

G3 新型护壁液技术在软土钻孔灌注桩工程中的应用

——与膨润土泥浆护壁工艺的对比研究

Application of G3 New Type Fluid Wall Protection Technology in Soft Soil Bored Pile Project

——Comparative Study with Bentonite Slurry Wall Protection Technology

Jorge A. Capital-Mor¹, 傅玉龙², 欧阳甘霖³

1. 葡萄牙, 里斯本, 邮编: 1990-203, 2 & 3. 中国·青岛·青岛静力工程股份有限公司, 266071)

【摘要】在软土中施工大直径深长钻孔灌注桩, 其钻孔成形与稳定是施工中的关键要素。通过对G3新型护壁液的性能、使用技术的详细介绍, 并结合具体施工案例, 将G3新型护壁液施工工艺与常规膨润土泥浆护壁施工工艺进行了对比研究, 得出结论: G3新型护壁液比膨润土泥浆护壁工效提高显著、桩身完整性、单桩承载力均优于膨润土泥浆护壁施工的钻孔灌注桩、节约成本 $\geq 30\%$ 。

【关键词】钻孔灌注桩、G3 新型护壁液, 膨润土, 成本, 工期

【Abstract】During constructing large-diameter, deep and long bored piles in soft soil, the regularity and stability of the borehole shape are the key elements in the construction. Through the detailed introduction of the performance and application technology of G3 new type wall protection fluid, and combined with the specific construction case, the article makes a comparative study of G3 new type wall protection fluid construction technology and conventional bentonite slurry wall protection technology, and draws a conclusion: compared with bentonite slurry wall protection technology, G3 new type wall protection fluid has significantly improved the work efficiency, the pile integrity and the pile bearing capacity, all are better than the characteristic of Bentonite slurry wall protection construction, the cost saving is more than 30%.

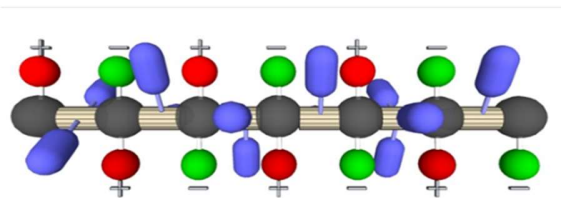
【Key Words】Bored pile, G3 new type wall protection fluid, Bentonite, Cost, Construction period

1. G3 新型护壁液性能

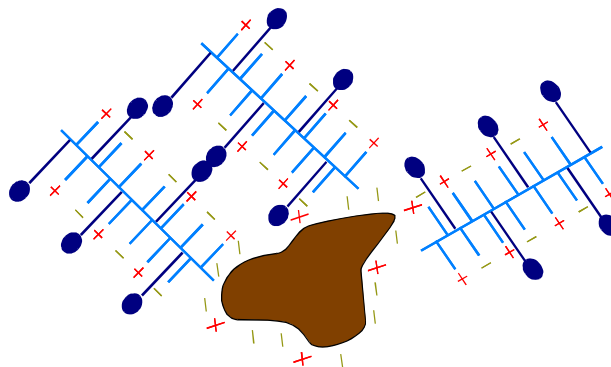
G3 新型护壁液由 3 种成份的聚合物（PolyMud、AlfaBond、MicroBond）组成，依据不同的现场情况调整配比，确定最符合现场的解决方案，应用于桩基、隧道等岩土工程的土壤稳定作业。

PolyMud 是长链碳分子聚合物制剂，是可生物降解的粒状聚合物，完全溶于水，与水以 1kg/m³ 比率混合，应用时以 pH 值为碱性时效果最佳。聚合物的电荷允许在连续介质中快速水合，并允许从水合的那一刻起快速构建 3D 矩阵，在这种情况下，液体可以在搅拌后几分钟内准备好以使用，交联链是通过分子碳链中的结合基团建立的，在下面的链状图中可以看到，这些独立的链条设计可以承受土壤的快速变化，由于土壤颗粒中存在高浓度的负电荷，聚合物交联链基体与土壤之间很容易通过正电荷发生相互作用。而且聚合物分子之间具备主动交联能力，使得溶液具备持久高粘度，API 马氏漏斗粘度测定值可达 60s 至 70s，对例如碳酸钙及镁、钙和氯等离子具有稳定耐受力。

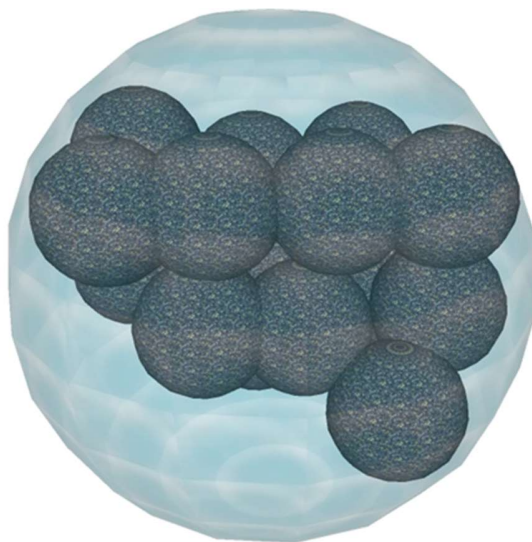
Unitary Chain



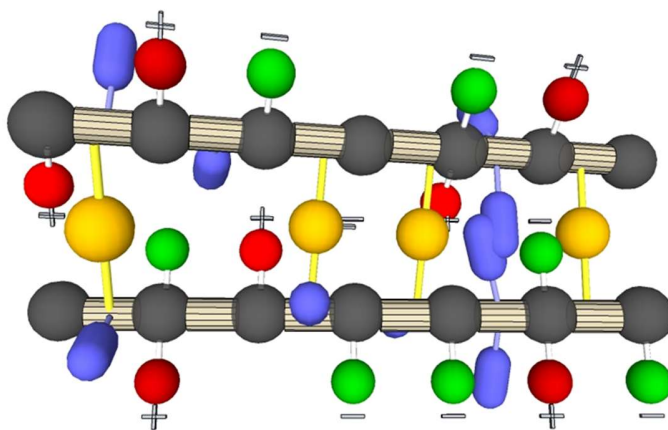
下图是包裹土壤颗粒的分子链的二维表示，通过这种形式，发展为开挖侧壁表面的保护膜，膜是一道屏障，并允许静水压力转移到开挖侧壁，这是对开挖桩孔或基坑稳定性的物理控制。



三维图像在更大的尺度上显示了相同的效果，在聚合物作用下，保护膜是不允许土壤破碎成小块的。Polymud 的这一特性在很大程度上有助于在混凝土和土壤之间产生更高的表面摩擦，使得桩承载力更高。

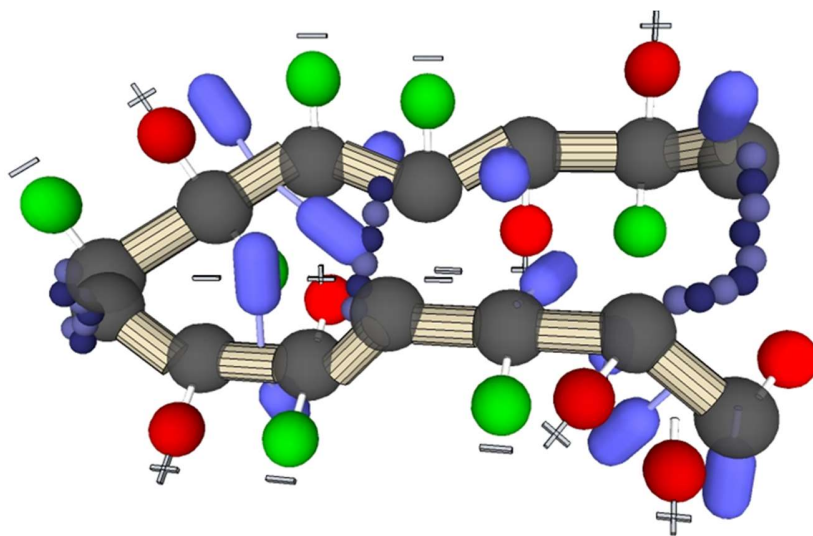


AlfaBond 也是一种液态聚合物，与 PolyMud 结合后，可促进聚合物三维分子链状体系与土壤颗粒的结合，桥接其链并收紧网络，使泥浆与土壤之间形成桥接，提高土壤的凝聚力从而稳定土壤，同时进一步提高浆液粘度，提高固体颗粒悬浮能力，促进浆液密度。



MicroBond 是一种液态聚合物，可以增强聚合物基质的阴离子和缔合基团，促进 PolyMud 和 AlfaBond 聚合物分子的“微结合”，使得聚合物水合后形成的三维分子链状体系更为稳定，着重应

用于复杂或不可预测土壤情况之下。同时，MicroBond 也是用后浆液清洁的催化剂，由于聚合物链将固体包裹成一束而发生固体沉降。这个质量现在比泥浆柱的其他部分重，使得悬浮岩屑颗粒更容易被携带分离。下面的 3D 图像显示了与聚泥链相互作用的微粘分子结构。



3 种聚合物共同组成 G3 新型护壁液，通过迅速形成聚合物与土壤、聚合物与聚合物的“交联”键，改善土壤断面和构造的颗粒间作用力和内聚性，来进一步促进岩土工程的实施。

2. 项目信息

Subang Jaya 位于马来西亚雪兰莪州，是一个与首都吉隆坡接壤的重要城市，该项目位于其中，作为商业和住宅以及购物中心的开发。项目包括实施 618 根桩，桩径从 750mm 到 1500mm，平均深度为 30 米。该项目预期在整个桩基施工期间均使用膨润土支护液。项目进行阶段，以膨润土为支护液，完成了 464 根桩。剩余的 154 根桩的实施采用 G3 系统支护液进行，桩径从 750mm 到 1500mm，最大深度为 35m，理论排除土方体积为 6188m³。



图 1——DaMen USJ 项目建设场地

项目地质情况描述如下：

- 0.0-5.0m ——红色硬质粘土和淤泥
- 5.0-20.0m ——松散的砂土和泥炭土
- 20.0-30.0m ——夹杂淤泥和砂子的黄色粘土
- 30.0-40.0m ——风化花岗岩

该项目现场配备了 7 台钻机和 6 台辅助起重机，用于膨润土泥浆施工。使用 G3 系统聚合物泥浆施工，只需 5 台钻机用于钻孔桩和 4 台辅助起重机。



图 2——导向套管定位



图 3——在套管深度内取土



图 4——开挖初期添加 PolyMud（G3 新型护壁液组分）



图 5——补偿液位增加静水压力



图 6——设置钢筋笼



图 7——护壁液回收泵定位



图 8——浇筑混凝土

2.1 施工

施工流程包括使用振动器将套管打入 20m，伴随膨润土泥浆向下挖掘至岩石顶部，然后使用特定的岩石取心工具穿透岩石。桩深完成后浇筑混凝土，并回收膨润土泥浆进行除砂，以施工下一根桩。混凝土工作的中断频率平均为 3.8 米。在项目开始时，指定了总桩数的 1%来测试特定桩的完整性，以确认桩基施工是否按照设计规范执行。

以膨润土泥浆作为支护液完成 464 根桩的工作流程中，平均超挖率为 58.5%，而混凝土超挖率控制目标是 20%以下；这期间，同时使用 7 台钻机和 6 台辅助起重机，并且完成该段工程耗时 213 天；每台钻机每天的平均桩产量为 0.311；由于保持低产量和高混凝土超挖量，对现阶段的合同执行非常不利。基础承包商在这个项目中遭受了严重的损失，急需帮助扭转这一局面。

GEO 与基础承包商签订合同，并根据现场情况和现实要求提出一套合理化解解决方案，使得项目关键指标得到有效提升，并以正利润率执行剩余桩基。GEO 在现场部署了一名工程师，帮助基础承包商在每个工作面逐步实施该系统。能用于剩余的桩基施工的只有 5 台钻机和 4 台辅助起重机。在 71 天内，基础承包商成功地完成了 154 根桩，混凝土超挖率为 11.5%，每台钻机每天平均施工

0.434 根桩。

在施工过程中，套管长度减少到 8 米，免除了除砂时间。对一些挖掘工具进行了略微调整，以适应提高钻进速度和减少切屑数量的功能。

由于采用了专有技术和 G3 新型护壁液产品，桩产量是原进度的 1.4 倍。

基础承包商对我们的服务感到非常满意。

表 1——设备使用和人员直接比较

泥浆类别	G3新型护壁液	膨润土泥浆
钻机数量（台）	5	7
辅助起重机（台）	4	6
机械操作员（人）	9	13
非专业工人（人）	13	17
领班（人）	2	4

2.2 工作质量

泥浆参数

对所有在聚合物作用下完成的桩都执行了严格的质量控制，在每根桩的混凝土浇筑前均须检查泥浆参数，这样做的目的是验证所有参数符合 GEO 提供的规范要求，并在不影响执行速度的情况下确保桩身的最大完整性。在荷载试验中，由于桩表面侧向摩阻力的发展和混凝土与土壤的粘结作用，泥浆的选择会影响桩的性能。灌注混凝土前应检查桩孔内泥浆参数，并应符合规定标准。

在混凝土浇筑前桩端泥浆参数是：

- API 马氏漏斗粘度计测定粘度>50s
- 密度<1.10g/cm³
- 含砂量<3%

G3 新型护壁液桩端浆液参数完全达到目标值。其中平均粘度为 52.1 秒（高于预先设定的 50 秒），平均密度为 1.06g /cm³（低于 1.10 g /cm³），平均含砂量为 1.19 %（低于 3 %）。

在开挖结束后不到 15 分钟即可完成所有这些工作，确认后应立即将钢筋笼固定到位。



图9——测试含砂量

桩身质量

下表为使用膨润土和 G3 新型护壁液的桩载荷和桩性能比较。

表2——使用G3新型护壁液和膨润土泥浆的桩基载荷测试比较

	桩载荷测试 BP127 (G3)	桩载荷测试 BP157 (膨润土)
载荷检测结果 2350 ton	2633 ton	2515 ton
性能比较	100%	74%

如表所示，使用G3新型护壁液护壁的灌注桩单桩承载力均值比膨润土泥浆护壁高出118ton，证明通过使用G3技术，可以实现单桩极限承载力较大提升。



图10——动态桩基载荷试验的执行



图11——采用G3系统施工后等待破除桩头的现场情况

桩身稳定性

在膨润土泥浆配合下的桩施工时，大多数桩的临时导向套管振动至地下 18m。但在进行岩石取芯时，经常发生过塌壁现象而影响钻岩取心的正常实施，这时候，不得不将套管延伸至 25m 及以上。这样一来工效降低和工期延长。

改用 G3 新型护壁液时，缩短临时导向套管为 8m。套管长度减小有助于改善土壤稳定性，因为套管振动对原状土扰动很大，增加了桩孔壁坍塌几率。G3 护壁液在钻孔中表现出良好的护壁稳定性和桩几何外形，超挖率仅为 11.5%。见表 3 超挖量对比。

表3——孔壁超挖率对比

平均混凝土超挖率 (G3 新型护壁液)	平均混凝土超挖率 (膨润土泥浆)
11.5%	58.5%

为了更好地理解G3新型护壁液与膨润土泥浆护壁施工的经济节约性，现将混凝土灌注用量对比于表4:

表4——154根桩的混凝土灌注用量对比

桩体积	应用 G3 新型护壁液	应用 膨润土泥浆护壁
理论值 (m³)	6188	6188
实际混凝土用量 (m³)	6900	9797
超挖量 (m³)	712	3609

实施154根桩的钻孔灌注桩最终总节省量为2897m³。按当时每立方米的预拌混凝土价值为250 RM（马来西亚林吉特，1RM约为1.64CNY），154桩，节省造价724,250 RM（折合人民币约1,187,770元）。

如果按照618根桩全部采用G3新型护壁液计算工程造价的节约可见下表5

表5——618根桩采用G3新型护壁液节省的混凝土量对比

桩体积	应用 G3 新型护壁液	应用 膨润土泥浆
理论混凝土用量 (m³)	24832	24832
实际混凝土用量 (m³)	27688	39359
超挖量 (m³)	2856	14527
混凝土成本 (250RM/m³)	6 922 000	9 839 750

节省的混凝土量为11,671m³。考虑到每立方米250RM的相同成本，它的节约总价值为2,917,750 RM（折合人民币4,785,110元）。 仅仅以混凝土的节约价值即证明了G3新型护壁液的合理性和优越性。



图12——使用G3新型护壁液取回的土壤呈干性状态

弃土外运

对于使用膨润土泥浆的情况，开挖出的土体受到泥浆严重污染而且并不干燥。通常现场清运弃土的卡车每辆装载6m³；膨润土在潮湿状态下仍有不低于35%的膨胀率。这意味着清除外运的弃土比挖出的土体多很多。而使用G3新型护壁液的情况下，弃土在相对干燥条件下运离场地，只需要少量卡车装载被开挖出的土壤。外运弃土对比如表7所示：

表7——施工154根桩弃土外运成本对比

描述	运土体积 (m³)	外运卡车数量 (辆次)	运费 (马来西亚林吉特)
使用 G3 新型护壁液	6900	1150	172, 500
使用膨润土泥浆	9797	1633	244, 925
节约	2897	483	72, 425

使用G3新型护壁液可节省弃土外运成本：72, 425RM（折合人民币118, 777元）

项目需求

表8——对于两种材料的设备投入成本对比

描述	G3 新型护壁液	膨润土泥浆护壁
钻机数量（台）	5	7
辅助起重机数量（台）	4	6
除砂器数量（台）	0	1
配料厂规模（ m³）	360	840
每月成本估算（RM）	140 000	200 000

表9——对于两种材料应用的人工成本对比

描述	G3 新型护壁液	膨润土泥浆
非专业工人（人）	13	17
钻机操作员（人）	5	7
起重机操作员（人）	4	6

领班（人）	2	4
每月成本估算（RM）	65 000	99 500

表10——618根桩的成本对比

描述	G3新型护壁液	膨润土泥浆
项目执行时间（月）	6.76	9.46
设备成本（RM）	949 740	1 891 293
人工成本（RM）	440 950	940 918
制浆材料（RM）	306 625	178 312
混凝土（RM）	6 922 000	9 839 750
弃土外运（RM）	692 240	982 881
总成本（RM）	9 331 555	13 833 154
使用G3新型护壁液节约成本$\geq$ 30%		

3. 结论

- 3.1 使用G3新型护壁液比膨润土泥浆护壁工效提高1.4倍。
- 3.2 工期从9.46个月减少至6.76个月。
- 3.3 使用短导向套管，桩稳定度 $\leq$ 11.5%。
- 3.4 节约混凝土费用逾2,910,000RM（折合人民币4,772,400元）。
- 3.5 桩身完整性、单桩承载力均优于膨润土泥浆护壁施工的钻孔灌注桩。
- 3.6 单桩的清洁工作时间从6小时减少到不到10分钟。
- 3.7 相对于使用膨润土泥浆护壁施工技术，节约成本 $\geq$ 30%，节省弃土外运成本显著。

4. 使用G3新型护壁液技术的其他优势

- 4.1 由于减少配料厂、除砂装置、混合装置，而节省了辅助设备的投入及相应使用费用。

4.2 在项目结束时不需要特别的泥浆处理。

4.3 G3 新型护壁液技术不产生大量泥浆所带来的环境污染，排除的弃土较少，故施工现场文明卫生。

作者：

Jorge A. Capital-Mor, 出生于 1971 年 8 月 8 日，男，葡萄牙人，具备工程物理学士和工商管理硕士学位，美国深基础研究院 DFI 会员（包括：DFI 欧洲分会执行委员会成员、DFI 钻孔桩委员会成员、DFI 地下连续墙委员会成员、DFI 可持续发展委员会成员），长期致力于岩土工程土壤稳定技术研究，现任 GEO 地质工程技术公司 CEO。GEO 地质工程技术公司总部设立于葡萄牙，是专业从事岩土地质工程和土壤稳定技术的研发型技术公司，是美国深基础研究院荣誉会员，G3 新型护壁液技术及系列产品是 GEO 开发的第 3 代基础施工土壤稳定解决方案，是 GEO 专利技术（专利号：EP08708143, EP07101175, EP07101188）。

联系电话：+351 919715411

邮箱：FUYULONG01@GMAIL.COM

地址：Alameda dos Oceanos, 41K, 22, 1990-203, Lisboa, Portugal

邮政编码：1990-203

【参考文献/References】

- [1] Performance of Bored Piles Constructed Using Polymer Fluids: Lessons from European Experience
Carlos Lam¹ and Stephan A. Jefferis²

- [2] Deep foundations : Study on effect of drilling fluids on concrete integrity
Sriram Ramakutty¹ Alberto Carmona Rosell²
- [3] CONCRETE OVERBREAK ESTIMATE AND ANALYSIS ERRORS IN BORED PILES
Nuno Cruz, DFI India
- [4] Production analysis comparison between bentonite and 3rd Generation polymer systems
Nuno Cruz, DFI Mexico
- [5] The Marsh Funnel and Drilling Fluid
Viscosity: A New Equation for Field Use
M.J. Pitt,* U. of Leeds
- [6] GEO' s G3® System allows to contain soil contamination, while drilling, using
stabilization slurry.
Jorge Capitão-Mor
- [7] Comparison Between axial capacity in bored piles using different drilling fluids
Gaurav Chauhan, Eonio Trindade, Jorge Capitão-Mor
- [8] ABNT NBR 6122 :2019
- [9] API Recommended practice for field testing water-based drilling fluids
- [10] API RP 13B2 Field testing for Oil based drilling fluids
- [11] PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES
(PG3)
- [12] EN 1997 Eurocode 7