



Пьетро ЛУНАРДИ,
профессор

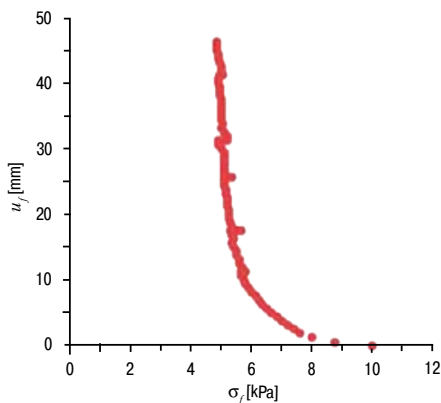


Рис. 28. Характеристическая кривая лба забоя, полученная на физическом макете

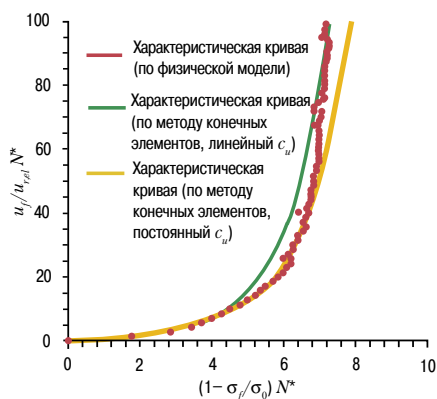


Рис. 29. Характеристические кривые лба забоя на плоскости $u_f/u_{f,el} N^* - (1 - \sigma_f/\sigma_0) N^*$

Памяти сэра Алана Муира Вуда

УПРАВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЕЙ ЭКСТРУЗИИ ЛБА ЗАБОЯ КАК СРЕДСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ТОННЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

Окончание. Начало в №№6, 8, 10, 11–13

Результаты экспериментов, проведенных на физическом макете в уменьшенном масштабе

Тесты на физическом макете в уменьшенном масштабе проводятся со следующими целями:

- проверить способность численной модели предсказывать поведение системы;
- подтвердить механизм развития экструзии, определенный численным моделированием и представленный на рис. 14 (см. «Подземные горизонты» №12);
- подтвердить правильность вида «материнской кривой», определенной по результатам численной модели и предсказать объем экструзии в зоне «лоб — ядро» забоя, а также определить операции, которые необходимо выполнить в этой зоне;
- подтвердить эффект закрепления лба забоя как функции от длины и интенсивности закрепления (предварительно определенный численным моделированием).

Для этой цели была сформулирована следующая программа экспериментов:

- первая серия — подстройка экспериментальных параметров (изменение скорости тестирования) для определения оптимальной скорости, при которой вязкое поведение материала перестает оказывать влияние на результат;
- вторая серия экспериментов с незакрепленным лбом забоя (изменение глубины заложения и степени уплотнения материала) и соответствующий численный анализ для подтверждения правильности результатов;

- третья серия экспериментов с закрепленным лбом забоя (изменение числа, положения и длины закрепления) и проведение численного анализа.

На рис. 27 показаны результаты одного из экспериментов в виде характеристических кривых лба забоя. Обратите внимание на эффект релаксации, определенный путем измерения изменения времени давления на лоб забоя при определенном виде движения. В соответствии с программой результаты эксперимента были смоделированы конечно-элементным анализом с учетом линейных изменений недренированно-го сцепления и модуля упругости. Зеленая характеристическая кривая, показанная на нормированной плоскости $u_f/u_{f,el} N^* - (1 - \sigma_f/\sigma_0) N^*$ (рис. 28) была получена в результате численного моделирования.

Нормализация экспериментальных данных и численные результаты были получены для недренированной связности, оцениваемой по оси тоннеля, а также определяемой через остаточное упругое смещение из начального наклона характеристической кривой на плоскости $u_f - \sigma_f$.

На рис. 28 красным цветом показаны результаты, полученные в эксперименте на физическом макете. Обратите внимание на существенное соответствие между численными и экспериментальными результатами: в частности, точки, полученные в конце фаз релаксации (точки А, В, С, D и E) почти полностью совпадают с кривой, полученной численным способом (зеленая кривая). На том же рисунке желтым цветом показана

«материнская кривая», полученная численным способом при постоянном значении c_u . Отметим и тот факт, что, несмотря на очевидное локальное влияние изменения c_u , на поле смещений грунта, глобальный ответ системы в виде характеристической кривой не проявляет значительных изменений.

Можно с определенностью утверждать, что результаты, полученные в экспериментах на физическом макете, обнадеживают; они показывают четко выраженное соответствие с результатами численного моделирования и с теми закономерностями, которые наблюдались в реальных условиях при строительстве целого ряда тоннелей в сложных напряженно-деформированных условиях. Можно также предположить, что «материнская характеристическая кривая» также подтверждается. Эти факты безусловно могут быть использованы на фазах диагноза и терапии этапа проектирования.

Результаты экспериментов на физическом макете в уменьшенном масштабе будут детально описаны в последующих публикациях.

Заключительные замечания

Как замечательно сказал великий философ Карл Поппер в своей интеллектуальной автобиографии, наука — это «неоконченный поиск». Этот поиск в науке и технологии начался в конце XVI века и непрерывно развивается вплоть до сегодняшнего дня, давая миру новые научные открытия и технологические достижения.

В области проектирования и строительства аксиома Поппера очевидно применима к созданию как подземных, так и наземных сооружений.

Говоря о создании подземных сооружений и о нашем вкладе в эту область, мы можем сказать, что нашей задачей (в которой мы, надеюсь, преуспели) было следование устремлениям двух отцов подземного строительства, а именно, Владислава фон Рабцевича («Тоннели нужно по возможности проходить полным сечением, хотя (сегодня) это не всегда можно сделать...»), (Rabcewicz, 1964) и Алана Маршалла Муир Вуда («Стратегия проекта должна быть подробно определена до того, как на его выполнение будут предоставлены основные ресурсы») (Muir Wood, 2002). Наша задача состояла в том, чтобы достичь тех целей, которые эти люди сформулировали до нас.

По этой причине я здесь рассказывал о том строго научном пути, которого придерживались я и мои уважаемые коллеги при создании технологии, получившей название «Анализа управляемых деформаций в пере-

секаемом массиве, то есть того способа проектирования и строительства подземных сооружений, который в последние десятилетия доказал свою универсальность при проходке как традиционным, так и механизированным способом в любых грунтах и при любых напряженно-деформированных условиях.

И действительно, начиная с того момента, как мы встретились с особыми деформационными явлениями во время строительства автотранспортного тоннеля Фреджюс:

1. Мы выделили явление экструзии ядра забоя, определив ее как самую важную составляющую Деформационного Ответа массива на действие проходки.

2. Мы провели углубленные теоретические и экспериментальные исследования в рамках анализа деформационного дтвета массива на действие проходки. Это позволило нам вполне определенно доказать, что явление экструзии зоны 'лоб-ядро' забоя непосредственным образом определяет следующую за ней конвергенцию выработки и, следовательно, устойчивость самой выработки.

3. Мы занимались изучением, внедрением и совершенствованием тех систем и операций, которые были нам необходимы для измерения упомянутого Деформационного Ответа и всех его компонентов, особенно компонента экструзии (которую мы определили как причину) и компонента конвергенции (которую мы определили как следствие в противоположность тому подходу, при котором конвергенция выдвигалась в центр исследования).

4. Мы продолжили наше исследование, сформулировав задачу управления выявленным деформационным ответом, и разработали, внедрили и усовершенствовали ряд операций и технологий, необходимых для управления явлением экструзии зоны лоб — ядро забоя, а также превратили само ядро в эффективный инструмент, обеспечивающий стабильность выработки в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Нам удалось показать, что если задача устойчивости тоннеля не может быть решена даже в зоне лба забоя (когда статическая задача является трехмерной вследствие присутствия зоны лоб — ядро забоя), то она тем более не может быть решена на удалении от лба забоя (где задача становится плоской)! На этом этапе мы показали, что успешное управление деформацией экструзии напрямую связано с выбором технологии проходки полным сечением при систематическом бетонировании обратного свода вблизи лба забоя или, проще говоря, с выбором «идеальной» поверхности экструзии.

5. Мы обобщили результаты наших исследований в сформулированном нами методе проектирования и строительства, который мы назвали «Анализ управляемых деформаций в пересекаемом массиве». Это название было выбрано исключительно для того, чтобы подчеркнуть тот строгий научный подход, на котором мы основывались при создании предложенной нами технологии.

6. Наконец, на основании опыта, полученного в результате применения метода «Анализа управляемых деформаций в пересекаемом массиве при строительстве более чем 1000 км тоннелей в различных рельефах и в самых разнообразных напряженно-деформированных условиях, мы наконец смогли продемонстрировать возможность проектирования и строительства тоннелей по образцу промышленного производства (то есть возможность оставаться в рамках тех затрат и тех сроков строительства, которые были определены в самом начале, еще до начала работ), гарантируя при этом ритмичность производственного процесса и исключительную безопасность строительных работ.

Я также хотел бы всем напомнить, что результаты применения численных и физических моделей, в которых для простоты было принято предположение об идеально связном массиве грунта в недренированных условиях, могут быть распространены также и на случай твердых пород, находящихся под большим давлением. В таких условиях их поведение, как мы видели при проходке тоннеля Фреджюс, очень похоже на поведение мягких грунтов типа глины.

В заключение я хотел бы заверить вас, что у меня нет намерения изменить образ мысли тех, кто в течение многих лет решал задачу проектирования тоннелей как двумерную или плоскую и кто использовал проходку уступом в качестве единственно приемлемого решения сложных геотехнических и геомеханических проблем. Тем не менее, я надеюсь, что новые поколения, вступающие в эту увлекательнейшую область деятельности, научатся применять в проектировании тоннелей такой подход, который — путем анализа управляемых деформаций в пересекаемом массиве обеспечит систематический выбор проходки полным сечением, в особенности при необходимости строить в сложных напряженно-деформированных условиях. Это была та надежда, которую мне высказал Владислав фон Рабцевич во время его посещения строительства тоннеля Гран Сассо (Италия) в начале 70-х гг. ■

EXTRUSION CONTROL OF THE GROUND CORE AT THE TUNNEL EXCAVATION FACE AS A STABILISATION INSTRUMENT FOR THE CAVITY

Previous chapter see in “Underground Horizons” #6,8, 10, 11–13

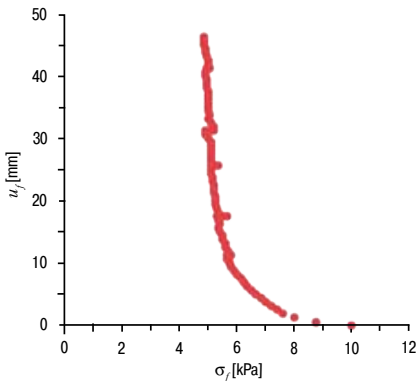


Fig. 29: Characteristic curve of the face obtained from a physical model test

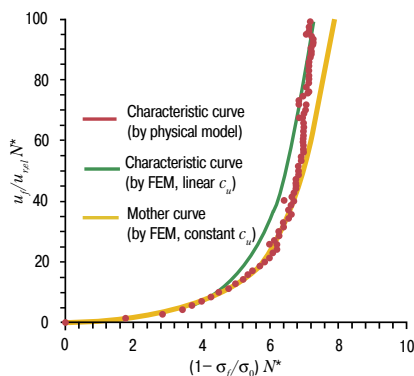


Fig. 30: Characteristic curves of the face in the normalized plane $u_f/u_{r,el} N^* - (1 - \sigma_f/\sigma_0) N^*$

5.3.1 Results of experiments on physical models in a reduced scale

The tests on physical models in a reduced scale serve the following purposes:

- verify the capacity of the numerical model to foresee the real behaviour of the system;
- confirm the evolutive mechanism of the extrusive phenomenon identified by the numerical modelling and represented in fig. 16;
- verify the validity of the “mother curve” identified by the results of the numerical model and to predict the importance of extrusive phenomena at the tunnel face as well as to assess the necessary reinforcement operations of the core-face;
- confirm the effect of core-face strengthening as a function of length and the intensity of reinforcement (previously underlined by the numerical modelling).

To this aim, the following program of tests was set up:

- a first series of experimental calibration tests (varying the test speed) to determine the optimal speed at which the viscous behaviour of material no-longer influences results;
- a second series of tests with a non-reinforced core-face (varying the overburden and the degree of consolidation of material) and corresponding numerical analyses to verify the conformity of results;
- a third series of tests with a reinforced core-face (varying the number, positioning and length of reinforcements) and numerical analyses.

The experimental calibration tests have just been completed during the preparation of the present text. Figure 29 reports the results of

one of these tests in terms of a characteristic curve of the face. Notice the effect of relaxation obtained by measuring, at a fixed movement, the variation in time of the pressure at the face. In conformity with what had been programmed, the experimental results were simulated by FEM analyses, taking into consideration a linear variation of undrained cohesion and Young’s modulus. The green characteristic curve shown on the normalised plane $u_f/u_{r,el} N^* - (1 - \sigma_f/\sigma_0) N^*$ in figure 30 was obtained from the numerical analysis.

Normalisation of experimental data and numerical results was carried out by using the undrained cohesion which was assessed at the axis of the tunnel and by defining the remaining elastic displacement from the initial inclination of the characteristic curve on the plane $u_f - \sigma_f$.

Figure 30 also shows in red the points corresponding to the results obtained from the experimental test on a physical model. Notice the substantial correspondence between the numerical results and the experimental results: in particular, the points obtained at the end of the relaxation phases (points A, B, C, D and E) coincide almost perfectly with the curve obtained numerically (green curve). The same figure presents in yellow the “mother curve” which was obtained by the numerical analyses with a constant c_u (fig. 18). Notice that, despite the fact that the field of ground displacements is quite influenced locally by the variation of c_u , the global response of the system in terms of characteristic curve doesn’t show significant variations.

Definitively, the results of the experimental tests on the physical model carried out so

far are encouraging, and show an excellent correspondence with the results of the numerical model and with what has been observed on the field when excavating many tunnels in complex stress-strain conditions. It also seems to confirm the validity of the “mother characteristic curve”. This can be used positively in order to define the diagnosis and therapy which must be prescribed during the design stage. Complete results regarding the tests on physical models in a reduced scale will be reported in a future publication.

6. Final remarks

As the great philosopher Karl Popper famously said in his Intellectual Biography, research is an “Unended Quest”. One that for science and technology began at the end of the XVI century and has developed more and more up to the discoveries and technologies of present day.

In the case of civil engineering, Popper’s axiom is clearly pertinent to modern underground and overground works alike.

In our case, speaking about underground works, we may say that we have tried (and hopefully succeeded) to follow the aspirations of two fathers of underground construction such were Ladislaus von Rabcewicz (“Tunnels should be driven full face whenever possible, although (today) this cannot always be done...”) (Rabcewicz, 1964) and Alan Marshall Muir Wood (“The strategy for a project needs therefore to be fashioned in considerable detail before major resources are committed”) (Muir Wood, 2002). It was our aim to meet the goals that they had set before us.

For this reason I have here recounted the rigorously scientific path which me and my esteemed collaborators followed in formulating the Analysis of Controlled Deformations in Rocks and Soils. A design and construction approach for underground works which in the last decades has proven to be universally valid, both conventionally and with TBM, in any sort of ground and stress-strain condition.

Indeed, starting from the particular deformation phenomenon which occurred during construction of the Frejus motorway tunnel:

1. We identified in the extrusive phenomenon of the core-face the most significant component of Deformation Response in the mass under excavation action;

2. we carried out in-depth theoretical and experimental research in terms of Deformation Response Analysis on the mass under excavation action. This allowed us to prove without a reasonable doubt that the extrusive phenomenon of the core-face is directly

responsible for the evolution of the following cavity convergence phenomena, and therefore of its stability;

3. we consequently studied, actualised and perfected the systems and instruments necessary to measure said Deformation Response and all of its components, especially the extrusive component (cause) and convergence (effect – which up to then had been the main focus of study);

4. we continued our Research in terms of Control of said Deformation Response and we identified, actualised and perfected the instruments and the technologies necessary to control the extrusion phenomenon of the core-face as well as to transform the core-face itself into an effective instrument for cavity stability in the short and long term. We were able to point out that: if tunnel stability problems can’t even be solved at the excavation face (where the static problem is three-dimensional due to the presence of the core-face), they certainly can’t be solved away from the face (where the problem becomes plane)! In this phase we highlighted how the success of extrusion deformation phenomena control is directly linked to the choice of full-face advancement with final invert systematically at the face or, more simply, to the choice of the “ideal extrusion” surface;

5. we finalised the results of our research into a design and construction approach which we called Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils. A name which was chosen exclusively for the manner in which it recalls the rigorously scientific approach that we used in formulating said approach;

6. finally, after applying the Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils

on over 1,000 km of tunnel in various types of terrain and in different stress-strain conditions, we were finally able to demonstrate that designing and constructing tunnels in accordance with industrial criteria (meaning in full compliance with the designed construction times and costs) is possible before construction begins, with the guarantee of regular production and exceptional safety for workers during construction.

I would also like to remind all that the results of the numerical and physical models – which for the sake of simplicity took into account the case of a purely cohesive ground in undrained conditions – can also be extended to the case of competent rocks under heavy overburden. Their behaviour, as we saw when excavating the Frejus tunnel, is quite similar to that of soft grounds such as clays.

In conclusion, I assure you that I don’t have the presumption of changing the minds of those that have been designing tunnel for years as a two-dimensional or plane problem, and have been using partitioning as the only solution for difficult geotechnical and geomechanical problems. However, I do hope that the new generations which are approaching this fascinating discipline learn to face tunnel design with an approach that – by analysing and controlling the deformation response of ground to the excavation action – may guarantee the systematic choice of full-face advancement above all in the case of difficult stress-strain situations. This was the aspiration that Ladislaus von Rabcewicz confided to me during a visit of his to the Gran Sasso tunnel construction site (Italy), in the early 70s. ■

