

一题一议

行业标准《软土固化剂》中若干问题的思考

刘金龙, 杨佳峰, 蒋 焱, 武思宇, 宋德君

(北京中岩大地科技股份有限公司, 北京 100041)

摘 要: 软土固化剂是替代水泥, 用于固化以粘粒和粉粒为主的各种土的胶凝材料。由于土中多种成分参与固化剂的水化硬化反应, 固化剂的组成通常是按照土的物理化学性质、固化土的目标工程性能进行设计制备的; 因此导致固化剂材料组成以及固化土结构的形成和强度的发展与水泥和混凝土的有显著差别。基于对这些特点认识, 本文对行业标准《软土固化剂》中涉及的固化剂组成、适用土类、固化效果与质量评价、以及评价指标的获得方法等问题进行了探讨。

关键词: 软土固化剂; 固化土; 胶凝材料; 固化效果

中图分类号: TU521

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)01-0083-08

作者简介: 刘金龙(1990-), 男, 贵州遵义人, 硕士, 工程师, 主要从事土体固化剂及污染场地环境修复和治理的研究。E-mail: ljliong817@163.com。

Several issues in the industry standard of soft soil stabilizer

LIU Jin-long, YANG Jia-feng, JIANG Yi, WU Si-yu, SONG De-jun

(Zhongyan Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: The soft soil stabilizer is a cementitious material, consisting of clay and silt and used to solidify various soil. It is used instead of a cement in many applications. As various components of soil participate in the hydration and hardening reaction of the stabilizer, the composition of the stabilizer is usually designed according to the physical and chemical properties of the soil to be treated and the target engineering properties of the solidified soil. Therefore, the composition of stabilizer, the structure formation and the strength development of solidified soil are significantly different from that of cement and concrete. Based on the understanding of these characteristics, this paper discusses some issues involved in the industry standard of soft soil stabilizer, such as the stabilizer composition, suitable soil to be solidified with the stabilizer, evaluation of solidifying effect, quality and also the methods for obtaining evaluation indicators.

Key words: soft soil stabilizer; solidified soil; cementitious material; solidifying effect

0 引 言

软土固化技术是将固化剂与土均匀拌和, 经固化剂与土之间的物理和化学作用形成具有足够强度和稳定性的固化土, 广泛地应用于工业与民用建筑物、公路与铁路、港口码头的地基处理, 堤坝和深基坑围护的止水帷幕, 固化疏浚淤泥填筑场地, 地下洞穴和矿井采空区填筑, 以及污染土、工业废渣、河道淤泥、尾矿泥渣、建筑弃土的固化处理与应用等。除用于天然状态土体的原位固化技术外, 软土固化技术还应用于: (1) 采用流动态固化土, 通过浇筑方式用于场地填筑、浇筑固化土桩(地下墙)、地下洞穴填筑等领域; (2) 将固化剂与接近最佳含水率的土体拌合后, 通过摊铺并碾压用于填筑场地、地基垫层和场道基层, 通过填筑并夯实于地下桩孔中形成夯实固化土桩以及加压成型制作

固化土砖等。以拟固化土的性质分类, 除一般软土、淤泥、淤泥质土外, 还应用于固化高有机质土、盐渍土、污染土等^[1-19]。

长期以来软土固化使用的固化剂主要是借用胶结砂石形成混凝土的胶凝材料-水泥。由于土与砂石在化学性质、物理性质和组成结构等方面都有很大差别, 所以用水泥对土固化的技术效果常常不能得到满意的技术效果和经济效益, 因此近年来涌现出相当多的不同类型的软土固化剂。另一方面, 利用工业废渣可以制备高效固化剂, 所利用的工业废渣的种类及其制备的固化剂的品种也不断增长。此外软土固化技术的应用领域不断拓宽, 对固化剂的性能将不断提出新的要求; 例如: 大规模吹填淤泥填海造地和港口码头软土地基固化处理, 需要适

合高含水量、高含盐量、高孔隙比的超软淤泥固化的高强度固化剂；西部大开发遇到的超盐渍土地基的固化处理，需要具有耐盐蚀的固化剂；污染土处理需要具有固定污染物特性的固化剂；顺应固化领域的不断拓宽，具有各种特殊功能的固化剂也不断涌现。

由于不同场地或来源的土的物理性质，特别是化学性质可能差别极大，因此同一固化剂在不同场地的固化效果相差很大，不同固化剂有不同的土体适用范围。由于固化剂组成的复杂性和土源类型的多样性，给工程技术人员正确地判断固化剂的性能和质量、正确地选择和使用软土固化剂带来困难。这不仅影响工程的质量和安全性，也不利于高效固化剂的推广应用，特别是不利于利用工业废渣制备软土固化剂的开发与应用。因此需要有正确指导判定固化剂性能与质量、正确选择与应用固化剂的技术标准。另一方面，现有固化剂种类繁多，其成分有单一固定组成的，也有多组成复合的，其中相当数量的固化剂的组成含有各类工业废渣或副产品。因此，对于固化剂的固化效果以及固化剂生产质量的控制与评判需要有统一的技术标准。为解决上述问题，2018年10月30日住房和城乡建设部发布了中华人民共和国城镇建设行业标准《软土固化剂》（CJ/T 526-2018）。本文拟对该标准中涉及的一些问题进行讨论。

1 软土固化剂的组成和使用特点

水泥是人们接触最多的胶凝材料，长期以来对土进行固化也是采用水泥。似乎认为水泥胶结砂石构成混凝土与固化剂（水泥）胶结土构成固化土基于相同的机理。因此，对水泥的理解和对水泥相关标准的使用习惯被惯性地移植到固化剂。虽然软土固化剂可以看做用于固化土的特种水泥，但实际上，两者有着显著的差别。

水泥是按特定的材料组成，经高温煅烧后磨细形成的一种单一组分的胶凝材料。其主要用途是胶结惰性的砂石构成混凝土。在混凝土形成过程中，水泥仅是自身发生化学反应，形成胶凝物质粘接砂石，而不与砂石发生化学反应。也就是说，由于水泥的应用对象是惰性的特定材料，因此水泥的材料组成是固定、明确的；超出固定的材料组成范围必然影响其性能；因此，水泥产品标准通过控制水泥的材料组成就可以控制水泥的质量，通过对标准砂制作的水泥砂浆的性能检验就可以判定水泥的质

量。

而对于固化剂而言，拟固化的对象土通常是不可选择的。不同场地或不同来源的土的物理性质指标和化学性质指标可能相差很多，土中的部分成分，如黏土矿物、可溶盐、有机质以及酸碱离子等，将影响或参与固化剂的反应。例如：土中黏土矿物的阳离子交换、有机质以及 H^+ 的作用，大量的消耗 Ca^{2+} 、 OH^- 等离子，而这些离子恰恰是生成主要胶凝性水化物-水化硅酸钙的基本元素，土对 Ca^{2+} 、 OH^- 等离子的消耗可能会影响水化硅酸钙的生成或生成量^[20]；如果固化剂中有合适的物质也可以与土中的某些成分（例如：活性硅铝，氯、硫离子）反应形成具有胶凝性的水化物，因此有研究者提出了“以土中某些成分作为固化剂组成的一部分”的固化剂设计理念^[21]；此外，软土的结构与砂石不同，形成硬化体所要求的水化物也不尽相同，例如软土中含有大量孔隙，如果固化剂可以产生膨胀性的水化物，能够高效填充软土中孔隙，可以有效提高固化土强度^[22]。因此，固化剂的作用效果，即固化土硬化体结构的形成，是固化剂的组成材料与土共同参与反应的结果；由于拟固化对象土的物质组成和结构各不相同，所以固化剂的组成也必然要随之变化。固化剂应该是根据拟加固土的性质、工程对固化土的功能要求、当地可能获得的工业废渣资源，个性化地进行设计和制备^[20]；事实上，固化剂的设计本质上是固化土的设计，固化剂的效果必须由具体土的固化效果体现。软土固化剂通常也不再像水泥那样是材料组成明确，性能与使用对象性质无关的一种产品，而是根据拟固化对象土特性的不同，材料组分相应变化的一系列产品。正是固化剂和固化土与水泥和混凝土的这些重要的差别，导致固化剂的标准制定，在适用对象、材料组成、指标体系、指标获取等有诸多方面，与水泥标准制定有不同的考虑。

2 适用于固化处理的土类

该标准规定，固化剂适用于固化软土及其它细粒类土。该规定是借用现有岩土工程的土类划分。岩土领域现有标准划分土类的目的是可以根据土类别直接判定地基或土的工程性质；例如：软土是指在特定环境形成的、颗粒粒径在一定范围内的、具有特定结构、强度和变形等工程性质的天然土体。而该标准需要从土的化学性质及其与固化剂的反应能力，考虑作为原材料之一的土能否与固化

剂作用后共同形成具有目标性能的固化土。固化土的制备需完全破坏土的原始结构；软土固化剂已被用于多种目的、多种天然和非天然土源的固化；所以，固化对象土是否以天然状态出现、其原始的结构和工程性能如何，对判定固化剂固化该土的适用性并没有直接的关系。由于对土类划分的目的不同，划分依据的指标应该也不一样，仍套用对天然土体的工程分类判断固化剂的适用性实际上是不妥的。按理应从固化剂的适用性角度对适用土类给以定义，但为了避免给使用固化剂的岩土工程技术人员造成术语混乱，沿用了岩土工程土类划分的术语。

既然固化对象土的原始结构和工程性能对判定固化剂的适用性没有实际意义，则该标准对固化剂适用土类的规定的核心要求仅是：固化对象土必须具有足够的粘粒和粉粒含量。因此，固化剂适用对象包括天然土、扰动土、疏浚淤泥、建筑弃土等各种土源。该标准也没有对土的化学和矿物组成以及土的化学性质指标提出限制，因此，固化对象土也未排除高有机质土、盐渍土、尾矿泥土、工业废渣、污染土、焚烧灰渣等。因为该标准所述固化剂不是材料组分固定的一种固化剂产品，而是针对不同物理化学性质的土，分别设计的材料组成各不相同的一类固化剂产品。具体固化剂的材料组成已考虑了具体拟固化土的物理化学性质的影响。该标准对固化剂适用土类的判定，是根据具体固化剂与具体拟固化土配合制备的固化土的强度等指标判定。实际上，泥炭土等高有机质土、污染土、盐渍土、工业废渣等都有实际的固化工程实践^[1-19]。

3 关于固化剂

(1) 无论是市场上的固化剂商品命名还是学术刊物中所使用的术语，固化剂的名称使用非常杂乱，有同名指异物的，也有同物取异名的。使用固化剂这类名称的产品主要有两类。一类属于胶凝材料，与土料拌合后具备独立胶结土料使之提高强度的能力。该标准所述固化剂属于此类，对软土固化剂明确定义为无机水硬性胶凝材料。另一类所谓的固化剂并不是实际意义的固化剂，其中典型代表是1998年颁布的行业标准《土壤固化剂》(CJ/T 3073-1998)中所述的固化剂，这类所谓固化剂并不具有独立的胶结固化能力，只是改变土的吸附水状态；通常须与胶凝材料（道路工程中称之为稳定结合料）共同使用，且仅限应用于含

水量在最佳含水率附近的土料，并须结合碾压工艺方可发挥作用。土粒表面有吸附水膜，仅在压力作用下这吸附水膜不能去除减薄；该所谓土壤固化剂的作用实际上就是减少土的吸附水膜厚度，使土体可以压的更密实。如果将固化土与混凝土类比，则这种所谓的固化剂实际上只相当于制备混凝土使用的外加剂，而不是胶凝材料。因此在该标准的最新修改版中已经纠正了其错误命名，正式修改为《土壤固化外掺剂》。

(2) 固化剂与水泥不同，不是组分固定的一种产品，而是针对不同土的性质特点而设计的材料组成各不相同的一类产品。它可以是类似于水泥那样，由高温烧成的单一材料构成，也可以是多种材料组合构成，例如用水泥、矿渣、钢渣、粉煤灰等按一定比例混合而成。从现有资料可知：软土固化剂可以由如下材料类别的一种或多种组成：①硅酸盐水泥熟料和硅酸盐系列水泥、铝酸盐水泥熟料和铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥熟料和硫铝酸盐水泥这三大类水泥；②类似于生产水泥的方法，采用与水泥熟料原材料不同的组成经1000℃以上高温煅烧至熔融制得到的成品，或以此为主要成分配置而成的固化剂产品；③采用一定的材料和一定的制备方法，在1000℃以下低温煅烧得到的具有胶凝性的产品，以此为主要材料制备的固化剂产品；④含钙、硅、铝成分经高温熔融得到的具有潜在水硬性的工业废渣或副产品，如矿渣、高钙粉煤灰、磷渣、镍渣等多种熔炼渣，这类还在不断的开发出来；⑤人工或天然火山灰类物质，如硅灰、粉煤灰、流化床粉煤灰（含脱硫灰），以及（垃圾、污泥）焚烧灰、稻壳灰等等；⑥碱金属氧化物或氢氧化物、硫酸盐、铝酸盐等化学激发剂或调整材料。上述固化剂的组成中可能相当一部分是工业废渣。事实上，与其它利用工业废渣的技术相比，利用工业废渣制备软土固化剂有更多的优越性。例如，一些高碱、高硫、高氯的工业废渣难以利用于制备建筑材料，而这些“缺点”在制备软土固化剂时可能反而是优点；工业废渣的活性大多相对较低、反应较慢，而这对于软土固化剂而言也并不一定是缺点，因为在很多场合需要固化剂有较长的凝结时间，固化土并不要求早期强度^[20, 23-26]。

由此可见，试图像水泥产品标准那样，对固化剂的材料组成以及各组成的数量或比例做出规定是不现实。此外，该标准的一个重要的考虑就

是推动工业废渣在制备软土固化剂中的应用, 如果对材料组成给予严格的规定, 将会对工业废渣的利用形成严重阻碍。因为, 若固化剂含有标准未包括在内的材料则可能成为非法固化剂; 而若固化剂未包含标准列出的所有材料类别也可能成为非法固化剂。而在该标准的相关规定中, 不可能将所有可用的工业废渣材料以及对所有废渣的组合形式罗列完全。

如前所述, 固化剂的效果体现于它与土共同反应后的效果, 固化剂组成材料自身不能正确反映固化剂的效果或质量。因此该标准并没有对软土固化剂的材料组成给予限定, 而是采用以固化土的能否满足相应的工程性能要求和环境标准作为对固化剂产品质量的评价。

(3) 该标准根据提供方式把软土固化剂分为两类: 一类是软土固化剂产品(W类), 包含了固化剂的全部组成材料, 可以直接使用。而另一类则是半成品(C类), 仅包含了固化剂的部分组成材料, 不能单独使用, 必须与指定的材料和比例共同使用。之所以给出C类软土固化剂, 主要是为了有利于工业废渣的利用。有些软土固化剂中包含相当大比例的矿渣、粉煤灰等工业废渣或硅酸盐系列水泥等大宗低值的市售商品。当软土固化剂需要远途供应, 则可以仅运送软土固化剂的核心组分, 而就近采购大宗低值材料, 现场组配成完整的软土固化剂。此外, 一些含水工业废渣若利用其制备W类固化剂, 则需要脱水等工艺, 耗费能源; 如果在固化剂的使用现场, 将其直接与其它固化剂组分拌合使用, 可以减少这部分能耗。该标准针对这两种情况分别给出了固化剂的质量验收方法与标准。

(4) 固化剂通常有两种使用方式: 直接将固化剂粉体与土体拌合, 或将固化剂与水拌制成浆体后再与土体拌合。该标准将软土固化剂产品根据使用方式分为两类: 可与水拌合成浆体或以粉体状态使用的S类和仅以粉体状态使用的P类。其目的是有利于固化剂的组成设计, 可更好的利用不同组成材料的特点, 提高固化剂的性能; 此外也有利于固化剂的使用者正确地选择固化剂。

例如, 降低含水率、填充孔隙是提高固化土强度的主要途径。一些固化剂中含有的一些组分可以大量吸收水分, 同时体积膨胀, 但是通常这类组分反应速率很快, 例如生石灰、生石膏、以及一些可以生成钙矾石的组分。这类固化剂如果

以干粉形式使用, 其吸水膨胀的作用就可以很好地发挥; 但若以浆体使用, 则这些作用在拌制浆体时就已经消耗了; 不仅达不到应有效果, 可能在输浆过程中造成浆体过早凝结、堵塞管道。

而有些工法, 例如深层搅拌法, 需要以浆体形式使用固化剂。这类施工技术的成桩过程可能要一个小时甚至更长的时间, 特别是做止水墙, 需要相邻桩的搭接。如果固化剂的凝结时间较快, 则在搅拌桩施工过程中固化剂已经开始凝结, 将增大搅拌阻力; 造成搅拌桩成桩的时间、物耗和能耗的增加。这类工法就要求固化剂浆液凝结时间适当的延长, 要求固化剂浆体应具备足够的流动度和流动度保持时间。而一般工业废渣水化速率较慢, 正好可以利用其这一特点制备适合该用途的固化剂。考虑到: 固化土工程一般不需要固化土早期凝结, 且对早期强度要求不高, 而且凝结时间适当延长对固化土强度等工程性能无不良影响, 因此该标准对软土固化剂的凝结时间仅提出了初凝时间下限值和终凝时间的上限值, 也就是说对初凝和终凝的限制时间相对延长; 同时, 除规定了浆体初始流动度指标, 还规定了30 min流动度和60 min流动度的指标。

4 固化土强度的特点

软土固化剂组成设计是要针对土的化学性质因素、物理性质因素和土的结构以及固化目的具体调配材料组成。土参与固化剂的水硬化反应, 土的性质直接影响软土固化剂的作用结果。由于固化对象土性质的多样性、固化剂组成的多样性以及固化目的的多样性, 固化土强度的发展没有一定的规律。

表1所示为不同固化剂制备的固化土的无侧限抗压强度和无侧限抗压强度比(固化土无侧限抗压强度与水泥固化土无侧限抗压强度之比RS)的试验数据, 表2为试验土样的物理性质指标。其中:

(1) 固化剂掺入比: 试样1-x、3-x为10%, 11-x、13-x~16-x为15%; 水胶比: 0.6; (2) 固化剂由中岩大地科技股份有限公司提供; (3) 水泥1为河北燕新建材有限公司的钻牌42.5普通硅酸盐水泥, 水泥2为金聚猫牌P.S.A 32.5矿渣硅酸盐水泥, 水泥3为金聚猫牌P.S.A 42.5矿渣硅酸盐水泥, 水泥4为河北燕新建材有限公司的钻牌32.5复合硅酸盐水泥。

表 1 固化土强度试验数据
Table 1 Strength test data of stabilized soil

| 试样 编号 | 土样 编号 | 固化剂 编号 | 固化土强度/MPa 与 强度比/RS | | | | | | | |
|----------|----------|-----------|--------------------|------|------|----|-------|------|------|------|
| | | | 7 d | RS | 14 d | RS | 28 d | RS | 90 d | RS |
| 1-1 | | 水泥 1 | 1.60 | 1.00 | | | 2.79 | 1.00 | 3.50 | 1.00 |
| 1-2 | | ZYDD-A | 2.07 | 1.29 | | | 4.95 | 1.77 | 7.97 | 2.28 |
| 1-3 | | ZYDD-B | 2.59 | 1.62 | | | 7.36 | 2.64 | 6.56 | 1.87 |
| 1-4 | S-1 | ZYDD-C | 1.89 | 1.18 | | | 4.88 | 1.75 | 7.55 | 2.16 |
| 1-6 | | ZYDD-E | 1.23 | 0.77 | | | 2.99 | 1.07 | 4.11 | 1.17 |
| 1-7 | | ZYDD-F | 2.55 | 1.59 | | | 5.79 | 2.08 | 7.03 | 2.01 |
| 1-8 | | ZYDD-G | 1.95 | 1.22 | | | 5.02 | 1.80 | 5.67 | 1.62 |
| 1-10 | | ZYDD-I | 2.61 | 1.63 | | | 5.12 | 1.84 | 5.07 | 1.45 |
| 3-1 | | 水泥 1 | 1.53 | 1.00 | | | 2.56 | 1.00 | 3.63 | 1.00 |
| 3-2 | | ZYDD-A | 1.87 | 1.22 | | | 4.00 | 1.56 | 4.91 | 1.35 |
| 3-3 | | ZYDD-B | 2.33 | 1.52 | | | 4.13 | 1.61 | 4.49 | 1.24 |
| 3-4 | S-3 | ZYDD-C | 1.67 | 1.09 | | | 3.38 | 1.32 | 4.47 | 1.23 |
| 3-6 | | ZYDD-E | 0.96 | 0.63 | | | 1.70 | 0.66 | 2.15 | 0.59 |
| 3-7 | | ZYDD-F | 1.84 | 1.20 | | | 3.17 | 1.24 | 4.11 | 1.13 |
| 3-8 | | ZYDD-G | 1.29 | 0.84 | | | 2.36 | 0.92 | 2.94 | 0.81 |
| 3-10 | | ZYDD-I | 1.75 | 1.14 | | | 2.61 | 1.02 | 3.08 | 0.85 |
| 11-1 | | 水泥 2 | 1.32 | 1.00 | | | 3.16 | 1.00 | 4.75 | 1.00 |
| 11-2 | S-11 | 水泥 3 | 1.22 | 0.93 | | | 2.62 | 0.83 | 3.73 | 0.79 |
| 11-3 | | ZYDD-A | 3.04 | 2.30 | | | 5.14 | 1.63 | 7.00 | 1.47 |
| 11-4 | | ZYDD-C | 2.69 | 2.04 | | | 4.61 | 1.46 | 5.50 | 1.16 |
| 13-1 | | 水泥 4 | | | 2.67 | | 5.45 | | | |
| 13-2 | S-13 | 水泥 1 | | | 3.78 | | 5.87 | | | |
| 13-3 | | ZYDD-A | | | 4.32 | | 8.19 | | | |
| 13-4 | | ZYDD-C | | | 5.51 | | 6.66 | | | |
| 14-1 | | 水泥 4 | | | 7.03 | | 9.44 | | | |
| 14-2 | S-14 | 水泥 1 | | | 6.13 | | 7.28 | | | |
| 14-3 | | ZYDD-A | | | 6.29 | | 9.74 | | | |
| 14-4 | | ZYDD-C | | | 8.17 | | 10.17 | | | |
| 15-1 | | 水泥 4 | | | 3.95 | | 4.98 | | | |
| 15-2 | S-15 | 水泥 1 | | | 4.51 | | 6.11 | | | |
| 15-3 | | ZYDD-A | | | 3.44 | | 7.68 | | | |
| 15-4 | | ZYDD-C | | | 4.79 | | 5.93 | | | |
| 16-1 | | 水泥 4 | | | 2.15 | | 2.68 | | | |
| 16-2 | S-16 | 水泥 1 | | | 1.40 | | 1.43 | | | |
| 16-3 | | ZYDD-A | | | 1.93 | | 2.83 | | | |
| 16-4 | | ZYDD-C | | | 2.55 | | 3.91 | | | |

试验结果有如下现象:

(1) 同样的固化剂对不同土体的固化效果不同。一方面, 表现在无侧限抗压强度值上; 例如, 对于土样 S-1 和土样 S-3, 水泥固化土 90 d 无侧限抗压强度相近, 分别为 3.50 MPa 和

3.63 MPa; 而固化剂 ZYDD-A 的固化土强度分别为 7.97 MPa 和 4.91 MPa。而且各固化剂对不同土的固化土强度的排序也是不同的; 例如, 固化剂 ZYDD-B、ZYDD-C 在 S-1、S-3 中固化土强度的排序; 固化剂 ZYDD-A 和 ZYDD-C 固化其它土样的

表2 试验土样的物理性质指标
Table 2 Physical indexes of the experimental soil

| 区域 | 土样 代号 | 土样 名称 | 指标 | | | | |
|----|----------|----------|-----------------------------|------|-----------|------|------|
| | | | 重度 /(kN/m ³) | 比重 | 含水量 /% | 孔隙比 | 塑性指数 |
| 廊坊 | S-1 | 粉土 | 19.7 | 2.65 | 24.1 | 0.70 | 10.2 |
| 天津 | S-3 | 淤泥质粉质粘土 | 18.6 | 2.67 | 34.0 | 0.96 | 15.5 |
| 山西 | S-11 | 粉土 | 19.8 | 2.67 | 20.8 | 0.66 | 9.3 |
| 唐山 | S-13 | 砂质粉土 | 19.7 | 2.68 | 24.8 | 0.80 | 13.0 |
| 南京 | S-14 | 淤泥质粉质粘土 | 17.7 | 2.72 | 38.1 | 1.13 | 12.3 |
| 天津 | S-15 | 淤泥质粉质粘土 | 17.8 | 2.68 | 32.4 | 1.08 | 17.8 |
| 上海 | S-16 | 淤泥质粘土 | 17.0 | 2.72 | 45.0 | 1.47 | 14.6 |

固化土强度的排序也是在变化的。另一方面表现在无侧限抗压强度比上；例如：所有固化剂固化 S-1 的 90 d 无侧限抗压强度比都是大于 1 的，说明所有固化剂的固化效果比水泥的固化效果好；但是固化 S-3 时，ZYDD-E、ZYDD-G、ZYDD-I 三种固化剂的固化土无侧限抗压强度比均小于 1。

此现象表明，不能统一用一种标准土样与固化剂拌合制备固化土来考察固化剂的工程性能，只能用拟固化的土与固化剂拌合制备的固化土检验固化剂的性能与质量。基于同样理由，也不宜用砂浆而应用固化土来表征固化剂的工程性能。

(2) 水泥对不同土的固化效果的排序是不一样的。采用同厂家的 32.5 矿渣硅酸盐水泥和 42.5 矿渣硅酸盐水泥，固化土样 S-11，42.5 水泥的固化土强度小于 32.5 水泥的固化土强度。采用同厂家的 32.5 复合硅酸盐水泥和 42.5 普通硅酸盐水泥，对于土样 S-13，两者的固化土 28 d 强度相近；对于土样 S-15，42.5 水泥的固化土 28 d 强度明显高于 32.5 水泥的固化土 28 d 强度；而对于 S-14 和 S-16，42.5 水泥的固化土 28 d 强度反而明显小于 32.5 水泥的固化土 28 d 强度。32.5 和 42.5 水泥在砂浆中有明确和肯定的强度排序，但在不同土的固化土中的强度排序则没有一定的规律。对于同标号、同品种、甚至同品牌但不同来源的水泥，在固化不同土时的固化土强度也会有很大差别、甚至固化同一种土也可能有很大差别。文献^[4]数据显示：用不同品种或同品种但不同厂家的 42.5 水泥，固化同一土样，得到的固化土强度也相差很大（531~1107 kPa）。

由此可知，若以固化土无侧限抗压强度比 RS 作为固化剂性能和质量的判定标准，以不同水泥的固化土为基准，同一固化剂的固化土无侧限抗压强度比可能会有很大甚至相反的差别，这可能

影响对固化剂有效性或质量的判断。由(1)可知：对同一水泥，即使水泥固化土强度相近，不同固化剂固化不同土的固化土强度与水泥固化土强度也没有一定的、有规律可循的关系。所以采用固化土强度比作为评价固化剂效果和质量的方法不可取。

(3) 各固化剂的固化土强度发展规律是不一样的。例如：试件 1-6、1-9，28 d、90 d 无侧限抗压强度比大于 1，但 7 d 无侧限抗压强度比小于 1；试件 3-10，7 d、28 d 无侧限抗压强度比大于 1、90 d 无侧限抗压强度比小于 1；试件 14-3 比 14-1、试件 15-3 与 15-1 或 15-2 比、试件 16-3 与 16-1 比，虽然 28 d 固化土无侧限抗压强度比大于 1，但 14 d 固化土无侧限抗压强度比却小于 1。

5 关于固化剂的评价指标

该标准是产品标准，其关注对象是固化剂本身的性质。固化剂有不同的使用目的，不同的使用目的对固化土有不同的技术要求、需要不同的技术指标。例如：对深层地基的固化主要要求固化土强度，用于止水帷幕固化土墙则要求渗透性指标，对浅层加固的路基还要求水稳定性、抗干缩性等指标，固化污染土则需满足环境的指标要求。这其中的一些技术要求并不是对固化剂的共性要求。而且达到这些指标要求也不完全取决于固化剂本身，不是由固化剂自身性能单一因素决定的；拟固化土的状态、施工参数以及固化土使用方案都有重要影响。例如，固化盐渍土如果作为深层地基处理，它面对的是固化剂与盐的化学作用，选择合适的固化剂是可以满足固化土桩要求的强度和长期稳定性；但如果用于浅层路基，它面对的是盐胀、冻融的物理作用，固化盐渍土就不能胜任；此时混凝土也不一定能够胜任。同

样, 对于湿陷性土、膨胀土、冻土等作为固化土材料组成的一部分, 与固化剂拌合后都可以得到足够的强度, 但是否可以达到具体的工程目的所需的技术要求还取决于正确的应用方案。因此, 该标准只从检验固化剂本身效果和质量的角给出评判指标。至于在不同目的和不同工程的实际应用中, 对固化土强度及其它具体功能的要求, 不完全取决于固化剂本身的功能, 可在相关的技术标准提出。

该标准中, 涉及软土固化剂自身性质的物理指标和工作性的指标直接对软土固化剂进行测试; 涉及软土固化剂的工程性能的指标, 采用对固化土的性能测试。如前所述, 因土参与固化剂的反应, 不同土的性质不同; 所以评价固化剂的性能与质量一定要能够反映出与具体土反应的结果, 如果像水泥标准那样, 采用固化剂净浆, 或选取一种标准土样做固化土, 都不能反映出与具体土反应的实际效果。一些地方标准或企业标准采用固化土强度比的方法, 评价固化剂的效果。

如本文前述, 固化土强度比不能正确的评价固化剂的效果。另一方面使用软土固化剂替代水泥有不同的考虑: 一种考虑是提高固化效率, 现有软土固化剂的固化土强度已可以比水泥固化土强度提高数倍; 另一种考虑是在性能满足要求的前提下, 尽可能利用工业废渣、降低造价。相对于对固化土强度比, 固化土强度可以更直接的回应使用者的需求。

该标准规定以拟固化土样与固化剂制成固化土, 在土样含水率为液限含水率条件下, 以不同强度等级各龄期的固化土强度值评价固化剂的效果与质量。土样含水率对固化土强度有较大影响, 如果对土样含水率不加以限定, 则难以对比固化土的强度绝对值; 另一方面, 在一定的含水率范围内, 土样含水率的变化对固化土强度的影响是单向的, 不会因含水率变化导致固化剂作用效果从正向变为负向, 如果固化剂在固化液限含水率的土样有效, 则在实际应用中, 土样含水率变换只导致固化土强度有限的变化; 而且软土固化剂固化最主要的对象土的含水率大多处于液限含水率。

固化土强度随时间的增长没有统一的规律, 随土体的性质不同和软土固化剂材料组成的不同而有很大的差别; 不同使用目的对固化土技术要求不一定相同。例如: 当固化土用于路基工程

时, 通常以 7 d 强度作为技术指标; 而用于地基处理时, 则以固化土的 90 d 强度作为技术指标。此外, 在实际使用中技术人员需要知道固化土的强度发展规律, 以便合理地选择和使用软土固化剂。因此该标准相应地规定了早强型和普通型、不同强度等级的固化剂的强度指标, 并分别对设计要求 7 d、28 d、90 d 强度的情况作出相应规定。

固化土使用环境的土与地下水中 pH 值、盐离子等因素可能影响固化土长期稳定性, 不同材料组成的固化剂在同一使用环境的土与地下水中的效果也可能不同, 需要掌握固化土长期稳定性。固化土的长期稳定性的概念与混凝土耐久性的概念不同。例如: 对于固化土, 土中盐是作为反应物之一与软土固化剂各组分一同参与形成水化物的反应(也可以说在软土固化剂设计时将土中盐作为软土固化剂组成的一部分), 其作用可能改变水化产物或水化产物的形成过程, 其作用时间主要为软土固化剂水化硬化过程; 而对于混凝土, 盐是与水泥水化反应的产物再进行反应, 其作用是使混凝土硬化体中的水化产物生成新的物质, 或导致混凝土丧失胶结性, 或破坏混凝土结构; 其作用时间是在混凝土硬化、形成密实结构之后。另一方面, 固化土中的孔隙量远大于混凝土, 其渗透性与混凝土相比要高几个数量级; 所以混凝土的腐蚀过程相对较长, 而环境盐分与固化土内水化物的反应相对迅速。从已有试验数据来看, 180 d 的试验周期基本可以反映固化土在盐渍土中的长期稳定性, 尚未发现 90 d 之内强度发展良好而之后强度开始下降的报道。因此, 该标准规定: 软土固化剂的固化土除应满足前述固化土强度和强度比的要求外, 还应提供固化土在与使用环境地下水相同水溶液中浸泡至 7 d、28 d、90 d、180 d 龄期的无侧限抗压强度, 且随龄期增长固化土强度不可有下降趋势。

6 结 论

软土固化剂是替代水泥用于固化以粘粒和粉粒为主的各种土的胶凝材料。由于土中多种成分参与固化剂的水化硬化反应, 固化剂的组成通常是依据拟固化土的物理化学性质、对固化土的工程性能要求进行设计制备的; 固化土结构的形成和强度的发展是土与固化剂共同作用的结果。因此单独的从土的性质指标或单独从固化剂的组成

或强度指标都不可能固化剂的适用性、效果和质量给予正确的评价。该标准是将拟固化土与固化剂的反应结果-固化土强度作为固化剂效果与质量的评价指标；针对不同使用目的对固化土的不同性能要求，分别给出早强型和普通型固化剂各龄期固化土强度要求；根据固化土结构形成过程及其后与环境作用的特点，提出了固化土长期稳定性的评判方法；针对固化剂有干粉和浆体两种使用方式，相应地将固化剂分为以浆体形式使用和以干粉形式使用的两类产品，以利于充分发挥固化剂中相应组分的效用、更好地满足不同的工艺要求；为了促进工业废渣的利用，固化剂除可以包括全部组分的固化剂产品提供外，还可以以仅包括部分核心材料组成的半成品方式提供。

参考文献：

- [1] 黄新, 等. 工业废石膏加固软土地基的试验研究[R]. 北京: 冶金部建筑研究总院, 1995.
- [2] 周永祥, 阎培渝. 用于盐渍土的土壤固化剂的性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2007, (8): 94-95.
- [3] 邓晓轩. 高含盐量盐渍土固化研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.
- [4] 周琦, 邓安, 韩文峰, 等. 固化滨海盐渍土耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1129-1132.
- [5] 薛俊良. 盐渍土改性作高速公路路基填料的试验研究[J]. 路基工程, 2006, (5): 27-29.
- [6] 周旻, 侯浩波, 李志威. 疏浚淤泥固化改性的工程特性[J]. 工业建筑, 2006, 36(7): 35-37.
- [7] 张大捷, 田晓峰, 侯浩波, 等. 稳定过湿土作路基填料的试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(7): 38-40.
- [8] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(10): 1561-1565.
- [9] 曹玉鹏, 卞夏, 邓永锋. 高含水率疏浚淤泥新型复合固化材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 321-326.
- [10] 武博然, 柴晓利. 疏浚底泥固化改性与资源化利用技术[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 335-342.
- [11] 张大捷, 张发文, 孙琪, 等. HAS 固化剂的尾砂固化性能[J]. 金属矿山, 2009(4): 165-167.
- [12] 纪宪坤, 周永祥, 杨建辉, 等. 铁尾矿全尾砂胶结充填固化剂及工程应用[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(4): 30-33.
- [13] 张大捷, 侯浩波, 贺杏华, 等. 碱矿渣胶凝材料固化重金属污泥的研究[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(4): 44-46.
- [14] 侯浩波, 周旻, 汪韦兴, 等. 重金属污染土壤修复材料的开发与应用[C]// 中国硅酸盐学会固废分会成立大会固废处理与生态环境材料学术交流会. 2015.
- [15] 苏良湖, 梁美生, 赵由才. 不同固化剂对底泥重金属稳定化效果的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(7): 1655-1658.
- [16] 侯浩波, 刘柳, 周旻, 等. 河道底泥重金属浸出毒性分析及其固化/稳定化效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3339-3344.
- [17] 涂洁, 侯浩波. HAS 土壤固化剂对电镀污泥处理效果的研究[J]. 环境工程, 2003, 21(4): 44-47.
- [18] 包建平, 朱伟, 汪顺才, 等. 固化对淤泥中重金属的稳定化效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 24-28.
- [19] 陈晓飞. 有色冶金污泥的稳定化/固化处理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [20] 宁建国. 软土固化剂优化设计原理与方法[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
- [21] 程寅. 矿渣固化氯盐渍土中水化物组成及形成过程对强度的影响研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.
- [22] 于浩. 膨胀性水化物与胶结性水化物相对生成速率对固化土结构与强度的影响[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.
- [23] 宁建国, 黄新, 利用工业废渣配制水泥系软土固化剂探讨[J]. 工业建筑, 2005, 35(S1): 432-437+536.
- [24] 易耀林, 李晨, 孙川, 等. 碱激发矿粉固化连云港软土试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1820-1826.
- [25] 沈建生. 新型固化剂的研制及在软土加固中的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [26] 黄绪泉, 侯浩波, 周旻, 等. 钢渣-矿渣-氟石膏基胶结材固结铜尾矿性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(1): 138-142.