



关于抗浮锚杆试验的综述

文_钟世晓（南宁市建筑规划设计集团有限公司建筑设计一分院，集团副总工程师、分院总工程师，高级工程师）

关于锚杆的规范、标准、资料有很多，本文仅抽选针对抗浮锚杆试验的有关内容进行对比，并对其中一些内容稍做延展分析。相关规范、图集分别为《抗浮锚杆技术规程》（YB/T 4659—2018）、《建筑工程抗浮技术标准》（JGJ 476—2019）、《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》（GB 50086—2015）、图集《建筑结构抗浮锚杆》（22G815）、《高层建筑岩土工程勘察标准》（JGJ/T 72—2017），《全国民用建筑工程设计技术措施—结构（地基与基础）》（2009年版）（以下简称《全国措施》）。

一、试验项目

基本试验：确定锚杆的极限承载力，验证锚杆设计参数和施工工艺的合理性，为锚杆设计、施工提供依据。

蠕变试验：为了检测锚杆蠕变特性，为控制蠕变量和预应力损失提供锚杆设计参数，包括蠕变速率试验和预应力损失试验。

超张拉检验：抗浮锚杆对于岩土地层条件及施工工艺更为敏感，且受杆体强度的限制，应采取部分锚杆进行超张拉试验，以扩大检测的比例，使得检测结果更为可靠。

持有荷载试验：测试锚杆工作状态下的受拉荷载，或验证预应力锚杆的锁定荷载。持有荷载试验既可用于监测预应力锚杆在工作期间的杆体预应力变化情况，也可对非预应力锚杆的杆体拉力进行检测。对未埋设锚杆测力计的锚杆，采用持有荷载试验测试锚杆杆体持有荷载是一种有效的方法。注意一般要求在施工后进行试验，甚至有明确应在张拉锁定后12小时内完成持有荷载试验。在锚杆张拉锁定完成时，进行持有荷载试验得到的试验结果即为锚杆锁定力值。

锁定值试验：用于检验锚杆预应力施工控制过程及锁定力与设计要求的符合程度。在JGJ 476—2019中属于验收试验项目并给出试验方法，在图集22G815则是要求张拉前应进行试验，但未提及试验方法。

验收试验：验证工程锚杆抗拔力是否满足设计要求，为隐蔽工程提供验收依据。

为避免地基基础沉降变形导致预应力筋松弛，预应力锚杆锁定宜在施工至一定阶段后进行。

各规范、标准、图集要求进行的试验项目详见表1，其中JGJ 476—2019和图集22G815要求进行的试验项目最全面。

表1 抗浮锚杆试验项目

规范、规程、 标准、图集	试验项目				
	施工前		施工时	施工后	
YB/T 4659—2018	基本试验	—	—	预应力锚杆锁定后进行 持有荷载试验	验收试验
JGJ 476—2019	基本试验	蠕变试验	超张拉检验	预应力锚杆锁定值试验	验收试验
GB 50086—2015	预应力锚杆基本试验	蠕变试验	—	—	验收试验
图集22G815	基本试验	蠕变试验	预应力锚杆张拉 前锁定值试验	—	验收试验
			预应力锚杆超张 拉检验		
《全国措施》执行 JGJ/T 72—2017	抗拔静载试验				

注意各规范对要进行蠕变试验的岩土层情况表述有细微区别，按颁行时间依次为如下。

《岩土锚杆（索）技术规程》CECS 22：2005要求塑性指数大于17的土层中的锚杆、极度风化的泥质岩层或节理裂隙发育张开且充填有黏性土的岩层中的锚杆应进行蠕变试验。

GB 50086—2015对上述下划线的内容改为：强风化的泥岩。

JGJ 476—2019对上述下划线的内容又扩展为：全风化和强风化的泥质岩层。

图集22G815对上述下划线的内容又进一步扩展为：全风化岩层及泥质岩层，而且塑性指数调整为大于20。

《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）按岩石风化程度依次分类为：未风化、微风化、中等风化、强风化、全风化、残积土，CECS 22：2005描述的极度风化究竟属于哪个程度，也未在条文说明中进行解读。

其他工程质量检查和验收项目可参照JGJ 476—2019的9.4章节或图集22G815第12、13页执行。

二、试验数量

各规范、标准、图集关于试验、抽检数量的规定也有差异，各自表述不同，详见表2。

表2 抗浮锚杆试验数量

规范、规程、标准、图集	最少试验、检验数量				
	基本试验	蠕变试验	超张拉检验	锁定值试验（持有荷载试验）	验收试验
YB/T 4659—2018	同类型3根（新型、新工艺、无应用经验的地层则6根）	—	—	6根	5%，且同类型6根
JGJ 476—2019	—	3根	10%	5%，且5根	5%，且5根
GB 50086—2015	预应力锚杆3根	3根	—	—	预应力锚杆5%且至少3根多循环，95%单循环张拉
图集22G815	同类型6根；不同类型比较试验时，每种类型3根	3根	10%	5%，且6根	5%，且6根
《全国措施》	—	—	—	—	5%，且6根

图集22G815要求基本试验、蠕变试验、压力分散型预应力锚杆的承载力检测执行《锚杆检测与监测技术规程》JGJ/T 401—2017的有关规定。

JGJ 476—2019、图集22G815要求执行《锚杆锚固质量无损检测技术规程》（JGJ/T 182—2009），对于灌浆锚杆长度及注浆密实度检测，抽样率不宜少于锚杆总数的10%且每批不少于20根。但是JGJ/T 182—2009的1.0.2和1.0.5都明确说明，该规程只适用全长黏结锚杆锚固质量的无损检测，检测手段为声波反射法，在5.1.1又再次强调适用于全长黏结锚杆。在没有其他检测手段的情况下，很容易得出结论：只有全长同截面的锚杆才能检测其灌浆锚杆长度及注浆密实度，对由自由段+锚固段、分散型、扩大段（端）等组成的预应力锚杆尚无检测手段。规范、图集中无差别要求执行JGJ/T 182—2009标准进行检测，是很不严谨的，在工程实践中，设计单位为了不违规，设计文件只能按规范写要求，把问题转移到检测单位。

JGJ 476—2019要求抗浮构件验收检验不合格或不合格的数量超过抽检总数的10%时，应按不合格构件数量的3倍进行补充检验。补充检验结果不合格时，应按废弃或降低标准使用，或处理后再按验收检验标准进行检验。

三、试验前提条件和加载方式

锚杆施工过程中不可避免会对周边土造成扰动，随着休止时间的增加，锚杆承载力也逐渐增加并稳定。休止时间是指锚固体与岩土层黏结力恢复所需的时间。

根据工程经验，锚固体及锚固结构强度达到15MPa及20MPa，一般能够满足试验需要，但是压力型锚杆设计承载力较大时，对锚固体的强度要求较高，为避免质量纠纷，验收试验时锚固体强度应达到设计要求。

因地下水位受降雨影响而变化，地下结构承受的上浮力常呈现低频大变幅循环，所以通过多循环加卸载试验尽量模拟抗浮锚杆的实际工作环境，以确定其承载力及变形刚度。

由于工程界长期习惯于施加单循环荷载，施加多循环荷载的经验尚不普遍，故在“探究试验”时要求采用多循环法，“适应试验”是优先采用多循环法，也可采用单循环法。另外，岩体质量等级Ⅰ～Ⅲ级的全黏结岩石锚杆在周期荷载下变形一般较小，可采用单循环试验。

预应力锚杆采用循环法试验的主要目的是测定锚筋的塑性与弹性变形，用以判断锚筋的表现自由长度是否在设计预期之内，从而推断锚杆的自由段长度是否满足设计要求，为工程锚杆的验收提供对比依据。

由上述可知为何各规范、标准的基本试验都要求分级多循环，而验收试验则不一定如此。

各规范、标准、图集对试验前最短休止时间和构件强度要求各有不同，加载方式也有细微区别，详见表3。

表3 抗浮锚杆试验前置条件、加载方式

规范、规程、标准、图集	锚杆注浆后到试验最少休止时间（强度要求）	加荷方式	
		基本试验	验收试验
YB/T 4659—2018	岩石地层7d，非黏性土土层15d，黏性土层25d（锚固体及锚固结构强度达到设计强度）	分级多循环	预应力锚杆同GB 50086—2015 非预应力锚杆单循环加载
JGJ 476—2019	（锚固体达到90%设计强度）	分级六循环加荷	分级加荷
GB 50086—2015	—	预应力锚杆多循环张拉方式	预应力锚杆多循环+单循环张拉
图集22G815执行JGJ/T 401—2017	（锚固段注浆体达到90%设计强度或28d龄期）	分级多循环	可用单循环加载
《全国措施》执行JGJ/T 72—2017	砂土和粉土10d，非饱和黏性土15d，饱和黏性土28d（锚固段浆体强度达到设计强度）	分级六循环加、卸荷载	

YB/T 4659—2018中的非黏性土指粉土、砂土及碎石土。还要求预应力锚杆验收检测执行GB 50086—2015的有关规定。

四、试验加载值

不同规范、资料关于试验最大加载值的要求各有表述，详见表4，其中各种符号、术语繁多，有些在原文中无明确解释和取值定义，笔者在此通过各规范、资料之间的横向借鉴、分析，供工程师思量，酌情采用。

表4 抗浮锚杆试验最大加载值

规范、规程、标准、图集	最大加载值				
	基本试验	蠕变试验	超张拉检验	锁定值试验（持有荷载试验）	验收试验
YB/T 4659—2018	$Q_{md} \geq$ 预估破坏荷载	—	—	$(Q_{md}=1.2Q_{ld}$ 设计锁定荷载， Q_{ld} 可取0.7锚筋抗拉承载力标准值)	预应力锚杆同GB 50086—2015 非预应力锚杆 $\geq 1.5N_k$ 拉力标准值
JGJ 476—2019	非预应力锚杆 ≥ 2 设计抗拔承载力特征值 预应力锚杆 ≥ 1.2 倍预估破坏荷载	≥ 1.5 预估破坏荷载 N_t	≥ 1.2 设计值	1.1 锁定荷载设计值 N_t	最大试验荷载不宜超过抗浮锚杆轴向拉力设计值的1.5倍
GB 50086—2015	—	预应力锚杆取 $1.2N_d$	—	—	预应力锚杆取 $1.2N_d$
图集22G815执行JGJ/T 401—2017（设计锁定荷载 $\geq R_{1a}$ ）	Q_{max}	$1.5N_k$	设计锁定荷载+预计损失荷载，且 ≥ 1.2 设计值	（不大于验收荷载）	$\geq$ 承载力特征值的两倍
《全国措施》执行JGJ/T 72—2017	加载至破坏、预估抗拔设计承载力的两倍	—	—	—	加载至预估抗拔设计承载力的两倍

YB/T 4659—2018虽然未如JGJ 476—2019、图集22G815那样要求进行超张拉检验，但也提到宜超张拉，超张拉荷载宜为设计锁定荷载+预计损失荷载。

（一）小于2倍抗拔承载力特征值（拉力标准值）的试验加载值

关于地基基础承载力试验，试验最大加载值一般是不小于2倍承载力特征值（或标准组合下的作用效应），但看表4可知，还是有例外的，需工程师自行判断如何执行。

GB 50086—2015中锚杆拉力设计值 $N_d=1.35\times\gamma_w\times N_k=1.485N_k$ ， N_k 为锚杆拉力标准值， γ_w 为工作条件系数，一般情况取1.1。那么试验加载 $1.2N_d=1.2\times1.485N_k=1.782N_k$ ，小于2倍抗拔承载力特征值（标准组合条件下的拉力标准值）。

YB/T 4659—2018中，锚杆拉力标准值 $N_k\leq$ 锚杆抗拔承载力特征值 R =锚杆极限抗拔承载力标准 $R_{uk}/2$ ， R_{uk} 由锚固体与岩土间黏结强度标准值估算而来。由此可见，其非预应力锚杆验收试验加载只是1.5倍锚杆抗拔承载力特征值，预应力锚杆验收同GB 50086—2015，如上所分析，加载值也仅是 $1.785N_k$ ，两者均小于2倍关系（注意作用效应 $N_k\times\gamma_o\leq$ 抗力 R ，尚要考虑不小于1的重要性系数 γ_o ，因此实际试验加载值较2倍抗拔承载力特征值小的更多）。

（二）定义和取值不明确的术语、符号

其一，YB/T 4659—2018在设计计算章节，锚杆的拉力标准值 N_k 、锚杆抗拔承载力特征值 R 、锚杆极限抗拔承载力标准值 R_{uk} 均有明确定义和算式，而持有荷载试验提到的“锚筋抗拉承载力标准值”究竟对应哪个取值？借鉴图集22G815提到设计锁定荷载取值不宜小于锚杆抗拔承载力特征值 R_{ta} ，推测YB/T 4659—2018中的设计锁定荷载 $Q_{ld}\geq R$ ，则持有荷载试验最大加载值 $\geq Q_{ld}$ 设计锁定荷载 $\geq 1.2R$ ，绕过不明晰的“锚筋抗拉承载力标准值”取值问题。

其二，图集《建筑结构抗浮锚杆》（22G815）的基本试验、蠕变试验和验收试验均要求执行《锚杆检测与监测技术规程》（JGJ/T 401—2017）的有关规定，基本试验最大试验荷载（Qmax）预估值的确定应符合下列规定。

（1）拉力型锚杆： $Q_{max}=1.0\sim1.5\times\min$ （锚固段注浆体与岩土体之间破坏荷载预估值，杆体与锚固段注浆体之间破坏荷载预估值）。

（2）压力型锚杆： $Q_{max}=\max$ （ $1.0\sim1.5\times$ 锚固段注浆体与岩土体之间破坏荷载预估值， $0.9\times$ 锚固段注浆体局部抗压破坏荷载）。

（3）钢绞线锚杆杆体应力 $\leq0.85\times$ 杆体极限强度标准，钢筋锚杆杆体应力 $\leq0.9\times$ 杆体屈服强度标准值。

（4）锚固段注浆体与岩土体之间破坏荷载、杆体与锚固段注浆体之间破坏荷载按现行各个规范、标准进行计算。

《锚杆检测与监测技术规程》（JGJ/T 401—2017）中 N_k 为荷载标准组合的锚杆拉力值。

其三，《建筑工程抗浮技术标准》（JGJ 476—2019）中的术语、符号应用相当混乱，有些名词未给出定义，因此要靠读者自行解读，如下所示。

（1） N_t ：作用基本组合条件下锚杆承担的荷载标准值。

（2） R_t ：锚杆极限抗拔承载力标准值。

（3） N_{ka} ：抗浮锚杆抗拔承载力特征值， $N_{ka}\leq R_t/2$ 。

（4）设计值：出现在9.4.5，超张拉检验的张拉力不应小于设计值的1.2倍，设计值无明确定义；借鉴YB/T 4659—2018和图集22G815的超张拉荷载宜为设计锁定荷载+预计损失荷载、设计锁定荷载取值不宜小于锚杆抗

拔承载力特征值的规定，如根据设计值取值同 $N_{ka}\geq N_t$ 推测，超张拉荷载 $\geq 1.2N_{ka}\geq 1.2N_t$ ，此处 N_t 是计入分项系数1.35的基本组合值，图集22G815中超张拉荷载尚且不小于1.2设计值，图集的设计值 $N_{td}=1.35R_{ta}$ ，也计入分项系数，由此也佐证两者虽概念上一致，但实际应用上不完全一样，JGJ 476—2019是用计入1.35分项系数的 N_t 、 N_{ka} 确定锚杆长度、直径，而其他规范多是用计入1.0分项系数的 R_{ta} 确定锚杆长度、直径，详见后续分析。

（5）预估破坏荷载：出现在预应力锚杆基本试验E.2.10，无定义。

（6）预估破坏荷载 N_t ：出现在蠕变试验E.2.17、E.2.18，又重复符号 N_t ，仍无定义。其试验表格符号和数值完全照搬《岩土锚杆（索）技术规程》CECS 22：2005的试验表格，在其中增加了注释 N_t 为预估破坏荷载，而CECS22中的 N_t 定义为锚杆的拉力设计值，计算筋体、锚固体时尚要乘以安全系数 K_t （取值1.4~1.8）、 K （取值1.4~2.2），与预估破坏荷载的字面意思不符，起码加载超过 $K\times N_t$ 前不应破坏。

（7）锁定荷载设计值 N_t ：出现在锁定试验H.5.4，无明确定义，在8.5.6-4提到锁定荷载等于、小于抗拔力设计值时该如何，也没规定锁定荷载取值。（7）锁定荷载设计值 N_t 与（1） N_t 、（6） N_t 同符号，分别代表基本组合、预估破坏、锁定荷载，字面意思不同，虽都同样符号为 N_t ，取值应该还是不同的。同样借鉴图集22G815提到设计锁定荷载取值不宜小于锚杆抗拔承载力特征值 R_{ta} ，锁定荷载设计值 $N_t\geq N_{ka}$ ，因此推测锁定荷载试验最大加载值 $=1.1N_t\geq 1.1N_{ka}$ （此处 N_t 是设计锁定荷载，与（1） N_t 不同）。

（8）拉力设计值：出现在验收试验H.1.4，还是无定义；在后续分析中，可以推导出（1） N_t/N_{tk} 基本都大于1.35，若是拉力设计值取（1） N_t ，那么验收试验加载值上限取 $1.5N_t=1.5\times1.35N_{tk}>2N_{tk}$ 。但很奇怪的是，其他试验加载都规定下限值，JGJ 476—2019关于验收试验加载值只提上限，不宜超过1.5倍拉力的设计值，若是担心加载过大超出杆体承载力、黏结强度导致锚杆破坏，而要补做锚杆，给项目带来不必要的损失和麻烦，这是在可允许的范围内，但也应该设定一个加载下限，以确认承载力达到要求。

其四，YB/T 4659—2018基本试验的预估破坏荷载，JGJ 476—2019的（5）预估破坏荷载、（6）预估破坏荷载 N_t 是否可以借鉴JGJ/T 401—2017的有关规定？其实就是根据锚固体与岩土黏结强度、杆体与锚固体黏结强度估算的抗拔力。JGJ 476—2019没如其他规范那样要求还用杆体与锚固体的黏结强度复核抗拔力，估计是因为根据工程实践，基本上都是锚固体与岩土的黏结起控制作用，尤其是土层锚杆的情况，不必多此一验算。

JGJ 476—2019的基本试验的加载是不小于1.2倍预估破坏荷载，如上所述，借鉴JGJ/T 401—2017的概念，预估破坏荷载即为用锚固体与岩土间黏结强度估算出来的极限抗拔承载力标准值 $R_t\geq 2N_{ka}\geq 2N_t$ 。预应力锚杆基本试验 ≥ 1.2 倍预估破坏荷载 $=2.4N_{ka}$ 或 $2.4N_t$ 。也算符合在施工前试验比预估承载力大2倍以上，或加载到破坏的普适原则。

若是按JGJ 476—2019中的蠕变试验加载 ≥ 1.5 预估破坏荷载 $=1.5\times 2N_{ka}=3$ 倍估算的抗拔力特征值，加载有些偏大，远超出锚杆预估的工作状态。可以对比GB 50086—2015的蠕变试验加载取值 $1.2N_d=1.782N_k$ ，图集22G815执行JGJ/T 401—2017的蠕变试验加载取值 $1.5N_k$ 。若是JGJ 476—2019中的蠕变试验加载 $\geq 1.5N_t$ ，此处 N_t 为作用基本组合条件下锚杆承担的荷载标准，把后续分析的 $N_t\geq 0.35K_w\times N_{wk}+N_{tk}$ 带入，蠕变试验加载 $\geq 1.5N_t\geq 0.525K_w\times N_{wk}+1.5N_{tk}$ ，可知蠕变试验加载至少 $\geq 1.5K_w\times N_{tk}$ ，还会溢出 $0.525K_w\times N_{wk}$ ，既然是因为抗浮稳定不足而需要设抗浮锚杆，那么考虑自重的情况下，水浮力 N_{wk} 基本都是比 N_{tk} 大，甚至会大很多，哪怕是完全没有自重抗浮， $G_k=0$ ， $N_{wk}=K_w\times N_{tk}$ ，抗浮稳定安全系数 $K_w\geq 1.0$ ，此时蠕变加载值 $\geq 0.525\times K_w\times N_{tk}+1.5N_{tk}=(0.525K_w+1.5)\times N_{tk}$ ，最小也大于2倍标准组合的拉力值，实际工程中 G_k 基本不会为零，其蠕变加载值只会更大。

（三）关于荷载作用效应之间的关系

为方便分析，现设定：结构自重标准值 G_k ，锚杆拉力标准值 N_{tk} ，水浮力标准值 N_{wk} ，对应分项系数 γ_G 、 γ_t 、 γ_w ，抗浮稳定安全系数 K_w ，重要性系数 γ_o ，锚杆拉力设计值（基本组合条件下的标准值） N_t ，按《建筑工程抗浮技术标准》（JGJ 476—2019）的3.0.3和3.0.9规定：

$$(\gamma_G \times G_k + \gamma_t \times N_{tk}) / (\gamma_w \times N_{wk}) \geq K_w$$

$$\rightarrow (1 \times G_k + 1 \times N_{tk}) / (1 \times N_{wk}) \geq K_w$$

$$\rightarrow N_{tk} \geq K_w \times N_{wk} - G_k;$$

由于JGJ 476—2019未如其他规范那样直接给出公式告知标准组合下锚杆拉力值与基本组合下拉力值的关系，以《建筑结构可靠性设计统一标准》（GB 50068—2018）的8.2规定， $\gamma_o \times S_d \leq R_d$ ， $S_d = \gamma_w \times N_{wk}$ ，JGJ 476—2019的6.3.1规定抗浮力 R_d 包括 G_k （结构自重、附加物自重）和 N_t （抗浮结构及构件抗力），即 $\gamma_o \times \gamma_w \times N_{wk} \leq G_k + N_t$ ，因此锚杆长度、直径、配筋的计算所采用的基本组合拉力值 $N_t \geq \gamma_o \times \gamma_w \times N_{wk} - G_k = \gamma_o \times 1.35 \times N_{wk} - G_k$ 。

抗浮工程设计等级分别为甲级、乙级、丙级时， K_w 和 γ_o 恰好都分别为1.1、1.05、1.0，为方便分析，化繁为简把代入 $K_w = \gamma_o$ ，上式可等同于

$$N_t \geq K_w \times 1.35 \times N_{wk} - G_k = 0.35K_w \times N_{wk} + K_w \times N_{wk} - G_k$$

为方便分析对比，把 $N_{tk} = K_w \times N_{wk} - G_k$ 带入上式，则

$$N_t \geq 0.35K_w \times N_{wk} + N_{tk};$$

$$\text{那么, } N_t/N_{tk} = (0.35K_w \times N_{wk} + N_{tk}) / N_{tk} = 0.35K_w \times N_{wk} / N_{tk} + 1$$

把 $K_w \times N_{wk} = N_{tk} + G_k$ 再代入上式得到

$$N_t/N_{tk} = 0.35 \times (N_{tk} + G_k) / N_{tk} + 1 = 1.35 + 0.35 \times G_k / N_{tk}$$

由上式可知，JGJ 476—2019体系下的基本组合拉力/标准组合拉力值至少是1.35（实操中， N_{tk} 取值会使 $K_w > \gamma_o$ ，上述推导过程中的 $K_w = \gamma_o$ 并不成立，实算得到的最小倍数与1.35稍有出入），水浮力不变的情况下，自重 G_k 越大，抗浮稳定所需的标准组合拉力值 N_{tk} 就越小，但计算锚杆长度、直径、配筋的基本组合拉力值 N_t 虽然也会减少，但衰减幅度会变小，导致 N_t 相对 N_{tk} 的倍数就会增大。

为更直观了解，把各作用荷载简化为按锚杆间距分摊的 G_k 、 N_{tk} 、 N_t ，分别赋予具体数值， $K_w \geq 1.05$ ， $\gamma_o = 1.05$ ，对比分析如表5。

表5 抗浮力中自重 G_k 不同占比对应锚杆所需分担拉力 N_{tk} 对比表

N_{wk}	G_k	N_{tk}	$K_w = (G_k + N_{tk}) / N_{wk}$	$N_t \geq 1.05 \times 1.35 \times N_{wk} - G_k$	N_t/N_{tk}	$1.5N_t/N_{tk}$	$1.2N_t/N_{tk}$
230	20	230	1.09	306	1.3	2.00	1.6
230	50	200	1.09	276	1.4	2.07	1.7
230	100	150	1.09	226	1.5	2.26	1.8
230	150	100	1.09	176	1.8	2.64	2.1
230	200	50	1.09	126	2.5	3.78	3.0
230	230	20	1.09	96	4.8	7.20	5.8
230	245	5	1.09	81	16.2	24.31	19.4
230	249	1	1.09	77	77.0	115.54	92.4

结构分析软件执行JGJ 476—2019规定所列出的工况，也能展示出类似问题。



自重占比大时，计算锚杆长度、直径和配筋的 N_t 是抗浮稳定所需 N_{tk} 两倍多。



稍加点恒载，自重占比更大，抗浮稳定所需 N_{tk} 大幅度减小，但 N_t 减小幅度相对不大， N_t/N_{tk} 达到夸张的12.8倍，很不合理。



再加大恒载，自重已经能压过水浮力， $N_{tk} < 0$ ，意味着抗浮稳定已满足，不需要设锚杆，但分析软件仍然会提供计算锚杆长度、直径和配筋的 N_t ，较不合理。

从推导式和算例均可看出，在抗浮抗力中自重 G_k 比重越大，抗浮稳定所需的锚杆抗拔力 N_{tk} 越小，计算锚杆构件长度、直径、配筋的拉力设计值 N_t 的绝对值虽然减小，但相对 N_{tk} 要越大，须知设置抗浮锚杆是源自抗浮稳定不足，需要增加抗拔力 N_{tk} ，用比 N_{tk} 抛大很多且不定倍数的 N_t 设计锚杆长度、直径、配筋，并不合理，会无端加大建设成本。

对比其他规范、标准的锚杆拉力标准值（特征值）和设计值（基本组合下的标准值、极限抗拔承载力标准值）之间的关系，都是稳定的。

GB 50086—2015中锚杆拉力设计值 N_d ，锚杆拉力标准值 N_k ， $N_d = 1.35 \times \gamma_w \times N_k = 1.485N_k$ ；用 N_d 算锚杆筋体 A_s ，也算所需锚固体直径、长度（考虑安全系数2~2.2）。

YB/T 4659—2018中锚杆拉力设计值 N ，锚杆拉力标准值 N_k ，锚杆抗拔承载力特征值 R ，锚杆极限抗拔承载力标准值 R_{uk} ， $N = 1.35N_k \leq 1.35R = 1.35R_{uk}/K = 1.35R_{uk}/2 = 0.675R_{uk}$ ； $\gamma_c \times N$ 算锚杆筋体 A_s ， $\gamma_c = 1.15$ ， R 算所需锚固体长度、直径。

图集22G815中锚杆抗拔承载力特征值 R_{ta} ，锚杆极限抗拔承载力标准值 T_{uk} ， $R_{ta} = T_{uk}/K = T_{uk}/2$ ；计算锚杆筋体面积 A_s 采用 $K_t \times N_{tk}$ ，锚杆拉力标准 $N_{tk} = 1.0R_{ta}$ ， $K_t = 2$ ， R_{ta} 算所需锚固体长度、直径。

《全国措施》中锚杆抗拔承载力特征值 R_t ，荷载效应基本组合下锚杆拉力设计值 N_{td} ， $N_{td} = 1.35R_t$ ；与其他规范、标准用黏结强度标准值不同，《全国措施》用黏结强度特征值算 R_t ，因此在 R_t 算式中不引入其他规范有的安全系数 K （一般取值2）； N_{td} 算锚杆筋体面积 A_s 。

在工程实践中执行JGJ 476—2019会出现上述与众不同的不合理情况，是因为中抗浮稳定所需 N_{tk} 和计算抗浮构件长度、直径、配筋采用 N_t 的计算方式不同，或许在抗浮设计中，由于抗力中的自重、抗拔力与水浮力效应存在关联互动，生硬套用GB 50068—2018的 $\gamma_o \times S_d \leq R_d$ ，可能并不合适，如其他规范、标准直接从标准组合 $N_{tk} \geq K_w \times N_{wk} - G_k$ ，乘以分项系数得到基本值 N_t ，更简单、合理些。

（四）令人质疑的荷载作用效应适用情况

值得注意的是JGJ 476—2019的3.0.8、3.0.9与YB/T 4659—2018的3.0.5、3.0.6都是关于锚杆两类极限状态设计、作用效应组合与抗力限值的规定，两者内容基本吻合，但后者明显更为合理。

JGJ 476—2019中3.0.9-2规定用分项系数取1.35的基本组合去确定构件长度、直径和配筋及验算材料强度。

YB/T 4659—2018在3.0.6-5规定计算锚杆抗拔力特征值和确定锚杆锚固段长度时，传至锚杆的作用效应，应按正常使用极限状态下的标准组合。在3.0.6-4中规定基本组合确定构件内力、配筋、计算锚杆筋体面积和验算材料强度，从荷载效应基本组合下锚杆拉力设计值公式 $N=1.35N_k$ （5.1.3），可知基本组合的分项系数为1.35。

YB/T 4659—2018的规定明显与荷载标准值对应地基承载力特征值确定基底尺寸、桩长、桩径，荷载基本组合确定基础高度、配筋的普适观念相符。

因此笔者认为后颁行的JGJ 476—2019的3.0.9可能套用了YB/T 4659—2018的3.0.6的规定，却又套用GB50068—2018中 $\gamma_0 \times S_d \leq R_d$ 的概念，导致不合理，出现上述分析 N_t/N_{tk} 的偏差，然而YB/T 4659—2018只是推荐性规程，JGJ 476—2019是后颁行的标准。

（五）关于试验加载取值的建议

从上述分析，可以看出各规范、标准关于试验加载值的要求相当杂乱。在工程实践中，关于试验加载值，工程师可考虑如下建议。

基本试验：加载至破坏、2倍抗拔承载力特征值=预估破坏荷载（根据锚固体与岩土黏结强度、杆体与锚固体黏结强度估算的抗拔力）。

蠕变试验：1.5~2倍抗拔承载力特征值。

超张拉检验：1.7倍抗拔承载力特征值（ $1.2 \times 1.35=1.62$ ，再考虑重要性系数）。

持有荷载试验：1.2~2倍抗拔承载力特征值。

预应力锚杆锁定值试验：1.1倍抗拔承载力特征值。

验收试验：2倍抗拔承载力特征值。

五、试验加载值对锚杆配筋的要求

关于锚杆筋体面积的计算，各规范、标准均有规定，在此仅补充试验加载对筋体的要求详见表6。

表6 抗浮锚杆试验加载对锚杆配筋的要求

求规范、规程、标准、图集	最大试验荷载对锚杆配筋的要求			
	基本试验	蠕变试验	锁定值试验（持有荷载试验）	验收试验
YB/T 4659—2018	锚杆杆体张拉应力不大于抗拉强度设计值	—	锚杆杆体张拉应力不大于抗拉强度设计值	锚杆杆体张拉应力不大于抗拉强度设计值
JGJ 476—2019	—	—		0.9倍锚杆杆体承载力标准
GB 50086—2015	杆体极限强度标准值75%且屈服强度标准值85%	杆体极限强度标准值75%且屈服强度标准值85%	—	杆体极限强度标准值75%且屈服强度标准值85%
《全国措施》执行JGJ/T 72—2017	满足最大试验荷载要求	—	—	满足最大试验荷载要求

挑选常用锚杆筋体材料，按表6的要求列在表7，JGJ 476—2019要求0.9倍锚杆杆体承载力标准明显大于GB 50086—2015要求的杆体屈服强度标准值85%，不再列出，工程师可斟酌选用以确定筋体面积。

表7 抗浮锚杆筋体强度

筋体强度 常见筋体		极限强度 标准值 (f_{stk}/f_{ptk})	屈服强度 标准值 (f_{yk}/f_{pyk})	抗拉强度 设计值 (f_y/f_{py})	极限强度 标准值75%	屈服强度 标准值85%
热轧带肋钢筋	HRB400	540	400	360	405	340
	HRB500	630	500	435	472.5	425
预应力螺纹钢筋	PSB785	980	785	650	735	667.25
	PSB930	1080	930	770	810	790.5
	PSB1080	1230	1080	900	922.5	918
钢绞线	—	1720	(1540)	1220	1290	(1309)
		1860	(1670)	1320	1395	(1419.5)
		1960	(1760)	1390	1470	(1496)

《混凝土结构设计规范》（2015年版）（GB 50010—2010）、《无粘结预应力钢绞线》（JG/T 161—2016）和《预应力混凝土用钢绞线》（GB/T 5224—2014）均未给出钢绞线的屈服强度标准值，只有《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330—2013）给出钢绞线的屈服强度标准值。

六、结语

现行规范、标准较多，互不一致，甚至矛盾的内容并少见。通常，工程师采用哪个规范、标准，就按其全套规定执行。《建筑工程抗浮技术标准》（JGJ 476—2019）是关于抗浮内容最全面，完整体系的标准，抗浮锚杆只是其中一部分内容，按该标准进行抗浮设计、施工、检测即可，关于锚杆内容，未详尽的可参照执行更专业于锚杆的YB/T 4659—2018有关规定。但正如前文分析所展示的情况，JGJ 476—2019对试验加载值有各种无明确定义的术语、符号让人揣测，工程实践中，工程师们怎么取值全凭各人理解，而且关于作用效应组合的规定会出现不合理的结果。因此，笔者对各相关规范、标准做对比分析，以供工程师在工程实践中斟酌思量，做出合理的选择。