适用深水条件的水泥搅拌桩室内配合比试验方法

高瑞敏
（中交一航局第一工程有限公司）

摘　要：深层水泥搅拌法（DCM）是一种高效且环保的地基加固技术，在深水软基处理中表现出明显优势。为提升深水环境下 DCM 施工参数的合理性并保障加固效果，开展室内配合比试验是必不可少的先决步骤。以某大型跨海通道工程的软土地基加固为实际背景，针对深水条件进行了水泥搅拌桩室内配合比试验。通过采集现场土样，设置不同水泥掺量、养护龄期，制备了相应水泥土试样，并测试了其无侧限抗压强度。结果表明，水泥掺量对强度增长的影响最为突出。研究采用的试验方法便于操作、重复性良好，且贴近实际工程，有助于促进 DCM 在深水区域的规范化应用，研究成果可为类似工程的设计与施工提供参考。

关键词：深层水泥搅拌法；室内配合比试验；无侧限抗压强度；水泥掺量；水灰比

0　引言

深层水泥搅拌法（DCM）是国内近些年引入的软土地基处理技术，凭借其在施工效率以及经济性上的优势，已在工程实践中得到普遍应用。DCM 桩体的成型质量很大程度上受原状土特性制约[1]，为此，施工前通常需要通过室内配合比试验验证该技术的可行性并确定关键施工参数。在室内试验方法方面，刘志军等[2]系统归纳了试模选用、配合比搅拌、振捣与养护等环节的技术要点；陈中学等[3]、宫必宁等[4]探讨了水泥标号、掺量、养护龄期及土质差异对水泥土无侧限抗压强度的作用规律；贺迎喜等[5]则结合香港地区软土，开展了水泥加固的室内配比试验，并对现场 DCM 处理效果进行了评估。

强度是衡量水泥土性能的核心指标，相关预测模型研究一直受到广泛关注。学者们通过构建数学模型，试图揭示强度与各影响因素之间的定量关系。储诚富等[6]提出了基于似水灰比的强度预测方法；曹智国等[7]则在 Lorenzo 等[8]、Consoli 等[9]的研究基础上，进一步纳入龄期变量，建立了综合参数 PCT。然而，由于土体存在显著的各向异性，且现有模型通常参数较多、计算复杂，导致其在实际工程中的应用范围受到一定限制。

室内配合比试验是 DCM 实施前的重要环节，旨在通过模拟现场土体条件，研究水泥土在不同配比下的强度发展规律，为现场施工提供理论依据。目前，国内外学者针对 DCM 室内试验开展了较多研究，但多集中于陆上或浅水条件，针对深水、高含水率、高有机质含量的软土系统的经验缺乏，无法实际指导实际工程。因此，开展适用于深水条件的室内配合比试验方法研究，具有重要的工程意义与学术价值。

1　工程概况

深中通道跨海通道工程的 E1—E5 及 E14—E20 管节下部地基软土层较厚，设计采用深层水泥搅拌法（简称 DCM）进行地基加固，DCM 桩采用单桩形式布设，桩径为 1.3 m，桩间搭接 0.3 m。每 4 根桩组合成簇，簇径为 2.3 m。纵向桩间距统一为 3 m，横向间距则根据上部荷载大小分别设置为 3 m、4 m、5 m 共 3 种规格。置换率分为 38.7%、40%、47%三种，根据区域设计荷载大小，对桩体强度要求分为 1.6 MPa 和 1.2 MPa 两种，其中 E1 管节底部及两侧回填区桩体强度要求为 1.6 MPa，其余管节底部为 1.2 MPa。设计要求桩底打入标贯大于 30 击的全风化岩层，施工桩底标高从−26.86~−37.7 m 不等，顶标高范围−12.93~−27.84 m，总处理地基方量 74 万 m^3。处理区域如图 1 所示。

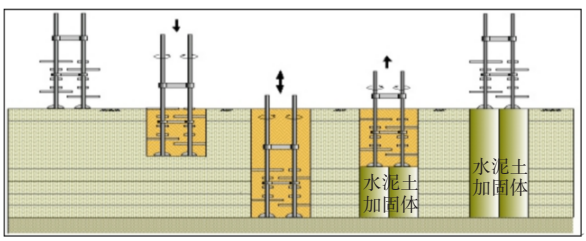


图 1　沉管隧道 DCM 处理区域示意图

2　试验方法研究

鉴于多种关键因素直接影响深层水泥搅拌法的现场施工质量，通常在施工前需通过室内配合比试验，以确定适宜的水灰比参数。本试验对项目进行现场取土，拟针对附近口岸岛附近土体开展室内配合比试验。

2.1　原状土物理指标

深中通道西人工岛斜坡段为软土层最厚的区域，是整个 DCM 地基处理的重点；根据地质勘察报告显示，软土层从上到下可分为流泥层、淤泥层、淤泥质土层以及粉质黏土层。取土位置选在沉管隧道斜坡段位置，防撞回填区北侧，距离工程桩施工边缘 10 m 位置。取土孔共 9 孔，为了便于室内配合比试验结果与现场试桩结果的对比，取土区域与后期试桩位置保持一致，如图 2 所示。

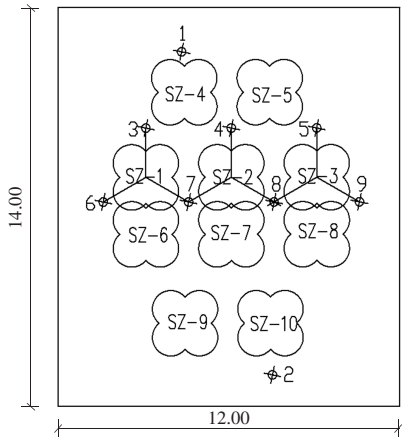


图 2　试桩土区域示意图（m）

对现场取土进行室内土工试验，测定原状土的含水率、湿密度、干密度、相对密度、孔隙比、饱和度、液限、塑限等物理参数指标，见表 1。

表 1　试验土层主要物理参数

土样名称	含水率 ω /%	土粒相对密度 G_s	湿密度 ρ/(g·cm^{-3})	干密度 ρ_d/(g·cm^{-3})	饱和度 S_r/%	孔隙比 e	液限 ω_L/%	塑限 ω_P/%	塑性指数 I_P
流泥	95.2	2.8	1.5	0.8	98.7	2.7	53.1	28.5	24.7
淤泥	65.0	2.8	1.6	1.0	99.1	1.8	46.5	25.9	20.6
淤泥质土	38.4	2.7	1.8	1.3	98.9	1.1	33.9	18.1	15.7
粉质黏土	29.3	2.8	2.0	1.3	98.9	0.8	44.5	24.2	20.3

2.2　试验方法

试验土样均采集自工程现场，取样后随即进行密封处理，运输过程中未考虑水分变化的影响。针对现场难以直接采集的流泥，试验中采用表层淤泥添加适量水进行配制以模拟实际土性。为贴近实际施工工况，先将水泥与水搅拌形成均匀水泥浆，再将其与土样充分拌和。整个试验过程，包括制样、成型、拆模养护及无侧限抗压强度测试，均严格按照 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》相关标准执行，配合比试验流程[1,10]见图 3。

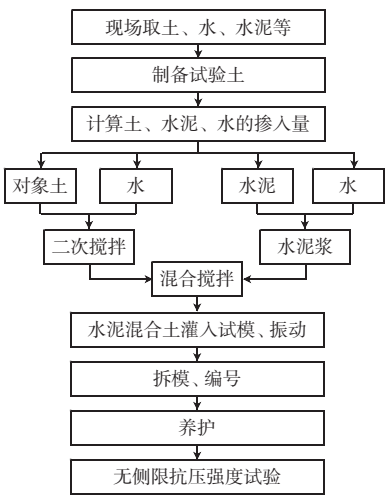


图 3　配合比试验流程图

2.3　试验参数

配合比试验参数主要包括以下内容。

1）水灰比：0.9；

2）固化材料：P·O52.5 普通硅酸盐水泥；

3）试验对象土：根据现有地层信息，现场取土对流泥、淤泥、淤泥质土、粉质黏土等土样进行室内配合比试验，取土孔共 9 孔；

4）试验拌合用水：自来水；

5）目标强度：60 d 目标强度 1.2 MPa 及 60 d 目标强度 1.6 MPa；

6）选用水泥掺量：P·O52.5 水泥掺量 200 kg/m^3、240 kg/m^3、260 kg/m^3、280 kg/m^3、290 kg/m^3、300 kg/m^3、320 kg/m^3、350 kg/m^3、360 kg/m^3、400 kg/m^3。

2.4　试件制备流程

对符合土性要求的土样，先剔除不同杂质，并使用搅拌设备进行初步拌和。由于取样扰动导致流泥数量有限，试验取表层淤泥并添加适量水拌和以模拟流泥性质。待土样搅拌均匀后，加入按配合比预先称量的水泥与水，继续以 300 r/min 的转速搅拌约 15 min。搅拌均匀的水泥土分层装入立方体试模，置于振动台上振捣密实。成型后的试件在温度（20±2）℃、湿度不低于 95%的标准条件下进行养护。

2.5　性能测试方法

室内无侧限抗压强度试验在 100 kN 压力机上完成。试验前使用游标卡尺测定试件尺寸并称重，同时记录其表观特征。试验全程控制应力，严格遵循《水泥土配合比设计规程》要求，以 0.15 kN/s 的匀速加载速率持续加压至试件破坏并准确记录峰值强度。

3　试验结果分析

本试验主要测试了 7 d、14 d、28 d、56 d 及 90 d 龄期的无侧限抗压强度。为评估水泥土是否满足 60 d 设计抗压强度要求，可采用式(1)[10]进行计算：

$$q_{uT_i}/q_{u90}=T_i/(a+bT_i) \tag{1}$$

式中：T_i 为试验龄期；q_{uT_i}为龄期 T_i 时，通过现场取芯、室内试验测得的 DCM 桩芯样无侧限抗压强度；a、b 为常数，a 取 24.238，b 取 0.720 4。

根据式(1)，通过室内无侧限抗压强度试验推算出 60 d 龄期无侧限抗压强度值。

3.1　土层性质影响

不同土层中水泥土的无侧限抗压强度(以下简称强度)发展规律如图 4 所示。水泥在各土层中的固化效果依次为：流泥层最弱，淤泥层次之，淤泥质土层较好，粉质黏土层最佳，这与陈中学等[3]的研究结论一致。在相同水泥掺量下，淤泥层强度较流泥层提高 20%，淤泥质土层较淤泥层提高 17%，粉质黏土层较淤泥质土层提高 10%。强度差异主要源于水泥水化产物(如水化硅酸钙、水化铝酸钙)对土体孔隙的充填作用，从而提升密实度与强度。由于各土层原状土的孔隙比与含水率不同，所形成水泥土的密实程度和含水状态存在差异，进而导致强度分化。原状土的孔隙比与含水率相差越大，所形成水泥土的强度差异也越显著。

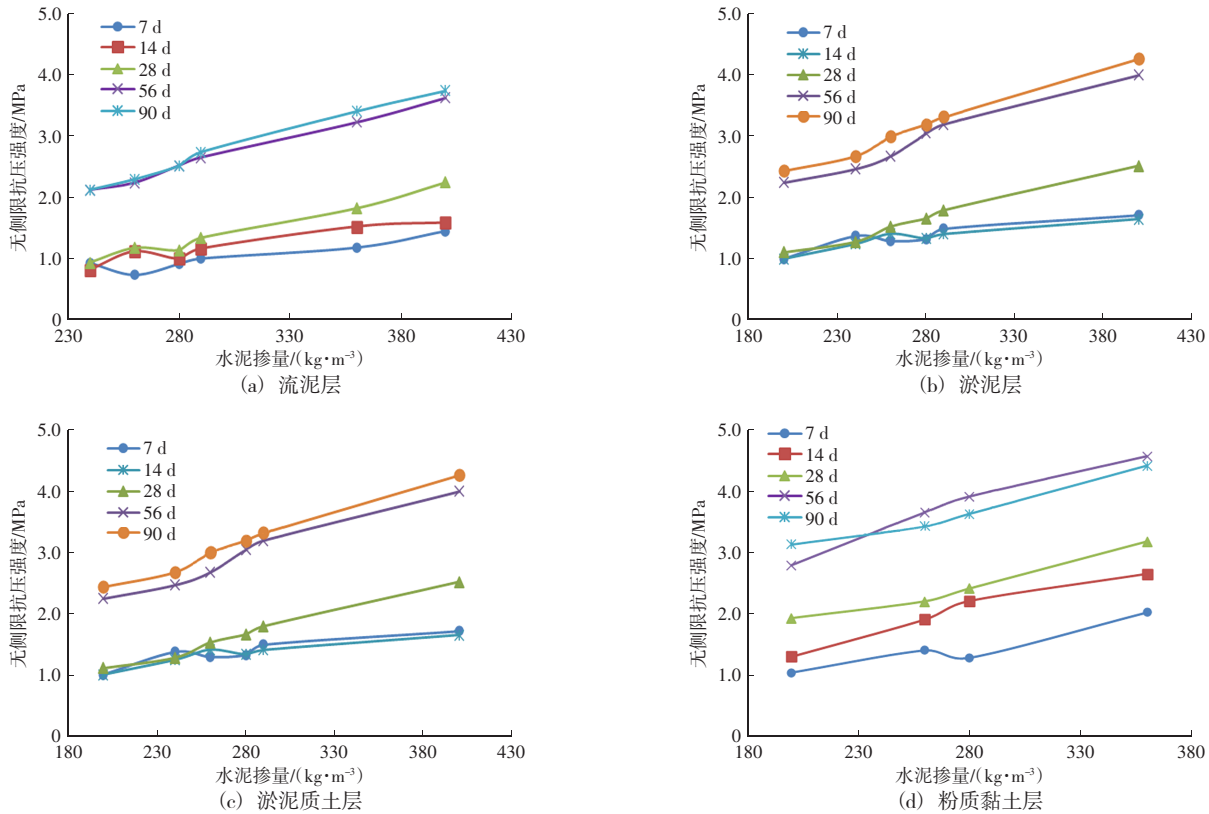


图 4　水泥土各龄期强度–土层性质–水泥掺量关系

3.2　不同掺量的影响

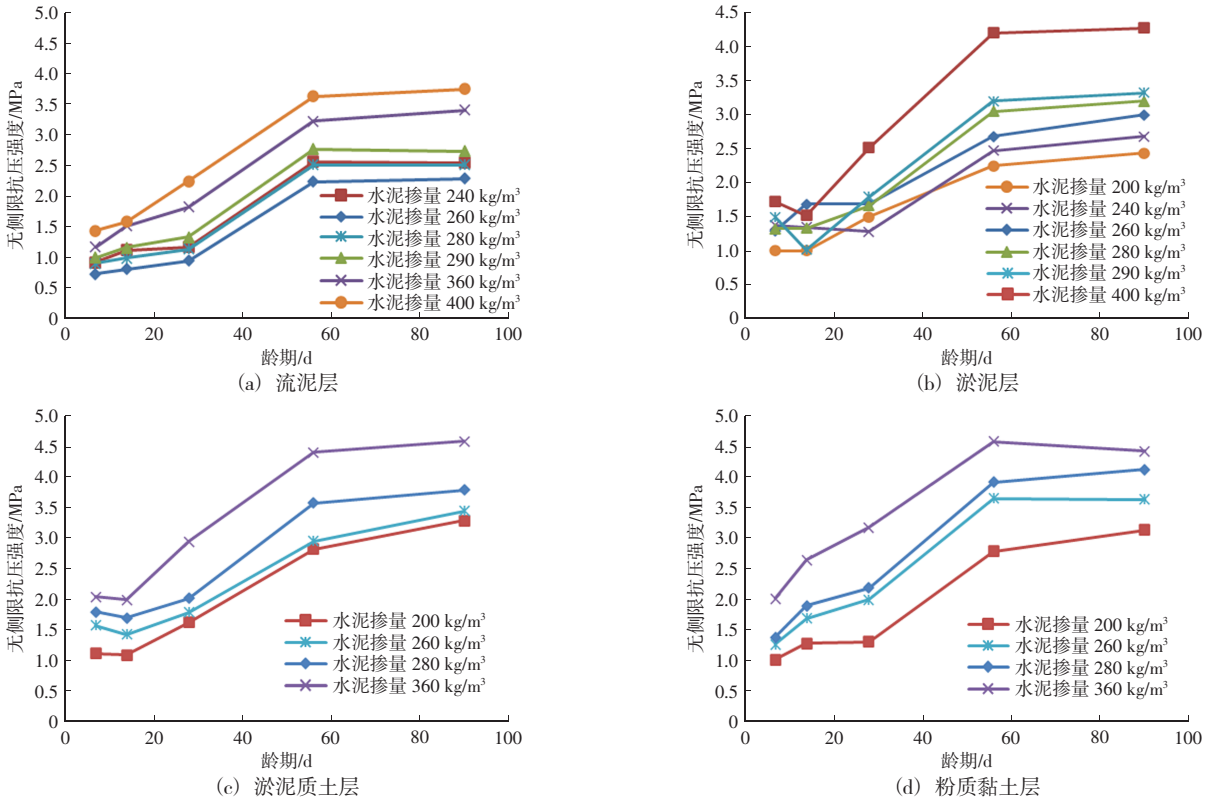
从图 4 可以看出，水泥土强度随着水泥掺量的增加而总体提高，其增长速率呈现明显的阶段性特征：以 260 kg/m³ 为界，增长曲线可以分为 2 个阶段。当水泥掺量超过该临界值后，强度增长速度显著加快，而在低于 260 kg/m³ 时，增速则相对缓慢。该低掺量阶段常被称为非反应区[11–12]，此阶段的水泥用量相对较少，生成的水化产物对土颗粒的胶结作用提升有限。当水泥掺量超过 260 kg/m³ 进入反应区后，水化产物持续填充土体孔隙，胶结效应显著增强，强度也随之呈近线性增长。

结合经济性与强度要求分析：对于 60 d 目标强度 1.2 MPa（推算 56 d 强度≥1.14 MPa），流泥层水泥掺量 200 kg/m³ 时 56 d 强度 2.23 MPa、淤泥层水泥掺量 200 kg/m³ 时 56 d 强度 2.52 MPa，均满足要求，但考虑深水环境下强度离散性，建议最小掺量控制为240 kg/m³；对于 60 d 目标强度 1.6 MPa（推算56 d 强度≥1.52 MPa），各土层水泥掺量 260 kg/m³ 时 56 d 强度均≥2.0 MPa，且掺量超过 320 kg/m³ 后强度增长幅度较小，故建议最优经济掺量为 260~320 kg/m³。

综上所述，实际 DCM 施工中，水泥掺量宜控制为 240~320 kg/m³（1.2 MPa 目标取 240~260 kg/m³；1.6 MPa 目标取 260~320 kg/m³）。

3.3　龄期对水泥土强度的影响

图 5 展示了流泥、淤泥、淤泥质土及粉质黏土在不同水泥掺量下强度随龄期的变化规律。如图 5 可见，4 类土层的水泥土强度随龄期增长趋势基本一致：强度增长主要集中于 56 d 龄期内，在此阶段水泥水化反应最为活跃；在 7 d龄期时，水泥土强度普遍已超过 1.0 MPa，表明早期强度发展较快。56 d 后强度增速明显放缓，至 90 d 龄期时强度仅较 56 d 时提升约 10%，说明在深水环境中，水泥土强度在 56 d 后已经基本进入了稳定阶段。



(a) 流泥层　(b) 淤泥层　(c) 淤泥质土层　(d) 粉质黏土层

图 5　水泥土强度–龄期关系曲线

3.4　水泥土含水率与密度分析

根据图 6、图 7 的试验结果，水泥土含水率与密度随养护龄期的延长波动较小，整体趋于稳定。在持续喷淋的饱和养护条件下（模拟海底实际工况），可认为其孔隙比在水化过程中基本保持恒定。各土层水泥土的含水率与密度存在显著差异，具体表现为：含水率由流泥层、淤泥层、淤泥质土层、粉质黏土层的顺序递减，而密度顺序则相反。这种系统性的差异构成了多数强度预测公式的重要理论基础[6–8]。

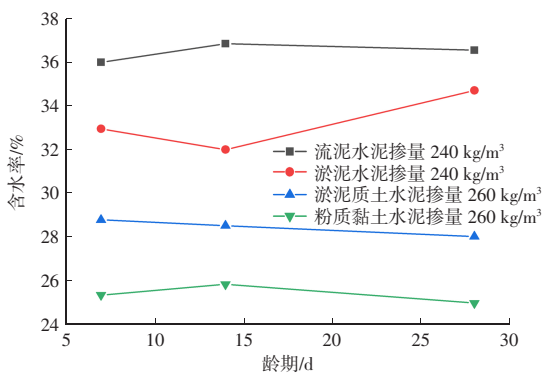


图 6　水泥土含水率–龄期关系曲线

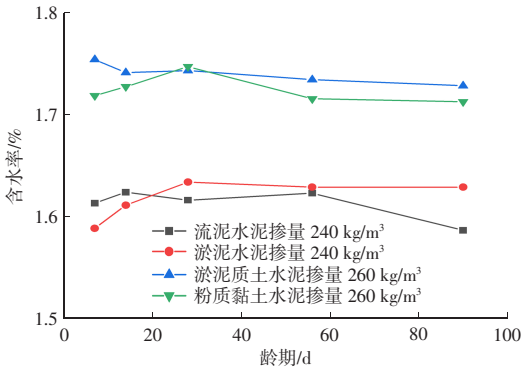


图 7　水泥土密度–龄期关系曲线

3.5　水泥土强度预测

为简化预测参数并提升模型精度，本研究将对流泥、淤泥、淤泥质土及粉质黏土的水泥土强度分别建立预测模型。通过对强度与龄期数据的回归分析，发现二者之间呈现出明显的对数曲线关系。据此，采用对数函数对强度与龄期进行拟合，进而将所得方程中的系数与水泥掺量进行回归分析。结果表明，各系数与水泥掺量之间均具有较好的线性关系，且相关拟合的判定系数均高于 0.85。最终，以水泥掺量和龄期为自变量，拟合得到了适用于上述 4 类土层的水泥土强度预测公式，即式(2)—式(5)。

$$f_{cu1}=(0.002C+0.232)\ln(T)-0.69 \quad (2)$$

$$f_{cu2}=(0.003C-0.105)\ln(T)-0.24 \quad (3)$$

$$f_{cu3}=(0.002C+0.501)\ln(T)-0.45 \quad (4)$$

$$f_{cu4}=(0.001C+0.697)\ln(T)-0.54 \quad (5)$$

式中：f_{cu1} 为流泥水泥土无侧限抗压强度，MPa；f_{cu2} 为淤泥水泥土无侧限抗压强度，MPa；f_{cu3} 为淤泥质土水泥土无侧限抗压强度，MPa；f_{cu4} 为粉质黏土水泥土无侧限抗压强度，MPa；C 为水泥掺量，kg/m³；T 为龄期。

为检验公式的可靠性，在工程现场取样并开展 56 d 龄期的室内配合比试验，水泥土强度实测结果与公式预测值对比见表 2。数据显示预测值与实测值吻合较好且二者偏差均控制在 15%以内，表明该预测公式具备良好工程适用性与准确性。

表 2　水泥土试验强度实测值与预测值对比

土层名称	水灰比	水泥掺量/(kg·m⁻³)	56 d 龄期强度/MPa		预测偏差/%
			实测值	预测值	
流泥	0.9	240	2.23	2.18	−2.55
		290	2.26	2.58	14.34
		320	2.64	2.82	6.87
		360	3.03	3.14	3.83
淤泥		240	2.52	2.24	−11.13
		290	3.00	2.84	−5.43
		320	3.50	3.20	−8.52
		360	4.04	3.68	−8.79
淤泥质土		240	3.79	3.50	−7.59
		290	3.71	3.90	5.19
		320	3.77	4.14	9.82
		360	4.10	4.46	8.90
粉质黏土		240	3.60	3.23	−10.28
		290	3.79	3.43	−9.37
		320	3.80	3.55	−6.48
		360	4.20	3.71	−11.55

4　结语

本文以深中通道软土隧道工程为项目依托，对深水条件下水泥搅拌桩(DCM)的室内配合比试验方法进行了系统研究，分析了土层性质、水泥掺量、龄期等关键因素对水泥土强度的影响，建立了分土层强度预测公式，得出如下结论：

1）深水海相软土水泥固化效果呈现显著分层特征，排序为流泥层<淤泥层<淤泥质土层<粉质黏土层；水泥掺量高于 260 kg/m³ 时强度进入高效增长区，56 d 龄期水泥土强度可达 2.0 MPa 以上，能满足工程 1.2 MPa(1.6 MPa) 的设计强度要求。

2）4 类土层的水泥土强度随龄期增长规律一致，56 d 前为集中水化反应期，强度增长快速(7 d 龄期可达到 1.0 MPa 以上，56 d 强度较 28 d 强度

增长 30%~40%）；56 d 后强度增长趋缓，90 d 强度较 56 d 强度仅增长约 10%；水泥土含水率与密度受龄期的影响极小，主要取决于原状土的物理性质。

3）建立的分土层（流泥层、淤泥层、淤泥质土层、粉质黏土层）强度预测公式，以水泥掺量和龄期为自变量，相关系数均大于 85%；经现场土样验证，预测值与实测值偏差在 15% 以内，可精准指导深水条件下 DCM 的配合比参数优化。

参考文献：

[1] 中交第一航务工程局有限公司. 水泥深层拌和法（DCM 工法）技术文件汇编[R]. 天津：中交第一航务工程局有限公司，2009.

[2] 刘志军，童新春，徐泽原，等. 水泥土室内制样方法与配合比试验[J]. 水运工程，2019(5)：32–36.

[3] 陈中学，李文广，任涛，等. 水泥土无侧限抗压强度试验分析[J]. 公路交通技术，2016，32(5)：4–8.

[4] 宫必宁，李淞泉. 软土地基水泥深层搅拌加固土物理力学特性研究[J]. 河海大学学报（自然科学版），2000(2)：101–105.

[5] 贺迎喜，李汉渤，张克浩，等. 水泥加固海相淤泥室内配比试验与现场工艺试桩[J]. 水运工程，2018(7)：35–40，76.

[6] 储诚富，洪振舜，刘松玉，等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学，2005(4)：645–649.

[7] 曹智国，章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(S1)：3446–3454.

[8] Lorenzo G A，Bergado D T. Fundamental characteristics of cement–admixed clay in deep mixing[J]. Journal of Materials in Civil Engineering. 2006，18(2)：161–174.

[9] Consoli N C，Foppa D，Festugato L H，et al. Key parameters for strength control of artificially cemented soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2007，133(2)：197–205.

[10] 中交第一航务工程局有限公司. 深中通道 DCM 加固软土地基的配合比与施工工艺研究技术报告[R]. 天津：中交第一航务工程局有限公司，2020.

[11] Uddin K. Strength and deformation behavior of cement treated Bangkok clay[D]. Bangkok：Asian Institute of Technology，1994.

[12] Zhang R J，Santoso A M，Tan T S，et al. Strength of high water–content marine clay stabilized by low amount of cement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2013，139(12)：2170–2181.