粉喷桩及其复合地基质量检测方法的探讨

徐敬业　李小和
（铁道部第四勘测设计院第一勘测设计研究处，武汉，430063）

提　要　检测方法的不完善，已严重制约了粉喷技术的推广应用。本文对现有各种检测方法作了系统的分析和评价，指出根据不同情况选取不同的检测方法组合起来，是提高目前检测质量的有效途径。

一　前　言

桩身质量是控制粉喷桩复合地基特性的主要因素，因此桩身质量检测是粉喷桩复合地基质量检测的重要一环。粉喷桩作为复合地基的主要载体，根据其作用机理和自身特性，检测内容可分为：桩身材料的密实度、强度、均匀性、桩体连续性、有效长度、桩体截面、端承条件等。目前，尽管检测方法很多，但都不完善，并在一定程度上掩盖了质量问题，这已严重制约了粉喷技术的应用和发展，成为粉喷技术应用研究的当务之急。

二　现有检测技术的分析和评价

1. 现场桩身足尺无侧限抗压强度试验法

该法在成桩 28 天后于桩体上部截取三段桩体现场实测无侧限抗压强度，并按照下式推算 90 天的龄期强度 R_{90}：

$$R_{90}=K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot R_T \qquad (1)$$

式中：R_T为试验龄期的强度（MPa）；K_1为推算系数，$K_1=(90/T)^{1/2}$；T为试验龄期(天)；K_2为试验边界条件修正系数，一般取 1.15 左右；K_3为试样强度损伤系数，一般取 1.3 左右。

该法有以下缺点：①检测深度有限，尤其是地下水位较高时更是如此；②制样困难；③破坏桩体及桩周土，在较为均一的复合地基中形成奇异区，回填量大、要求高；④试验数量较少，又由于制样过程中损伤程度不同、地层、桩体自身的变异性及桩体上部由于上覆压力小、通常含水量较低而搅拌均匀性和密实度较差等原因，试验结果离散性大、代表性较差；⑤试样强度损伤系数 K_3 的选取具有主观性；⑥粉喷桩一旦开挖暴露在空气中，由于水分的散失，强度迅速增长，暴露一天强度增长甚至可达一倍以上，因此，检测结果与实际情况之间存在较大差异。

2. 动力触探法

(1)轻型触探（N_{10}）法　由于桩身无侧限抗压强度 q_u 与 N_{10} 存在较好的相关关系，因

此，可依此判别桩身强度、桩体连续性。采用附带的勺钻还可以获取水泥土样而直接观察其搅拌均匀程度、成桩状态等。但该法通常只能以成桩 3～4 天内、桩顶以下 4～5m 以内的检验结果推断后期强度和桩身质量，因而，应用范围和准确程度受到影响。该法对桩长较短、土层均一的情况最为适用。当地基为多层土时，因软弱土层对桩身质量有控制作用而不能将获得的结果简单进行统计。

(2)标准贯入试验法　该法通过标贯器全桩长取芯直接观察或依据锤击数与水泥土强度的相关关系，判断桩身均匀程度、桩身强度、成桩状态、桩体连续性、端承条件，但该法对桩体破坏很大，常造成桩体劈裂，再者，锤击数与水泥土强度相关关系的资料还不充分，所以应用不多。

3. 静力触探试验法

通过比贯入阻力与水泥土强度的相关关系判别桩身强度、桩体连续性、均匀性。但当桩中夹杂有搅拌不均匀而形成的水泥土硬块或桩体强度较大时，难于进行，所以，该法目前很少使用。

以上三种方法设备简单，操作方便，试验快速，数据直接，成本低，可大量用于质量普查和跟踪，有针对性地指导施工。对同一场地中桩身特征值进行统计分析，可以对整个场地中桩身的强度、均匀程度、连续性作出评判。另外，也可以对比桩身与对应深度桩间土特征值来判断成桩质量和粉喷桩的有效使用桩长。轻型触探和标准贯入试验还可以确定不同龄期、不同深度桩体的强度变化和桩身方向上的均匀性。由于桩体截面强度的不均匀性，以上三种方法都易于出现探杆偏斜现象，当探杆轴线方向与桩体轴线方向相差较大，试验结果不能反映桩体的实际情况。

4. 钻探取芯法

该法不受深度限制，可根据桩芯直接检验桩的连续性、均匀性、密实度、桩长、端承条件等，也可以桩芯制成试块进行强度测试，还可以通过对桩芯、相应位置原状土以及水泥采用 X 荧光定量分析法分别进行化学成分分析而测定水泥土中水泥含量，必要时可采用扫描电镜等物相分析方法研究水泥土的微观结构、水化水解程度。另外，粉喷桩桩身无侧限抗压强度可达 1～3MPa 并具有一定的水稳性，物理力学性质与软岩相似，因此也可以参照岩体完整性评价方法，根据岩芯采取率进行桩身完整性评价。

该法对桩身质量的评判既根据感官特性，又有试验分析数据，但要做到准确地定量评价相当困难。水泥土强度远大于天然土样，但比岩石或混凝土却小得多。用取土样的设备不能取得强度较高的水泥土样，而现有的岩石取芯设备由于钻杆的同心度不够等原因，钻取岩芯过程中发生频繁地抖动，这种抖动和钻具的挤压以及钻取过程中的扭力作用对强度相对较低的偏脆性且均匀性较差的水泥土造成不可避免的损伤，难以取得稳定的取芯率和完整样品。在岩芯的搬运和整理过程中，也不可避免地使其受到损伤。因此，取芯进行抗压强度试验得到的水泥土强度与桩体实际强度的相关性受到很大影响，其强度往往比实际水泥土强度低很多且离散性大，虽然可以视取芯对桩芯的破坏程度乘以适当的系数，但破坏程度的判断和系数的选取具有主观性。

粉喷桩桩芯强度指标由标贯试验或取样作抗压强度试验量化。粉喷桩在不同地层中成桩效果不同，取芯难易程度也相差很大：粘粒含量较高、水泥土搅拌均匀的地层，岩芯采取率高、完整性好；粉粒含量多的土层，钻进取样过程中易于扰动破碎，岩芯采取率较低、

完整性较差；淤泥质土中的试件，由于钻机的扭力常造成岩芯出现裂缝，无法作进一步的力学性能试验。因此，对钻进取芯的工艺和设备还必须进一步加以研究。

对于粉喷桩来说，由于桩体中心被钻杆占据而成为喷灰盲区，桩心部位强度较低，向周边逐渐增高，因此，若钻杆偏斜而钻取的试样位于桩心部位，则试验数值偏低。若钻杆轴线方向与桩体轴线相差较大时，岩芯易沿 45° 断成小段而难以获得较完整的岩芯或一半岩芯、一半土。

该法设备笨重、工作量大、工期长、成本高，因此，检测数量少、随机性大，代表性和可靠性受到影响。取芯测试岩芯强度要在龄期 28 天以后，因此，不能及时对施工进行验证和指导。

5. 静载荷试验

一般认为：静载荷试验可以较好地模拟桩身实际受荷条件，既可检测承载能力，又可了解变形特性，因而被认为是最可靠的方法，各种规范都以该法作为标准方法。该法虽然可以从承载能力和变形性能上反映桩身质量，但它只能从总体上判断粉喷桩桩身质量。

单桩复合地基静载荷试验与载荷板密切相关。当载荷板的形状和尺寸与复合地基基本单元块不符时，会改变其边界条件，相当于改变了桩的布置方式和桩土置换率，试验单元块不能代表原设计。载荷板应按照桩的布置来选择，但实践上难以做到，虽然对试验结果可以修正，但可靠程度值得怀疑。再者，载荷板大小、加载值和荷载维持时间的限制使检测深度受到限制，常常给人以软弱地基只需作一些浅层处理即可的假象，地表有硬壳层时尤其如此。事实上，地表硬壳层较厚时，试验结果将会失真甚至失效，这应当引起足够重视。单桩复合地基静载荷试验只能在总体上反映影响深度范围内的桩身缺陷，对于较长的桩，该法对桩体下部的缺陷不敏感。由于桩体的变形、轴力和侧摩阻力主要集中于桩顶 $7d$ 左右的深度内，此下则随外荷的增加变化较小，所以，由承载力控制的复合地基，桩体下部的缺陷对桩体的承载能力影响不大，可以认为其适应性未受到太大影响，但由沉降量控制或有抗震要求的复合地基，桩体下部缺陷则不容忽视。另外，由沉降量控制的复合地基，由于单桩复合地基沉降量与实际复合地基沉降量之间并没有明确的数值关系，此时用静载荷试验检验复合地基是否满足要求已失去实际意义，这应引起足够重视。

由于柔性基础下的粉喷桩存在向上刺入现象，相对于刚性基础来说，柔桩间土可以承担更大的荷载，桩与桩间土的变形并不完全协调，因此，常规的复合地基静载荷试验不能模拟柔性基础下的粉喷桩复合地基的边界条件和作用机理。

因桩体强度的限制，多数工程桩中心距在 $2d$ 左右。由于粉喷桩为摩擦桩或端承摩擦桩，群桩效应不容忽视。单桩复合地基的受力机理与多桩复合地基虽然相似，但群桩中桩的工作状态与单桩截然不同，单桩沉降远小于群桩，群桩承载力也非单桩之和，单桩复合地基静载荷试验并不能准确地反映复合地基的整体效果，其结果也总是随试验时间、条件和环境的不同而有所不同。

静载荷试验设备笨重、工期长、操作繁琐、成本高，不可能进行大面积普查，检测数量少、随机性大，试验结果的可靠性和代表性都受到影响。该法的检验结果可提供单桩或复合地基承载力，但不能给出破坏位置，不能提供哪些土层中桩的固化及配方或施工工艺不适应，不能为指导后续施工提供更多信息。静载荷试验还需在成桩 28 天后才能进行，对施工缺乏及时的验证指导。

6. 小应变反射波动测法

该法基本原理是在桩顶竖向瞬态击振，弹性波沿桩身向下传播，当桩身存在明显的波阻抗差异界面或桩身截面积变化部位，将产生反射波，经桩顶传感器接收放大、滤波和数据处理，识别来自桩身不同部位的反射信息，据此计算桩身波速，根据波速估算水泥土强度、阻尼比和截面完整性系数。利用纵波波速和阻尼比可以评价桩的质量；根据截面完整性系数、波形和频谱等特征可以评价桩的完整性，还可以根据视波速和桩底反射波到达时间对桩的实际长度进行粗略判断。

小应变动测因粉喷桩强度和弹性模量较低而波速低、衰减快，测试效果受到影响，仅对于长径比不太大、桩身强度高且均匀性好的桩效果较理想。而大多数粉喷桩由于施工中的各种因素，出现最多的缺陷是固化剂与土搅拌不匀，断面上表现为：水泥土团块与土块同时存在而使波形与锤击位置和接收位置有关且该法还无法反映这种缺陷，在桩长方向上产生诸如断桩或类似断桩等现象，又由于地层土质的不同、水泥土固化程度的不一致也会造成桩体强度沿桩长方向上的不一致且常以渐变形式出现，再者桩身强度原本不高，桩底反射常不明显或根本不会出现，对桩身下部状况的反映也不很明显，易造成漏判或误判。当粉喷桩以摩擦桩的形式起作用时，桩身受力主要集中于 7 倍桩径深度内，深处的缺陷对桩承载能力影响不大，可以说部分实现了普查目的，但对具端承性的粉喷桩，深处的缺陷则不容忽视，另外，从抗震角度，深处的缺陷也不容忽视（这在目前常常被忽视）。如果深处的缺陷太多、性质严重，即使是摩擦性桩也是不允许的。

该法能从多个方面反映成桩质量，不受场地条件限制，方便、经济、迅速，能用于桩身质量普查和跟踪，但目前只能粗略估算桩身长度和定性检查桩身中上部是否有较大缺陷，在定量方面尚不能给予满意的解答，对长径比超过一定限度的深部缺陷桩、极浅部或太小的缺陷以及全截面断桩以下的桩身质量探测还难以解决，当桩身存在多个缺陷时，深部的缺陷也容易误判。

由于粉喷桩自身的不均匀性、作用机理的复杂性、低强度、低波速、低阻尼比和波传播的高衰减性以及该法自身的不成熟决定了对检测人员的素质要求高，而目前国内真正胜任的单位和个人并不多。另外，该法的评判目前尚无统一标准，主观性、随意性都很强。这些大大限制了该法的应用和发展及其准确性。该法还需在成桩至少 15 天之后进行，对施工缺乏及时的验证指导。

7.地质雷达法

地质雷达扫描法是一种快捷的宏观检测手段。运用地质雷达扫描法对粉喷桩桩身质量进行检测，只要场地平整、桩头中轴线清晰，一条 40m 长的测线只需 20min 左右。测线可以在任意方向布置，从而控制总体施工质量情况，该法还具有对地表和地下无任何破坏作用、探测速度快、简便灵活、经济有效和以图像实时显示等优点，且由于采用了宽频短脉冲和高采样率等技术，而具有检测分辨率高的优点。但目前该法也只能用于定性反映桩体的质量特征且应用经验有限。

8.波速试验法

在假定地基土为弹性半空间的前提下，测定某种弹性波在地基土中的波速，就可相应地推求土的弹性性质参数 E、G、μ。利用这一方法可测定复合地基的弹性性质参数 E_c、G_c、μ_c。分析比较 E、G、μ 和 E_c、G_c、μ_c，可以定性评判复合地基的整体效果，但很

少用于粉喷桩复合地基。

三　结束语

目前粉喷桩质量检测方法虽为数不少，但并不完善，各有优缺，不可偏废，应根据不同情况选择不同的检测方法组合起来，扬长避短，进行综合检测和评价，使之相互补充和验证，这是目前提高粉喷桩复合地基检测质量的有效途径。对此，由于篇幅限制，将另文探讨。

参考文献

[1] 曹建春：《利用深层搅拌法加固软土地基工程实践及成桩施工质量检测方法初探》，见《首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集》，杭州，浙江大学出版社。

[2] 刘镇亚：《粉喷桩在高速公路软基处理的施工与检测》，见《高速公路软弱地基处理理论与实践》，上海，上海大学出版社，1998。

[3] 张季超主编：《基础处理与检测实录》，北京，中国建筑工业出版社，1998.9。