

循环荷载对串联式锚板抗拔性能影响数值分析

邹希全, 刘杰*, 马越, 欧志华

湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月3日; 发布日期: 2023年3月28日

摘要

锚板支挡结构是一种适用于填方边坡支挡的轻型支挡结构, 在锚板支挡结构的基础上又提出抗拔承载性能更优的串联式锚板支挡结构。本文通过FLAC^{3D}有限差分软件, 建立了串联式锚板数值分析模型, 基于完全非线性分析方法, 探究循环荷载对串联式锚板抗拔性能的影响。发现: 锚板能保持相对稳定时, 位移和循环次数之间的关系曲线可大致分为突变阶段、累积阶段和稳定阶段; 初始静力荷载增加锚板整体位移增大, 但初始静力荷载对突变阶段后的位移增长幅度影响较小, 而循环幅值增加两者均会增大; 应力水平相同时, 纯循环荷载作用下, 锚板位移比静力时大, 锚板在循环荷载作用下的承载力处于静力作用下的0.8与0.9倍之间, 循环荷载对锚板上部尤其是表面土体造成的扰动比静力荷载更大。

关键词

串联式锚板, 循环荷载, 抗拔性能, 数值分析

Numerical Analysis of the Effect of Cyclic Loading on the Pullout Resistance of Tandem Anchor Plates

Xiquan Zou, Jie Liu*, Yue Ma, Zhihua Ou

College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Mar. 3rd, 2023; published: Mar. 28th, 2023

Abstract

The anchor plate support structure is a kind of light support structure which is applicable to the fill slope support. On the basis of the anchor plate support structure, the tandem anchor plates

*通讯作者。

support structure with better pull-out bearing performance is proposed. In this paper, a numerical analysis model of tandem anchor plates is established by FLAC^{3D} finite difference software to investigate the effect of cyclic loading on the pullout resistance of tandem anchor plate based on a fully nonlinear analysis method. Findings: when the anchor plates can maintain relative stability, the relationship curve between the displacement and the number of cycles can be roughly divided into a sudden change phase, a cumulative phase and a stable phase; the initial static load increases the overall displacement of the anchor plates, but the initial static load has less effect on the magnitude of the displacement growth after the abrupt change phase, while the cyclic amplitude increases both; when the stress level is the same, the displacement of anchor plate is larger under pure cyclic load than under static force. The bearing capacity of anchor plates under cyclic load is between 0.8 and 0.9 times of that under static force, and the cyclic load causes more disturbance to the soil above the anchor plates especially on the surface than the static load.

Keywords

Tandem Anchor Plates, Cyclic Loading, Pull-Out Resistance, Numerical Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锚板支挡结构由肋桩、挡土板、拉杆、锚板及挡土板与锚定板之间的压实填土构成，常用在边坡挡土、桥台、港口护岸等工程中。它有构件断面小、构件可预制、结构质量轻、工程量少等优点，有利于实现结构轻型化和机械化施工。

在过去，人们对动力荷载作用下土体的变形展开了系统的研究，如文[1]使用等效线性方法计算土的动力响应和残余应变势，从而获得动力作用下坝体的最大截面永久变形等直线图。文[2] [3]构建了基于等效线性方法的计算模型，获得循环荷载作用结束后土的累积变形。但使用此类传统的等效线性方法，需要手动操作，只能获得循环结束后土的累积变形，而无法得到真正的累积变形发展过程。

国内外对静力荷载作用下锚板拉拔承载能力有较为详细的研究，但对锚板在循环荷载作用下的抗拔行为研究较少。文[4]介绍了黏土中板锚的低、高应力水平下模型试验结果，研究了循环荷载扰动下黏土中板锚的应变软化行为。文[5]进行了循环荷载作用下锚板拉拔的模型试验研究，探讨循环荷载周期、预加载对锚板位移的影响，进一步试验和研究中发现循环荷载作用下极限承载力比静承载力降低 12%。文[6]对水平循环荷载作用下伞式吸力锚的承载性能，发现最大塑性应变出现区域及该吸力锚主要承荷构件。文[7]对黏土中的平板锚进行了循环加载试验研究，发现循环荷载水平越大，锚越容易失稳，过大的平均位移是锚板失效破坏的主要原因。文[8]对砂土中的螺旋锚进行了循环上拔试验研究，发现双片锚的位移量小于单片锚以及螺旋锚的建议最小埋深。文[9]对鱼雷锚在静力及循环荷载作用下的承载特性展开了数值分析，探讨了拉拔角度和埋深等因素对鱼雷锚抗拔性能的影响。

串联式锚板结构是一种优化后的锚板挡土结构，它在一个拉杆上串联多个锚板，分散承担拉杆传递的土压力，进一步节省了材料、工程量以及空间。对于串联式锚板，在什么循环应力条件下能保持相对稳定？循环荷载对串联式锚板周围土体流动的影响与静力有何不同？本文使用 FLAC^{3D} 有限差分软件，基于完全非线性分析方法，探讨循环荷载作用下黏土中的方形串联式双锚板的抗拔行为。

2. 试验用料及最佳含水率测试

FLAC^{3D} 软件支持三维, 完全动态分析。其计算基于显式有限差分方法, 使用从周围区域的真实密度导出的集总网格点质量来求解完整的运动方程, 而不是使用用于静态求解的虚拟质量。该方法可以耦合到结构单元模型, 从而可以用于分析循环加载引起的土 - 结构相互作用。动态分析选项将软件的分析能力扩展到地震工程、循环加载等动态问题。

FLAC^{3D} 动态分析选项使用的完全非线性分析方法, 而不是岩土地震工程中常使用的等效线性方法, 可以直接提供不可逆位移等永久变化的信息。本文基于该软件动态分析模式和完全非线性分析方法, 对串联式锚板展开动力学研究。

2.1. 串联式锚板建立

计算中, 锚板和锚杆均使用建模便捷, 能模拟真实构件 - 土体相互作用关系的结构单元。循环加载试验所选取的研究对象为两块串联的方形锚板(靠近加载一端为前锚板), 使用 Shell 单元, 设置成抵抗弯曲和薄膜荷载的有限差分格式。锚杆采用 Cable 单元, 使用圆柱形锚杆, 将此单元各类提供摩擦选项赋值零, 通过软件节点对节点的方式, 在锚板和锚杆间建立固定约束。由此, 锚杆传递轴力, 前后两块锚板提供抗拔力的串联式锚板主体建立完成。具体取值如下表 1 所示。

Table 1. Tandem anchor plates parameter taking values

表 1. 串联式锚板参数取值

名称	钢锚板	钢锚杆
横截面积(cm ²)	/	2
厚度(cm)	5	/
重度(g/cm ³)	7.8	7.8
弹性模量(MPa)	2×10^5	2×10^5

2.2. 土体建立

土体使用摩尔库伦本构关系建立, 边界采用 FLAC^{3D} 常用的约束速度的方式, 将 Z 轴方向底面, X 和 Y 轴方向最外侧两面的轴向速度进行约束。网格划分为均匀正方形, 为串联式锚板拉拔充分提供空间, 同时保证精度, 取 X × Y × Z 轴方向长度 8 m × 3 m × 3.5 m, 总体节点数量为 90,396 个。参考粉质黏土参数, 如表 2 所示。

Table 2. Soil parameters taking values

表 2. 土体参数取值

弹性模量(MPa)	20
泊松比	0.3
黏聚力(KPa)	25
摩擦角(°)	20
重度(g/cm ³)	1.95

2.3. 静力加载模拟

逐级加载测定埋深 $H = 2B$, 板间距 $L = 4B$, 板边长 $B = 0.5\text{ m}$ 条件下的静力承载力, 如图 1 所示。

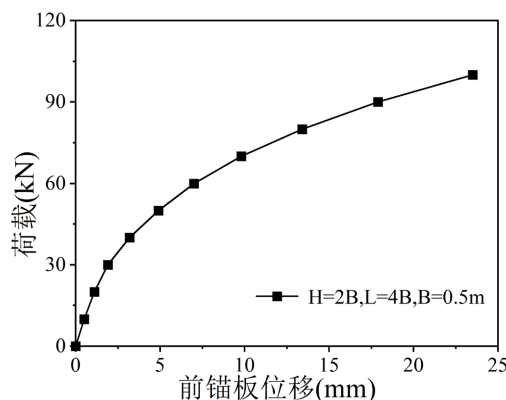


Figure 1. Load vs front anchor plate displacement curve

图 1. 荷载与前锚板位移关系曲线

从图 1 中可以看出静力荷载大小为 100 kN 时，锚板位移与上一级静载对应的位移差值较大，出现大变形破坏，取上一级荷载值 90 kN 为串联式锚板在此条件下的极限承载力 Q_f 。

2.4. 循环加载方式

本文探讨的是竖向锚板的水平抗拔，监测前锚板 X 轴方向的位移大小。为探讨循环荷载对串联式锚板拉拔性状的影响，使用软件自带的 Fish 语言编写循环荷载的函数，并将其施加在锚杆末端的节点上，施加方向为 X 轴正向，形式为半正弦函数，函数具体如下所示：

$$Q = Q_s + Q_c |\sin(\omega t)| \quad (1)$$

式中： Q_s 为初始静力荷载， Q_c 为循环加载的幅值， $\omega = 2\pi f$ ， f 为频率。

3. 结果分析

3.1. 关系曲线分析

观察锚板在循环荷载作用下位移与循环次数之间的关系曲线图发现：图中循环次数达到一定数量时，曲线过于密集，无法良好的观察，故下文均取如图 2 红色虚线所示，每次循环的位移最大值的近似值所连接成的曲线来替代说明。

因为加载的是单向半正弦函数，负荷载对锚杆造成压缩较小，可先探讨纯循环加载条件下，位移和循环次数的关系，图 2 和图 3 为其他条件同之前静力加载， $Q_s = 0$ kN， $Q_c = 40$ kN、50 kN、60 kN， $f = 5$ Hz 情况下的位移 - 循环次数关系曲线：

串联式锚板在循环荷载作用下位移不断增大，结合图 2 与图 3，将串联式锚板的位移与循环次数关系近似曲线拆分成如下三个阶段：

1) 突增阶段：形式接近于一段竖直直线，发生在第一次循环间，此时土体大部分还处于线弹性的范围内，荷载突然增大，锚板位移突然增加，前后两块锚板对板前方土体造成剧烈的挤压，最终位移达到一个较大的初始值的阶段。

2) 累积阶段：形式近似于一段斜向上的曲线，前一次循环，消耗了部分土体反力，虽然荷载从最高值降至最低值的过程中位移有些许下降，但土体的反力还未释放完全，就马上进行后一次加载，最终后一次循环的位移将前一次的基础上缓慢增加的阶段。

3) 稳定阶段：形式接近于水平的倾斜的直线，循环次数不断增加，位移累积达到一定程度，土体给锚板的反力已经近似于荷载大小，锚板位移随循环次数的增加而基本保持不变的阶段。

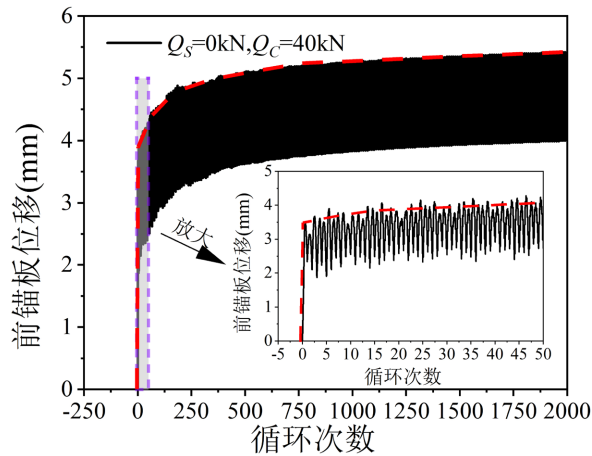


Figure 2. Front anchor plate displacement-cycle number relationship curve
图 2. 前锚板位移 - 循环次数关系曲线

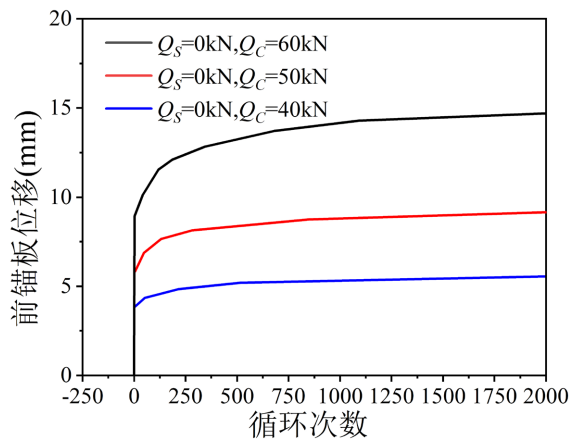


Figure 3. Approximate curve of displacement-cycle number relationship of front anchor plate
图 3. 前锚板位移 - 循环次数关系近似曲线图

将累积阶段与稳定阶段的分界线定义为临界循环次数与临界位移。同等应力水平下，纯循环加载稳定时的临界位移大于静力加载的位移，并且涨幅还在扩大，如表 3 所示。

Table 3. Comparison of results
表 3. 结果对比

Q_c 大小(kN)	40	50	60
静力位移(mm)	3.2	4.9	7.0
临界位移(mm)	5.0	8.3	13.8
涨幅(%)	56.3	69.4	97.1

3.2. Q_s 大小对锚板承载力的影响

为探讨初始静力荷载 Q_s 的影响，固定循环荷载幅值，改变静力荷载的大小，计算它们的关系曲线。图 4 为 $H = 2B$, $B = 0.5 \text{ m}$, $L = 4B$, $f = 5 \text{ Hz}$, $Q_c = 0.3 Q_f$ 条件下， Q_s 分别为 0.3、0.4、0.5、0.6 倍 Q_f 的循环次数与前锚板位移关系的近似曲线图。

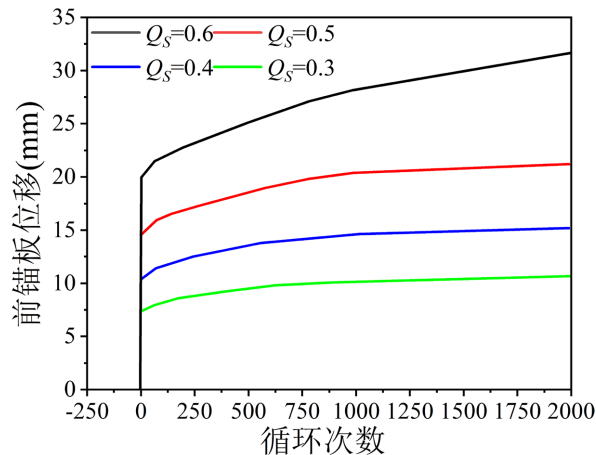


Figure 4. Approximate curve of displacement-cycle number relationship of front anchor plate
图 4. 前锚板位移 - 循环次数关系近似曲线

表 4 为 $Q_C = 0.3 Q_f$, Q_S 分别为 0.3、0.4、0.5、0.6 倍 Q_f 取值情况下的数值结果表, 最终值为第 2000 次循环的峰值位移。

Table 4. Numerical results

表 4. 数值结果

Q_S 取值(kN)	27	36	45	54
初始值(mm)	5.3	9.8	14.8	18.5
临界循环次数	600	850	940	/
临界位移(mm)	9.4	14.1	19.8	/
最终值(mm)	10.3	15.1	20.2	34.3

通过图 4 和表 4 可以看出, 固定循环荷载幅值, 在串联式锚板抗拔能保持稳定的情况下, 随着 Q_S 增加, 位移增加, 但初始值与临界位移或最终值之间的差值变化较小。静力荷载只改变循环荷载作用下串联式锚板整体位移的大小, 对突变阶段后的位移增涨幅度的影响非常微小。

3.3. Q_C 大小对锚板承载力的影响

为探讨循环荷载幅值 Q_C 的影响, 固定初始静力荷载, 改变循环幅值的大小, 计算它们的关系曲线。图 5 为 $H = 2 B$, $B = 0.5 \text{ m}$, $L = 4 B$, $f = 5 \text{ Hz}$, $Q_S = 0.3 Q_f$ 条件下, Q_S 分别为 0.3、0.4、0.5、0.6 倍 Q_f 的循环次数与前锚板位移关系的近似曲线图。

表 5 为 Q_C 分别为 0.3、0.4、0.5、0.6 倍 Q_f 取值情况下的数值结果表, 其中最终值为第 2000 次循环的峰值位移。

通过图 5 和表 5 可以看出, 固定初始静力荷载, 在串联式锚板抗拔能保持稳定的情况下, 随着 Q_C 增加, 锚板整体位移增加, 初始值与最终值之差随之增大, 进入稳定阶段的临界循环次数也越大。循环荷载幅值越大, 曲线越难保持稳定。

综合 2.2 和 2.3 节发现: 应力水平相同的情况下, 循环荷载幅值 Q_C 对突变阶段后位移的幅度提升大于静力荷载 Q_S ; Q_S 与 Q_C 之和增加到一定值时, 锚板已无法保持稳定, 这个值小于锚板在静力作用下的极限承载力, 处于 $0.8 Q_f$ 与 $0.9 Q_f$ 之间, 与文[5]的结果相吻合。

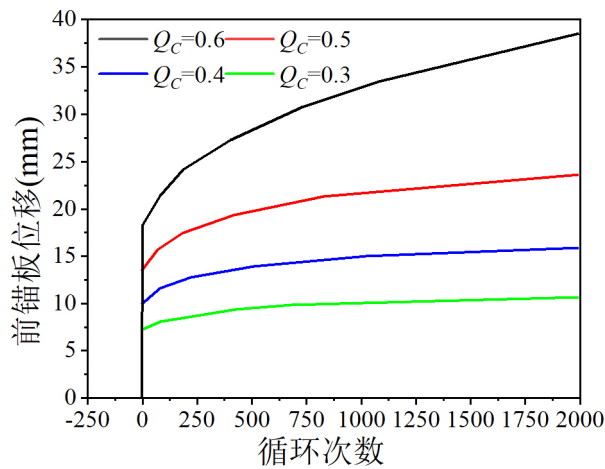


Figure 5. Approximate curve of displacement-cycle number relationship of front anchor plate
图 5. 前锚板位移 - 循环次数关系近似曲线

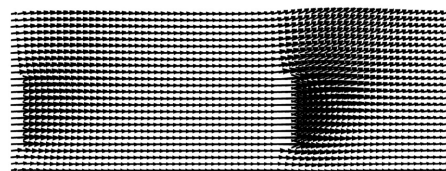
Table 5. Numerical results

表 5. 数值结果

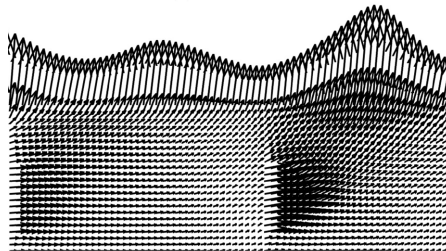
Q_c 取值(kN)	27	36	45	54
初始值(mm)	5.3	9.3	12.8	17.0
临界循环次数	600	730	830	/
临界位移(mm)	9.4	14.3	21.2	/
最终值(mm)	10.3	15.2	23.7	38.2

3.4. 循环荷载对土体流动的影响

为探讨循环荷载对串联式锚板周围土体流动机制的影响与静力荷载条件下有何不同，分别计算出静力荷载和循环荷载作用下的接近于极限状态的位移矢量。图 6 的图 6(a)和图 6(b)分别为静力和循环荷载的作用下， $H = 2B$ ， $B = 0.5\text{ m}$ ， $L = 4B$ ， $f = 5\text{ Hz}$ 情况下的位移矢量图。



(a) 静力加载



(b) 循环加载

Figure 6. Displacement vector
图 6. 位移矢量

图 6(a)静力荷载作用下, 土体流动延伸至坡顶面, 呈典型浅埋破坏的流动机制, 与文[10][11]结果相吻合。通过图 6 可以看出, 循环荷载作用下, 串联式锚板前方的土体流动情况与静力条件下大致相同, 但会对锚板上方尤其是表面的土体产生较大的影响。

4. 结论

课题组围绕提高传统单锚板结构抗拔性能这一理念, 提出了多方面性能均优于单锚板结构的串联式锚板结构。基于 FLAC^{3D} 有限差分软件的完全非线性分析方法, 建立了串联式方形双锚板于循环荷载作用下与黏土相互作用的数值模型。探讨循环荷载幅值、埋深等因素对串联式锚板抗拔能力的影响, 得出如下几条主要结论:

1) 应力水平相同时, 循环荷载作用下, 锚板的位移更大, 串联式锚板如能在循环荷载作用下保持相对稳定, 可将其位移与循环次数之间关系的近似曲线大致分成三个阶段, 即第一次循环时, 位移陡增的突变阶段; 位移缓慢增加的累积阶段; 位移无明显变化的稳定阶段。

2) 初始静力荷载对突变阶段后的位移增幅影响较小, 仅锚板整体位移的大小随着静力的增加而增加。循环荷载幅值不仅改变串联式锚板整体位移的大小, 还会影响突变阶段后位移的涨幅, 循环幅值越大, 整体位移及位移涨幅越大。

3) 循环荷载的应力水平达到一定值时, 串联式锚板无法保持稳定, 但研究发现这个值小于静力荷载作用下的极限承载力, 处于后者的 0.8~0.9 倍之间。

4) 循环荷载与静力对串联式锚板前方的土体造成的影响大致相同, 但循环荷载会对锚板上方尤其是表面土体造成更大扰动。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(NO: 51978260)。

参考文献

- [1] 刁志明, 马伟, 刘良军, 等. 金佛山混凝土面板堆石坝地震反应 3-D 分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(2): 285-289.
- [2] Bouckovalas, G., Whitman, R.V. and Marr, W.A. (1984) Permanent Displacement of Sand with Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical Engineering*, **110**, 1606-1623. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:11\(1606\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:11(1606))
- [3] François, S., Karg, C., Haegeman, W., et al. (2009) A Numerical Model for Foundation Settlements Due to Deformation Accumulation in Granular Soils under Repeated Small Amplitude Dynamic Loading. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **34**, 273-296. <https://doi.org/10.1002/nag.807>
- [4] Yu, L., Zhou, Q. and Liu, J. (2015) Experimental Study on the Stability of Plate Anchors in Clay under Cyclic Loading. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, **5**, 93-96. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.02.005>
- [5] Singh, S.P. and Ramaswamy, S.V. (2008) Influence of Frequency on the Behaviour of Plate Anchors Subjected to Cyclic Loading. *Marine Georesources & Geotechnology*, **26**, 36-50. <https://doi.org/10.1080/10641190801952410>
- [6] 盛腾飞, 刘红军, 刘灿. 循环荷载下饱和粉土中伞式吸力锚水平承载性能研究[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(1): 10-17. <https://doi.org/10.13984/j.cnki.cn37-1141.2023.01.002>
- [7] 于雷, 程星磊, 金长营. 软黏土中平板锚基础循环承载变形特性分析[J]. 工程勘察, 2022, 50(9): 33-38.
- [8] 郝冬雪, 陈榕, 袁驰, 等. 密砂中预埋螺旋锚循环上拔承载特性离心机试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2896-2904. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.1011>
- [9] 成思佳. 鱼雷锚在静荷载与循环荷载下的承载特性数值分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021. <https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2021.003328>
- [10] Merifield, R.S., Sloan, S.W. and Yu, H.S. (2001) Stability of Plate Anchors in Undrained Clay. *Geotechnique*, **51**, 141-153. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.2.141>
- [11] Yu, L., Liu, J., Kong, X.J., et al. (2011) Numerical Study on Plate Anchor Stability in Clay. *Géotechnique*, **61**, 235-246. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.071>