любом случае, применение оптимизированных параметров, полученных на площадке Чикаго-Стейт, по отношению к площадкам Lurie и Ford, привело к разумной согласованности с наблюдаемыми боковыми перемещениями в рамках ограничений, накладываемых методом анализа. Использование инверсивных методик при анализе этих данных способствовало лучшему соответствию при незначительных изменениях параметров.

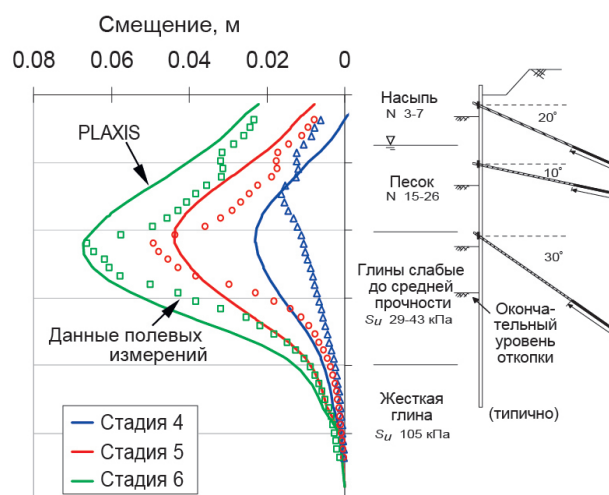


Рис. 5. Наблюдаемые и рассчитанные горизонтальные смещения: котлован Lurie

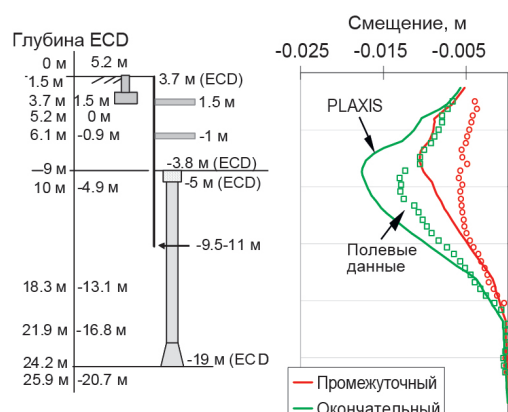


Рис. 6. Рассчитанные и наблюдаемые смещения для котлована Ford Center

4. ВЫВОДЫ

Была выполнена калибровка различных видов моделирования путем инверсивного анализа, которая подтвердила, что численная методика, разработанная для оптимизации конечно-элементной модели котлована, может быть очень эффективна для минимизации погрешностей между результатами расчета и измерений *in situ*. Тем не менее, совпадение инверсивного анализа с «оптимальным решением» (т.е. наилучшим соотношением между расчетными результатами и результатами наблюдений) вовсе не означает, что моделирование должным образом откорректировано. Геотехническая оценка оптимизированных параметров всегда должна удостоверять надежность применяемого решения. Для того чтобы модель считалась «надежно откалиброванной», соответствие между расчетными и наблюдаемыми результатами должно быть удовлетворительным (т.е. погрешность должна находиться в рамках желательной и/или приемлемой точности), и наиболее подходящие величины параметров модели должны быть логически обоснованными.

Список литературы

- Blackburn J.T. and Finno R.J. (2007). *Three-Dimensional Responses Observed in a Braced Excavation in Soft Clay*. J. Geot. Geoenviron. Engrg., ASCE, 133 (11), 1364–1373.
- Calvello M. (2002). *Inverse Analysis of a Supported Excavation through Chicago Glacial Clays*. PhD. thesis, Northwestern University.
- Finno R. *Evaluating Excavation Support Systems to Protect Adjacent Structures* (2010). DFI Journal, Deep Found. Inst, 4(2), 3–19.
- Finno R.J. and Blackburn J.T. (2005). *Automated monitoring of supported excavations*, Proc., 13th Great Lakes Geot. Geoenviron. Conf., GPP 3, ASCE, Milwaukee, WI., 1–12.
- Finno R.J., Bryson L.S. and Calvello M. (2002). *Performance of a stiff support system in soft clay*. J. Geot. Geoenviron. Engrg., ASCE, 128(8), 660–671.
- Finno R.J. and Calvello M. (2005). *Supported excavations: the observational method and inverse modeling*. J. Geot. Geoenviron. Engrg., ASCE, 131 (7).
- Finno R.J. and Langousis M. (2007). *Real Time Monitoring at the Olive 8 Excavation*. Proceedings, FMGM 2007, Int'l. Symp. on Field Meas. in Geomech., GSP 175, ASCE, Boston, September.
- Finno R.J. and Roboski J.F., (2005). *Three-dimensional Responses of a Tied-back Excavation through Clay*. J. Geot. Geoenviron. Engrg., ASCE, Vol. 131, No. 3, 273–282.
- Schanz T., Vermeer P.A., and Bonnier P.G. (1999). *The hardening soil model – Formulation and Verification*. Proc. Plaxis Symp.: Beyond 2000 in Comp. Geotechnics, Balkema, 281–296.