

级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径比较分析

齐俊修¹, 赵晓菊¹, 刘 艳¹, 张中炎², 张广禹³

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京 100024;

2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300204; 3. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450008)

摘 要: 粗细颗粒区分粒径是级配不连续碎砾石细粒含量判别法判定渗透变形类型重要指标, 目前通常使用的有定值法的 2 mm 和颗粒级配曲线中平缓段最小粒径(平均粒径), 为进一步验证这 2 个典型方法和量值的符合性、适宜性, 统计了 26 个工程 121 个试样的渗透变形试验结果进行比较。结果表明: 2 种方法和量值的渗透变形类型判断结果与试验结果符合率较高, 分别为 85.5% 和 84.6%, 均可作为粗细颗粒区分粒径, 但若和级配连续碎砾石渗透变形类型判断综合考虑, 推荐 2mm 作为级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径。

关键词: 级配不连续; 碎砾石; 粗细颗粒区分粒径; 最小粒径; 比较分析

中图分类号: TU521.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)01-0227-05

Comparative Analysis on the Determination of Coarse and Fine Particle in Discontinuously Graded Crushed Gravels

QI Junxiu¹, ZHAO Xiaojun¹, LIU Yan¹, ZHANG Zhongyan², ZHANG Guangyu³

(1. Power China Beijing Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China;

2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300204, China;

3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450008, China)

Abstract: The determination of coarse and fine particles are the important indexes of determining the permeability deformation types of discontinuously graded crushed gravels. The commonly adopted methods recently are the constant 2 mm value method and the minimum particle size (average particle size method) in the flat section of gradation curve. In order to further verify the consistency and adaptability of the two methods and the values, comparative analysis has been conducted on the permeability deformation test results of 121 samples which were taken from 26 projects. It shows that the consistency ratio of the judged result and test result is high, which is 85.5% and 84.6% respectively. According to comprehensive consideration on the judgment of permeability deformation type of continuously graded crushed gravel, the particle size of 2 mm is recommended as the distinguished size of coarse and fine particle of discontinuously graded crushed gravels.

Keywords: discontinuous gradation; crushed gravel; distinguished size of coarse and fine particles; minimum particle size; comparative analysis

土的渗透变形评价包括土的渗透变形类型的判别, 流土和管涌的临界比降的确定, 土的允许水力比降的确定^[1-3], 其中土的渗透变形类型的判别是基础。

土的渗透变形类型的判别与确定, 除试验判定法之外, 还有理论与经验判别法, 如不均匀系数判别

法, 基于反滤层设计理论判别法, 细粒含量判别法、颗粒级配曲线判别法等^[4-5], 其中细粒含量判别法应用较为广泛。

细粒含量判别法认为, 无黏性粗粒土由粗颗粒和细颗粒组成。粗颗粒起骨架作用, 细颗粒起填充作用。粗颗粒和细颗粒之间的分界粒径被称为粗细

颗粒区分粒径,简称区分粒径。区分粒径在细粒含量判别法中占重要地位。为此,很多学者对区分粒径进行了研究,概括起来主要有 2 种方法,一种方法为定值法,即将土的颗粒级配曲线中某一固定数值作为区分粒径,如 2 mm、5 mm 和 1 mm,其中 2 mm 被多数学者采用^[6-11],另一种方法为变值法,即利用土的颗粒级配曲线中的几何平均粒径 $\sqrt{d_{70}d_{10}}$ 作为粗细颗粒区分粒径(d_{70} 为土中小于该粒径的土重占总土重的 70%, d_{10} 为土中小于该粒径的土重占总土重的 10%)^[12],一些文献认为,区分粒径的确定,应和土的颗粒级配特征相结合,对连续级配无黏性粗粒土,一些文献主张区分粒径采用 $\sqrt{d_{70}d_{10}}$ ^[1-3,12-13],另一些学者则主张区分粒径采用 2 mm^[6-11]。对于级配不连续的无黏性粗粒土,一些文献主张区分粒径采用以平缓段(指级配曲线中至少有一个以上的粒径级的颗粒含量小于等于 3%级配段)粒径级的最大和最小粒径的平均粒径区分或以最小粒径为区分粒径,相应于此粒径的含量为细颗粒含量^[1-3,12]。这些文献同时指出,对于天然的无黏性粗粒土,不连续部分的平均粒径多为 2 mm。由此我们认为,可否直接用 2 mm 作为级配不连续无黏性粗粒土的区分粒径呢?若可行,则可以和不均匀级配连续的粗粒土统一用 2 mm 作为区分粒径,由此可大大简化区分粒径确定方法。

为了验证我们的设想,本文收集了 26 个工程 121 个试样的完整的级配不连续无黏性粗粒土碎砾石的渗透变形试验资料,将以 2 mm 和以平缓段粒径级的最小粒径为区分粒径所判定的不连续级配碎砾石的渗透变形类型与实际试验结果进行比较,结果表明,用 2 mm 作为级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径时,与试验结果相比,其符合率为 85.5%,用平缓段粒径级的最小粒径为区分粒径时,其符合率为 84.6%,两者符合率极为接近,仅相差 0.9%。显然,用 2 mm 作为级配不连续碎砾石的粗细颗粒区分粒径是可行的,适宜的。

1 级配不连续无黏性粗粒土粗细颗粒区分粒径的基本规定

为使以 2 mm 和以平缓段粒径级最小粒径作为粗细颗粒区分粒径时所确定的渗透变形类型具可比性、一致性,特作以下基本规定:

(1) 所有参与比较分析的土类均为碎砾石,且级配不连续,所谓级配不连续即指级配曲线中至少有一个以上的粒径级的颗粒含量小于或等于 3%的

平缓段。

(2) 细粒含量判别法渗透变形类型确定准则为:细粒含量 $P_c < 25\%$ 时为管涌, $25\% \leq P_c < 35\%$ 时为过渡, $P_c \geq 35\%$ 时为流土。不论区分粒径为 2 mm 还是区分粒径为平缓段粒径级的最小粒径均按上述原则进行判断。

(3) 将综合判定试验结果不准确的试样从统计试样中扣除,并以扣除后的总试样数为基数进行符合率计算。

按上述方法对渗透变形类型判定结果与试验结果一致时为符合,不一致时为不符合。由此,计算符合率指标并加以比较。

需要说明的是,参与统计分析试样风化程度均为微、弱风化。

2 级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径按平缓段特征粒径统计结果

级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径按平缓段特征值取值,实际执行时,还比较复杂,我们认为应对文献规定进行细化,具体细化意见如下:

(1) 当级配曲线中仅有一个粒径级颗粒含量小于或等于 3% 的平缓段时,粗细颗粒区分粒径以最小粒径为区分粒径。

(2) 当级配曲线中有 2 个连续粒径级颗粒含量小于或等于 3% 的平缓段时,粗细颗粒区分粒径以上下粒径级连续粒径为区分粒径,有 3 个连续粒径级颗粒含量小于或等于 3% 的平缓段时,粗细颗粒区分粒径按颗粒从粗到细的第 2 个和第 3 个粒径级连续粒径为区分粒径;有 4 个连续粒径级颗粒含量小于或等于 3% 的平缓段时,粗细颗粒区分粒径按颗粒从粗到细的第 2 个和第 3 个粒径级连续粒径为区分粒径。

(3) 当级配曲线中有 2 个或 2 个以上粒径级颗粒含量小于或等于 3% 的平缓段且不连续时,以最靠近 5 mm ~ 2 mm 粒径级的平缓段最小粒径为区分粒径。

按以上 3 条原则统计的 121 个试样的粗细颗粒区分粒径分布情况见表 1。

表 1 统计试样粗细颗粒区分粒径分布情况					
粒径/mm	10	5	2	0.5	0.25
试样数/个	2	11	58	12	38
占百分比/%	1.7	9.1	47.9	9.9	31.4

表 1 结果表明:(1) 区分粒径为 2 mm 时,出现

概率最高,但尚不足 50%(本次统计为 47.9%),(2) 区分粒径为 0.25 mm 时,出现的概率也较高,达 31.4%;(3) 区分粒径最大值为 10 mm,其出现概率为 1.7%,其值按文献[10-11]粒组划分,已属中砾之中值;(4) 本次统计区分粒径值的分布范围为 0.25 mm~10 mm,分布范围仍显较大。

3 级配不连续无黏性碎砾石的颗粒级配及渗透变形类型判定结果

3.1 级配不连续碎砾石颗粒级配及曲线形态特征

研究表明,无黏性粗粒土的颗粒级配及颗粒级配曲线形态是其渗透变形类型的决定因素。本次级配不连续碎砾石颗粒级配曲线按渗透变形类型管涌、过渡和流土三类分别统计,并绘制其颗粒级配上下包线及平均线,见图 1~图 3。

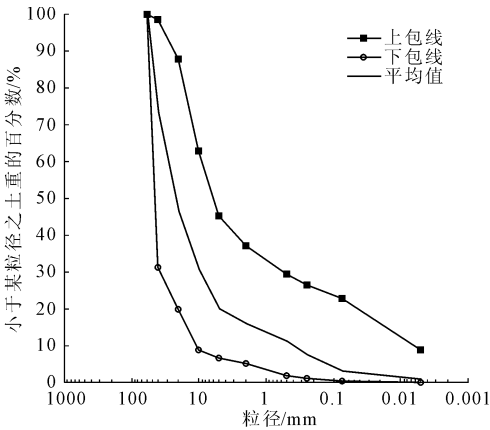


图 1 管涌破坏试样颗粒级配包络线

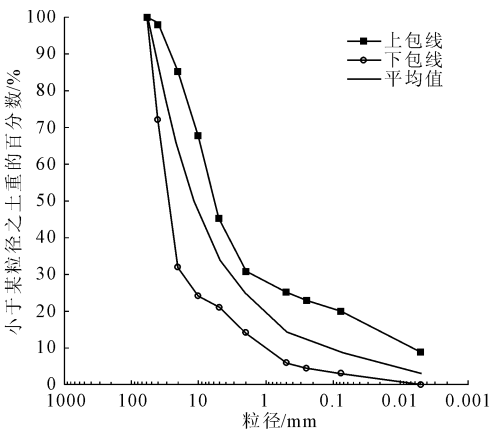


图 2 过渡破坏试样颗粒级配包络线

图 1~图 3 表明,管涌类土的颗粒级配下包线和平均线小于 2 mm 颗粒含量均小于 25%,但上包线大于 25%;过渡类土的颗粒级配平均线及上包线小于 2 mm 含量在 25%~35%之间,但其下包线小

于 25%;流土类土的颗粒级配上包线小于 2 mm 颗粒含量大于 35%,但其下包线和平均线小于 2 mm 颗粒含量则小于 35%。

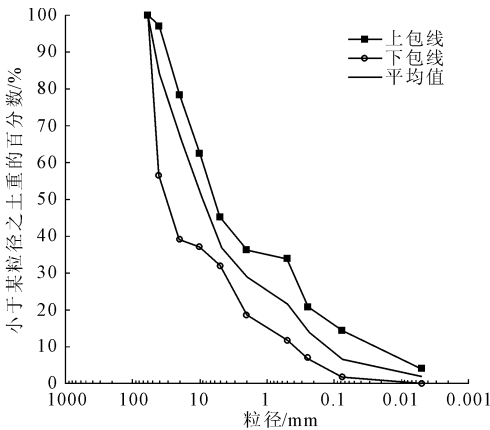


图 3 流土破坏试样颗粒级配包络线

3.2 级配不连续碎砾石渗透变形类型比较结果

为比较以 2 mm 为粗细颗粒区分粒径和以平缓段最小粒径为区分粒径时判定的渗透变形类型与实际渗透变形试验结果的一致性 or 符合率,我们编制了级配不连续碎砾石渗透变形试验结果及以 2 mm 和以平缓段最小粒径为区分粒径时的细粒含量判别法渗透变形类型判别结果对照表。限于篇幅,我们仅将 121 个试样试验结果中的少部分列于表 2,从表 2 可以明显地看出 2 种区分粒径的细粒含量判别法结果与实际试验结果的一致性 or 符合率。

将所有 121 个试样的渗透变形试验结果按表 1 要求列表,然后统计出 2 种不同区分粒径时判定的渗透变形类型与实际试验结果的符合率,结果见表 3。

从表 3 可以看出,以 2 mm 为区分粒径和级配曲线最小粒径为区分粒径时判定的渗透变形类型与实际试验结果一致性比较接近,前者为 85.5%,后者为 84.6%,前者仅比后者多出 0.9%。

4 细粒含量判别法判定之渗透变形类型与试验结果不一致性原因分析

通过对 2 种不同粗细颗粒区分粒径时判定的渗透变形类型与试验结果比较分析,我们发现 2 种情况应理解为与试验结果不一致的主要原因,这 2 种情况分别为:一种为符合反滤设计准则且符合当细粒含量 $P_c < 25\%$ 时,且 $D_{15}/d_{85} < 5$ 时,当细粒含量 $P_c > 35\%$ 时, $D_{15}/d_{85} > 5$ 时;另一种为综合判定试验结果为错误结果时。

表 2 区分粒径为 2 mm 和以平缓段最小粒径的细粒含量判别法与试验结果对比表

试样 编号	试验 干密度 /(g·cm ⁻³)	曲率 系数	不均匀 系数	临界 ^① 比降	破坏 ^① 比降	破坏 ^① 型式	< 2 mm ^② 含量/%	破坏 ^② 型式	区分 ^③ 粒径 /mm	小于最小 ^③ 粒径的含量 /%	破坏 ^③ 型式
H - SDTJ2	2.10	2.40	18.3	0.37	0.58	管涌	11.3	管涌	0.50	8.3	管涌
H - SDTJ3	2.11	2.64	20.0	0.60	1.00	管涌	11.5	管涌	0.25	6.3	管涌
H - HKTJ2	2.02	3.40	46.6	0.60	1.75	管涌	28.2	过渡	2.00	28.2	过渡
H - KCTJ1	2.02	3.06	34.6	0.40	0.70	管涌	17.8	管涌	0.25	8.1	管涌
N - SBJ16 - 2	2.22	0.85	154.0	0.44	1.77	管涌	31.5	过渡	0.25	24.4	管涌
N - SBJ17 - 2	2.20	8.58	140.0	0.19	0.73	管涌	23.3	管涌	0.25	15.5	管涌
SH - BST8	1.66	1.91	588.0	0.32	0.38	管涌	37.3	流土	0.25	26.4	过渡
SH - BSJ9	2.08	8.70	80.0	0.24	0.44	管涌	17.7	管涌	2.00	17.7	管涌
SH - BSJ10	2.05	7.83	133.0	0.24	0.36	管涌	24.1	管涌	2.00	24.1	管涌
SU - TC14	2.55	0.51	31.4	5.17	6.37	流土	33.0	过渡	0.25	20.6	管涌
L - HC05	2.11	3.50	80.0	0.34	0.71	管涌	27.1	过渡	0.25	24.4	管涌
L - HC06	2.13	3.90	71.4	0.42	0.73	管涌	22.2	管涌	0.25	21.0	管涌
Y - FG6	2.21	4.70	132.5	0.25	0.42	管涌	27.4	过渡	2.00	27.4	过渡
Li - ST1	1.92	30.90	2769.0	1.57	3.11	过渡	30.3	过渡	0.25	22.9	管涌
Li - ST2	1.93	42.70	2200.0	1.70	3.41	过渡	29.1	过渡	0.25	21.5	管涌
Z - 上包	2.09	0.14	68.1	0.72	1.03	流土	36.2	流土	0.50	33.9	过渡

注:限于篇幅,未将原对照表中所有试验结果统计在内;①代表试验结果;②代表小于 2 mm 细粒含量法判定;③代表平缓段区分粒径判定。

表 3 不同区分粒径方法判定结果与试验
结果对比(总计 121 个试样)

统计区分粒径类别	2 mm	平缓段最小粒径
符合试样数/个	100	99
符合率/%	85.5	84.6

注:计算符合率指标时,将综合判断试验结果不准确试样从统计试样中扣除,并此为计算基数。本次统计样品中有 4 个属综合判断不准确样。故最终参与统计的试样为 117 个。

分述如下:

(1) 当级配不连续碎砾石细粒含量 $P_c < 25\%$, 且 $D_{15}/d_{85} < 5$ 时其渗透变形类型不遵循细粒含量判别法判别准则,即其渗透变形类型不是管涌而是非管涌,即遵循了反滤设计准则;同样细粒含量 $P_c > 35\%$ 时, $D_{15}/d_{85} > 5$ 时则其渗透变形类型也不遵循细粒含量判别法判别准则,即其渗透变形类型不是流土而是管涌,即遵循了反滤设计准则。

总之,凡是级配不连续碎砾石颗粒级配符合上述反滤设计准则时,则其渗透变形类型不符合细粒含量判别法判别准则,因而影响了与试验结果的符合率。本文统计的 121 个试样中,有 15 个试样符合上述反滤设计准则,占总统计试样的 12.4%,具体比较结果见表 4。上述之不符合是细粒含量判别法本身缺陷造成的。

(2) 少量渗透变形试验结果不准确,因而导致细粒含量判别法判定的渗透变形类型与试验结果不

符,这种不符合不是细粒含量判别法本身原因造成的,因此,我们认为,此类试样数不应参与符合率统计。本次统计样品中试验结果错误的有 4 个,占总试验样品 3.3%。综合判定少量试验结果错误的试样见表 5。

综合判断试验结果不准确的标准是,在表 5 中 3 个判断土的渗透变形类型方法中,有 2 个或 3 个判断结果与试验结果不一致时,即认为试验结果不准确。

5 级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径分别为 2 mm 和平缓段最小粒径时优缺点比较

以 2 mm 作为粗细颗粒区分粒径,进行细粒含量判别法判定土的渗透变形类型时,通常具有以下 3 个优点:(1) 与试验结果比较符合率较高;(2) 区分粒径为定值,易确定;(3) 物理意义明确,是工程地质和土工试验规程中土分类指标砂与砾的分界粒径^[14-15]。

以级配不连续碎砾石颗粒级配曲线中平缓段最小粒径为粗颗粒区分粒径进行细粒含量判别法判定土的渗透变形类型时,通常具体一下优点:(1) 与试验结果相比较,符合率较高;(2) 区分粒径易确定,只需按定义确定即可;(3) 具有统计学依据,已积累了大量试验数据。但也存在一下问题:有些试样的

粗细颗粒区分粒径太大,如安宁第 2 层 ZKK07 样,其区分粒径为 10 mm,明显偏粗;有些试样的粗细颗粒区分粒径较细,如有多达 30.5% 的试样。其区分粒径仅为 0.25 mm,明显偏细。

表 4 符合反滤设计准则当 $P_c < 25\%$ 时 $D_{15}/d_{85} < 5$ 、 $P_c > 35\%$ 时 $D_{15}/d_{85} > 5$ 试验成果汇总

试样 编号	试验 干密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	曲率 系数	不均 匀 系数	临界 ^① 比降	破坏 ^① 比降	破坏 ^① 型式	< 2 mm ^② 含量/%	破坏 ^② 型式	区分 ^③ 粒径 /mm	对应小于 ^③ 此粒径的 含量/%	破坏 ^③ 型式	D_{15}/d_{85} ^④	破坏 ^④ 型式
Sh - BSJ8	1.66	1.91	588.0	0.32	0.38	管涌	37.3	流土	0.25	26.4	过渡	7.0	管涌
A - 15 #	2.13	12.30	110.5	1.11	1.62	管涌	36.6	流土	2.00	36.6	流土	11.0	管涌
X - NJ1 - 34	2.14	0.64	22.2	0.86	—	管涌	38.7	流土	5.00	41.6	流土	40.9	管涌
B - 4	2.22	3.88	27.6	0.18	0.90	过渡	19.0	管涌	0.25	6.0	管涌	4.6	非管涌
B - 7	2.22	5.53	56.0	—	2.37	流土	18.4	管涌	0.25	9.9	管涌	3.9	非管涌
Z - B24	2.29	2.49	31.7	0.90	1.65	过渡	18.3	管涌	0.25	5.8	管涌	4.2	非管涌
B - 6	2.22	3.81	32.4	0.65	2.08	过渡	15.8	管涌	0.25	8.1	管涌	4.4	非管涌
Sa - SD2	2.28	2.89	66.7	—	0.88	过渡	24.0	管涌	0.25	12.0	管涌	5.0	非管涌
N - SBJ16 - 2	2.22	0.85	154.0	0.44	1.77	管涌	31.5	过渡	0.25	24.4	管涌	13.0	管涌
L - SBZ1	2.27	87.40	1692.3	0.17	0.56	管涌	27.0	过渡	2.00	27.0	过渡	25.5	管涌
Y - FG6	2.21	4.70	132.5	0.21	0.42	管涌	27.4	过渡	2.00	27.4	过渡	18.3	管涌
L - SBN6	2.30	258.20	2656.3	0.11	0.33	管涌	27.8	过渡	0.50	27.6	过渡	66.7	管涌
S - NJ1 - 30	2.15	0.14	307.7	0.21	—	管涌	33.7	过渡	2.00	33.7	过渡	27.9	管涌
W - C4	2.24	4.40	208.6	—	0.19	管涌	25.0	过渡	2.00	25.0	过渡	21.1	管涌
Su - TC14	2.55	0.51	31.4	5.17	6.37	流土	33.0	过渡	0.25	20.6	管涌	4.1	非管涌

注:①~③与表 2 相同;④代表反滤设计准则判定。

表 5 综合判断试验结果不准确试样汇总

试样 编号	试验 干密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	曲率 系数	不均 匀 系数	临界 ^① 比降	破坏 ^① 比降	破坏 ^① 型式	< 2 mm ^② 含量/%	破坏 ^② 型式	区分 ^③ 粒径 /mm	对应小于 ^③ 此粒径的 含量/%	破坏 ^③ 型式	D_{15}/d_{85} ^④	破坏 ^④ 型
Z - 混上包	2.25	5.50	49.2	0.71	—	过渡	17.0	管涌	5.00	27.0	过渡	7.0	管涌
Z - 混平	2.25	11.30	37.6	0.58	—	过渡	14.0	管涌	5.00	21.0	管涌	9.3	管涌
L - HC05	2.11	3.50	80.0	0.34	0.71	管涌	27.1	过渡	0.25	24.4	管涌	3.1	非管涌
A - ZKK07	—	0.51	136.7	0.96	1.39	流土	29.0	过渡	10.00	37.0	流土	16.9	管涌

注:①~④代表含义与表 4 相同。

6 结 语

通过对 26 个工程 121 个试样渗透变形试验结果与以 2 mm 和级配不连续碎砾石颗粒级配曲线平缓段以最小颗粒为区分粒径时进行细粒含量判别法判定渗透变形类型比较分析,得出以下主要认识:

(1) 以 2 mm 和以颗粒级配曲线平缓段最小粒径为粗细颗粒区分粒径时进行渗透变形类型判别时,其与试验结果的符合率均较高,分别达 85.5% 和 84.6%。

(2) 区分粒径值均较容易确定,相比之下,定值法之 2 mm 更易确定。

(3) 以 2 mm 作为粗细颗粒区分粒径,物理意义明确,为工程地质和土工试验规程中土的分类指标

中砂和砾的分界粒径。

(4) 以颗粒级配曲线平缓段最小粒径为粗细颗粒区分粒径,已积累了大量资料,有充分依据。

(5) 综上所述,作者认为 2 mm 和级配曲线平缓段最小粒径均可作为级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径。但若和级配连续碎砾石渗透变形类型判断综合考虑,作者推荐 2 mm 作为级配不连续碎砾石粗细颗粒区分粒径。

参考文献:

[1] 彭土标,袁建新,王惠明,等.水力发电工程地质手册[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
[2] 中华人民共和国建设部.水力发电工程地质勘察规范:GB50287-2006[S].北京:中国计划出版社,2006:111-114.