

致密粘土坝的团块填筑 和团块状冲填

苏联 И.Д. 洛巴索夫著

水利水电建设总局技术处译

水利电力出版社

內 容 提 要

用致密粘土筑坝，是一项新的技术，因为在不久以前还认为致密粘土是一种不适于筑坝的土料。本书介绍了苏联在用致密粘土筑坝方面的试验研究成果，同时还介绍了苏联的一座试验性工程的实际施工经验。因此，本书作者不仅从理论上论证了用致密粘土筑坝的可能性，并且以具体实践的结果说明了这种新的筑坝方法的现实性和优越性。

目前我国正在广泛地修筑土坝、土堤及其它土质水工建筑物，一部分地区也是缺乏砂土而只有粘土或致密粘土，也同样存在着本书中所论述的问题，因此本书对我们是有相当参考价值与现实意义的。

本书可供水利水电设计、施工及科研人員使用，亦可供高等与中等技术学校有关专业的师生参考。

П. Д. ЛОБАСОВ
ПЛОТИНЫ ИЗ ПЛОТНЫХ ГЛИН,
ВОЗВОДИМЫЕ СПОСОБАМИ ОТСЫПКИ КОМЬЕВ И КУСКОВОГО НАМЫВА
ОРГЭНЕРГОСТРОЙ КУЙБЫШЕВ 1958

致密粘土坝的团块填筑 和团块状冲坝

根据苏联动力建设组织设计院1958年古比雪夫版翻译
水利水电建设总局技术处译

*

27128711

水利电力出版社出版（北京西郊紫竹院路二里沟）

北京市书刊出版业营业许可出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 开本*2 $\frac{1}{2}$ 印张*51千字

1960年3月北京第1版

1960年3月北京第1次印刷(0001—2,920册)

统一书号：15143·1885 定价(第9类)0.26元

目 录

緒論.....	2
第一章 致密粘土筑坝的新方法.....	5
第二章 致密粘土的物理力学特性.....	12
第三章 用致密粘土团块填筑法筑坝的基本要求.....	17
第四章 辛菲罗波尔水库用亚普第致密粘土团块法 筑坝的经验.....	26
第五章 致密重粘土团块冲填法筑坝.....	49
第六章 新筑坝方法的采用范围及其技术经济的 优越性.....	64
参考文献.....	72

緒 論

1. 概 要

为了实现苏联水工建設的宏偉計劃，目前大量地兴建着土坝、土堤等土工建筑物。这些建筑物修筑在不同的自然条件下，常在缺乏砂土、只有粘土或致密重粘土的地方。

国内外的建筑經驗証明，用当地材料(砂、粘土、块石)建筑非溢流坝是最經濟的。因之，采用这些当地材料大有前途。但是，至今用于修筑土坝的还只有几种天然粘土。

土质建筑物的建設任务仅仅用現有的施工方法是不能完成的。施工实践迫切要求研究出更加完善、更为經濟的新的土坝施工方法，使之有可能利用一切的当地材料，包括目前尚认为是不适用的土料。

本书从理論上論証了采用作者提出的新的筑土坝方法的结果。采用这种方法第一次能够在修筑高水头土质建筑物中采用半固体的、难于崩解的原生重粘土。

作者对經常关心和指导本书的苏联科学院通訊院士H.A. 崔托維奇表示深深的感激。本书蒙承苏联科学院通訊院士B.A. 弗洛林和全苏水力工程与卫生工程科学研究所实验室主任、技术科学博士O.A. 薩韦諾夫对本书提出宝贵意見，謹此表示感謝。

2. 关于用粘土筑輾压式土坝的意見

筑坝中無論是采用輾压法或其他的方法压实粘土，都是很

繁重的。土的粘性、密度及結構强度愈大以及湿度愈小，压实工作来得愈加困难，甚至在力学上是不可能达到的。因此，在設計和建筑碾压式土坝时，一般不建議采用重粘土以及天然含水量小的粘土和壤土，因为这在坝体分层碾压时会发生困难。

土方工程施工技术规范規定，土坝坝体内不可填筑未破碎的土块(团)，必須将土块打碎，分层压实到設計的密实度。用粘土筑坝时需要用重型設備，并花費很多的劳动。根据建筑法規的規定，用重粘土堤坝的高度不得超过4米。

致密的、含水量小的原生重粘土，由于具有結構强度并在料場开采时常分成团块，故在大多数的情况下一般是不能用碾压法打碎和压实的。这就不得不拒絕采用这种粘土，而到远处的料場去开采不太密致的土，从而大大地提高了造价。这种限制是降低造价和減輕水工建筑繁重程度的严重的障碍。

3. 关于冲填土坝中使用粘土的限制

人們认为，对于冲填的堤坝只可采用含少量粘土顆粒的土料。在許多文章、技术规范及指示中，規定細砂土中粘土顆粒的含量不应超过3~5%〔参考文献4、5、6、9、16等〕。

近来已肯定可以用砂壤土和輕質粘壤土筑冲填坝〔参考文献11、12〕。但是进一步扩大适于冲填的土料的范围，要求制訂新的原則上不同的冲填建筑物的建筑方法。

在工程中利用粘性土料冲填堤坝受到的限制，使高效率的、經濟的水力机械化方法的使用范围窄小。这一方法仅仅是在有砂土或砂壤土料場的地方才被采用。在有致密粘土料場的地方，甚至不提出用这种土料筑坝的問題，认为这在技术上是不可可能的，是与公认的概念相矛盾的。

过去认为不能用致密粘土筑冲填式建筑物的想法，是由于

缺乏这方面必要的施工經驗。

众所周知，目前在用水力机械化方法进行大量的水下开采中，致密粘土經常弃掉，而建筑物却用增辟料場的砂土冲填。这样，工程量以及土质建筑物的造价往往增加很多。

4. 致密粘土使用問題的現况

A.Φ.列別捷夫对粘土物理性質进行了深入的研究后得出結論：填筑粘土时，为了获得較高的密度，必須用很大的力，一下子就将粘土的結構单元破坏，而不管其含水量如何〔参考文献7〕。

1948年召开的第一次全苏路基設計与施工會議上，注意了用天然密度大的土料建筑土质建筑物的不良影响〔参考文献15〕。开采和疏松致密土料以填筑土堤时，只是部分地将其破碎，仍有保持天然密实度的团块。輾压时坚固的团块是不会破碎的，因此土堤本身不是整体的。

M.M.費拉托夫、B.И.涅查耶夫、B.И.波諾馬列夫及其他研究者也得出相同的結論，并指出，由于粘土的密实度很大、含水量少及其結構性和成块性，故它不适宜用来筑堤，因为粘土的結構单元不易破坏，如采用輾压法不可能将其压实。

在这些研究者的著作中指出，为了最大程度的压实成块的致密重粘土，必須破坏其結構单元(团块)，为此必需采用很大的压实力和做很多的功。但是粘土在浸湿后由于已扰动的結構单元发生膨脹的压实量，比壤土小得多。

这些經施工經驗所証明的原則，从理論上說明了利用致密重粘土并采用一般的輾压方法筑堤的企图和想法，是不成功的。

第一章 致密粘土筑壩的新方法

1. 新筑壩方法的基本思想

本书作者根据 A.Φ. 列別捷夫及苏联其他一些学者的著作，想到了采用另外一种新的施工方法，这种方法能創造了有助于利用致密重粘土天然特性的条件。

对施工經驗的分析、理論上的研究和实地观测，查明了致密粘土的重要特性——分碎成坚固团块的粘土在一定的物理条件下，在所筑建筑物之內有重新結成致密整体的性能。致密粘土的这一天然特性，即是新施工方法的基础。新的施工方法很容易地解决了过去企图利用致密粘土、用一般方法筑擋水建筑物中所产生的矛盾。

1950~1951年我們提出了根本上与原来不同的原則。这一原則可表述为：难于崩解的致密的、半固体的重粘土，可以用来筑堤壩，其方法是将不同大小的未破碎的团块冲填或填筑在建筑物上。正因为构成建筑物的大的粘土結構单元未被破坏，建筑物才具有很大的密实度[参考文獻10]。

按照我們提出的方法，由于团块的整体化及粘土体固結的結果，冲填式建筑物或輾压式建筑物便达到了密实度及整体性。

2. 用致密粘土筑輾压壩的指示

按新方法筑輾压式土质建筑物时，在土場用挖土机开采致密粘土，填筑土料成块状，尺寸在20~40厘米以上。在开采、

運輸和填筑过程中，小部分土块分裂为小的結構单元，填在粘土团块間的空隙中。

含水量小的致密的硬粘土，填到建筑物上以后加以浸湿，以便使粘土在整体化和固結后的含水量較塑限含水量稍大一些。这样，土壤的饱和度应接近于1。

在粘土填筑层浸湿过程中，大部分水很快就被小团块吸收，而大团块仅仅表面浸湿。水分緩慢地浸入团块里面，致密粘土开始膨脹，沿表面逐漸变軟，而团块里面长久保持着天然含水量及密度。

有利的是，建筑物中的土在不断增长的荷重(填筑层重)的作用下逐漸密实起来和整体化。在該荷重的作用下，輕度湿潤的膨脹的軟粘土团块的外层发生变形，充填于大团块密实部分的間隙中。在永久荷重作用下不均匀的粘土体，进一步地固結和整体化。永久荷重限制着粘土团块基本体的自由膨脹。

粘土的固結和整体化是在水分从过湿区域浸入致密团块里面去的条件下进行的。

A.Φ.列別捷夫及其他研究者研究了在不完全飽和沒有蒸发情况下土壤含水量的調均現象[参考文献8]。呈汽态和薄膜状态的水分，从含水量較大的区域移到含水量較小的区域，一直要进行到含水量(即致密粘土中水膜厚度)几乎相同的时候。

致密粘土中薄膜状态水分的移动，可能是在温度梯度和含水量梯度的影响下进行的；在有些情况下也可能受浸透梯度的影响。在上述情况下水分移动主要是受含水量梯度的影响。

应当认为，在所研究的条件下，土壤中未完全飽和时水分移动的主要原因，是把水膜吸向土壤顆粒表面的分子力[参考文献27]。

在含水量小的致密的重粘土中，很大一部分薄膜状水分可

能成粘着状态[17,27]。薄膜水分移动过程进行缓慢,且其强度取决于土层的均匀性、扩散性、矿物成分、吸收性复合体及其他因素。对这些因素的影响,尚研究得不够。A.Φ.列别捷夫、M.И.高尔得什捷恩及其他研究者,都指出了薄膜状水分移动得很缓慢。根据B.Φ.列尔托夫的资料及我们的试验结果,在不同矿物成分的团块混合物中,这个过程进行得很快〔参考文献18〕。

在我们所研究的情况下,对于许多类粘土来说,团块基本体的膨胀,可能几乎完全受到限制。这取决于固结荷重(建筑物自重)发生的时间、大小及其与粘土膨胀压力之比。

И.И.捷尼索夫指出,未失去强化凝聚力的不过干的结构粘土是不大膨胀的。在某些情况下,如果强化凝聚力阻碍膨胀的话,一般不发生膨胀〔参考文献2〕。

由于含水量逐渐均匀、整体化及固结的结果,整个粘土体变成一个具有预定含水量的整体。整体化及后粘土的密实度比天然土壤的密实度小5~8%。

对上述土体整体化及固结情况加以分析后,应当指出:永久作用的压实荷重增加愈快(团块浸湿后)及增加的数值愈大,则膨胀愈小,土的最终密实度愈大。

粘土团块的尺寸愈大,其外壳膨胀部分愈小,则团块基本体的天然密实度及结构强度保持得愈好。

填筑土中团块愈多及其尺寸愈大,建筑物中土的膨胀单位面积及总体积愈小,浸湿团块外壳及土体整体化的用水也愈少。同时整个建筑物的整体性将在含水量小及密实度大的情况下获得,这就增大了建筑物中土的抗剪强度。

具有强固的结构粘结力(强化凝聚力)的天然含水量的土,其膨胀较小,或者一般不发生膨胀。在形成粘结时经受大压力

的天然含水量的土的膨脹也較小，并且膨脹得緩慢。

粘土中水分移動的速度、膨脹大小、團塊整體化的速度以及土的最終密實度，在頗大的程度上取決於粘土的礦物成分。

筑壩時將會給粘土整體化及固結創造有利的物理條件，因為大的團塊占填筑土總體積的很大一部分。在5~10天內，即在較之薄膜狀水分移動下完全浸濕團塊所需時間短得多的期限內，1.5~2米厚的土層便可形成。因之，任何一層土的固結都是在阻礙其膨脹的條件下進行的。這樣，在用致密粘土團塊筑輾壓式土壩和沖填式土壩時結構的不均勻性（土的成塊性）應消失不見，2~3個月後深1.5~2米以上的土層，便變成整體的、結構與含水量以及密實度幾乎均勻的並且有高度抗剪強度的土體。

上述利用致密粘土的技術原理已為修筑辛菲羅波爾水庫壩的經驗，維帖格拉水電工程中的試驗性冰磧粘土壩的修筑經驗以及使麥擴普致密粘土、薩爾馬特致密粘土和基米里致密粘土等的團塊整體化的試驗工作所証實。在修筑北克里米亞運河上的一些水庫壩時，計劃採用這些土料。

3. 輾壓式土壩的施工

用填筑致密重粘土團塊的方法筑壩^①與眾所周知的輾壓式建築物的施工方法的不同之處，在於下列幾點新的原則：

（1）大部分的致密粘土均成為不同大小的團塊和大塊填入建築物中；

（2）填到建築物上的團塊和大塊粘土，只用輕型平碾輾壓3~4遍，以便緊合在一起。不允許用重型機器輾壓或用其他的

① 創作証書№102927。

方法来破碎粘土团块；

(3) 建筑物的整体性及高的密实度，依靠坝体中粘土团块的整体化（即团块构成的土体随着含水量的重新分配而显著固结）而达到。当计算一定的含水量时和在上层填土重量的作用下，这一过程持续在有限的时间内。

轻度辗压土层是为了保证团块间更加密实地接合在一起，从而为建筑物中粘土团块的整体化创造最有利的条件。同时团块尖角及突出部分被压碎和辗平，使土层中的粘土块密实地接合起来。经过这样初步的压实后，坚硬的团块占土体积的75~80%。再用拖拉机或滚碾辗压，不会压碎轻度辗压层中的坚硬粘土团块，也不能把土层压实，因此这种作法是无益的，不应当采用。

随着筑建筑物的增高，在粘土团块构成的土层中，有了团块整体化及粘土体快速固结的物理条件。构成建筑物主体的团块的整体化，是在膨胀被限制的条件下去进行的。

这个土体整体化的特殊条件仅在填筑团块土时才有具备，它保证建筑物获得高的最终密实度。如果利用专门的重型机器来破碎坚硬的团块，那末建筑物的最终密实度就达不到这样高，因为碎块的重粘土在浸湿时整个体积不受限制地膨胀，不可能用辗压方法将其压实。

因此，采用本方法施工的主要要求，是在建筑物中尽可能地充分地保持团块的天然强度。

在1953~1954年采用这种新方法修筑了辛菲罗波尔水库的高水头拦河坝。这座坝是用致密的半固体的亚普第粘土（下白垩纪的海相沉积）团块筑成的。

4. 冲填填施工的特点

块状土冲填法^①的特点在于：对于各种不同的、难崩解的原生致密粘土，采用水力冲填的方法将这些大小不同的块状土输送和冲填到建筑物中去。

关于该方法的物理实质，可作以下的简要说明。

冲填成的土质建筑物是由乱无规则的、不易崩解的致密粘土团块构成的。大团块间有空隙，部分为崩解成的较小的土块所充填。整个土体为团块和致密粘土块孔隙中的水所饱和。粘土吸收水分，于是在整个致密团块表面便形成柔软的膨胀壳。

随着冲填建筑物不断增高，粘土团块受增长着的上层土的压力，因而填体变得密实。由于膨胀外壳发生变形，粘土块结合得紧密，多余的水分被排出体外。粘土逐渐被压实到这种程度，这时原来的团块间隙完全被过湿的土壤填满。在这一固结阶段，建筑物的大部分是由保持天然结构及含水量的致密粘土块构成，小部分由不大的窝状软粘土构成。

在短期内粘土团块即行整体化，整个土体内含水量也调匀，并且土体在荷重的作用下继续固结。

整体化后的粘土成为具有较大的含水量和比自然条件下小的密实度，但是抗剪强度的降低和压缩性的增大不超过10%。1951年波罗的海工程船队所作的用致密冰碛粘土及粘壤冲填土堤的试验证明，利用水力冲填的方法可以将致密的轻崩解的粘土块和团块冲填到建筑物中去，而这种状况的土为冲填体变成整体的、均匀致密的建筑物创造了有利的物理条件。

根据所研究出的施工方法来看，很多种致密的原生粘土，

① 创作证书 №94797。

都适于用水力机械化方法筑坝。

5. 粘土团块整体化的期限及建筑物的密实度

对用不同成因、不同状况和不同结构特性的粘土筑成的土质建筑物进行的研究证明，在任何情况下，建筑物中土的整体化及固结的过程，均服从于一般的自然规律。

亚普第粘土、冰碛粘土、寒武纪粘土及其他种粘土和粘壤土，基本上在填入建筑物后1~2个月内便完成整体化。整体化了的粘土，大约在建筑物筑成一年以后才停止固结。

在建成两个月以后的致密粘土建筑物，其密实度和稳定性具有如以下的指数。

整体化了的粘土，其含水量超过塑限含水量3~6%，达到35~45%。其稠度由难塑态变成固态。渗透系数从 10^{-8} 变到 10^{-9} 厘米/秒，即0.3厘米/年左右。

粘土的抗剪强度(水下剪切试验)达到以下数值：内摩擦角由 20° 变化到 26° ，粘聚力相应由0.25公斤/厘米²变到0.60公斤/厘米²。压缩性不大，其变化范围为0.015~0.025厘米²/公斤(水下试验)。

由致密粘土团块筑成的建筑物的沉陷，大约为以下数值：

辗压式坝——不超过1~1.2%；

冲填坝——不超过1.5~2%。

原生粘土坝体的不透水性，随着时间而增长。这是由于粘土整体化以后在不同成分的粘土间产生了新的化学结合。粘土含盐不同，对此也有促进作用。如果还注意到在这样的粘土中极大部分孔隙水是处于结合状态的话，那末可以认为坝体实际上是不透水的。

第二章 致密粘土的物理力学特性

1. 未扰动结构的致密粘土的物理力学特性

采用团块填筑法筑坝及其他的土质水工建筑物所用的致密粘土，具有以下确定其适用程度的物理特性：

(1) 高的密实度及机械强度，这是由于在大的压实力作用下造成粘土粘結的结果；在有弹性粘結的情况下存在结构强度（粘聚力）；

(2) 塑性特性的保持性，具有很大的塑性指数，即由于成岩作用的结果，土的骨架不甚硬；

(3) 土壤孔隙没有被水完全饱和，含水量小，接近粘土的塑限含水量；粘土的結持性应当是固态的或难塑态的；

(4) 在崩解試驗中土应具有抗水性，长久地保持密实度及强度不变；在整个試样中粘土含水量的增加应是逐渐而緩慢的（試驗的試样应完全保持天然含水量）；

(5) 微扩散结构，含有大量小于0.005毫米的粘土顆粒和小于0.001毫米的胶质顆粒；

(6) 良好的矿物成分，其特点是吸附层中有置換能力小的多价阳离子。高岭土类的粘土是最好的。含有伊利水云母的粘土也适用。塑性粘土中含蒙德土，会使粘土特性恶化，但在硬的和稍变质的土中也可能起良好的作用，因为在粘土浸湿有限的情况下会增加粘土的塑性。

施工經驗及試驗工作証实，許多成因、状况及结构特点上不同的致密粘土，都适于用团块填筑法筑擋水建筑物。例如属于这样的粘土有以下几种：

(1) 許多变类的亚普第粘土, 辛菲罗波尔水庫的拦河坝(高40米)即是用此种粘土筑成的;

(2) 維帖格拉地区的致密冰碛粘土和重粘壤土。以水力机械化方法用这种粘土团块筑成了一座試驗性的冲填堤;

(3) 麦扩普粘土、薩尔馬特粘土及基米里粘土的致密变种土。已决定要用这些粘土修筑北克里米亚运河水庫的拦河坝;

(4) 列宁格勒州不同产地的某些变种寒武紀粘土;

(5) 基涅尔粘土(如古比雪夫水电站地基中的)及一些其他种类的致密重粘土。

根据目前所积累的丰富的实际資料, 可以断言, 許多种粘土均可用团块填筑法来筑擋水水工建筑物; 在土場用挖土机进行开采粘土时, 粘土被分成坚硬的团块和大块(不能被碾碎和压实)。粘土中这些特性表現得愈强烈, 則用这些土料筑成建筑物的密实度也愈高。

2. 筑坝用的致密粘土土場的調查

在調查致密粘土的土場时, 对粘土的物理力学特性、矿物成分和化学成分的研究, 根据現行的土坝設計技术规范进行。初步設計和技术設計阶段的勘探点及取土样的数量按一般方法确定, 把在拟定开采层中土質可能的不均性考虑在內。調查土場的方法是: 穿过整个开采层的試坑, 沿整个試坑每隔0.5~1米取一次土样。取样間距系按土层的均匀性而定。所取的原状土样应立刻蜡封起来, 以保持天然含水量。

在土場試样(原状土样)的試驗中, 应确定土的下列物理特性:

(1) 顆粒組成(用微团粒分析), 只取不干的土作分析;

(2) 天然状态下土的容重;

(3) 土的含水量;

(4) 土粒的比重;

(5) 塑性限度, 特別应当仔細地确定塑限含水量;

(6) 土在水中(置于玻璃杯中的网上)的崩解性;

(7) 土的膨脹。膨脹試驗中确定两个指数: 膨脹压力和和試样在荷載下的膨脹(变形)值。荷載压力为 $0.3 \sim 0.4$ 公斤/厘米², 相当于两米厚土层的荷重。

用計算的方法补充求定以下各值: 土壤的干土重、孔隙率、孔隙比、饱和含水容量及保水系数。

为了获得所調查的致密粘土层的全部特性, 对于主要的岩性土类, 必須重点地确定以下的特性:

(1) 土的化学成分(熔合物及水提液);

(2) 粘土质矿物的矿物成分(为了确定粘土的分类)。

为了研究土的力学特性, 要确定內摩擦角、粘聚力及压缩特性。

根据压缩試驗数据, 用計算方法求土的透水性(渗透系数)。

內摩擦角、粘聚力和压缩特性, 是用未扰动試样作試驗得出的。試驗在系水下进行。

如果在所調查的土場中土层不均匀, 則須分別求定每一試坑的土容重的加权平均数、含水量、单位重量以及塑限含水量(W_p)。

如果拟定分两层开采土場, 則应当分別計算其加权平均数。若土場的不均匀性很大, 則各試坑的粘土物理特性之加权平均数可能相差很大。这給确定填土上填时土的浸湿情况造成困难。在这种情况下应将土場划分数段(按面积或深度), 求出各段土的物理特性的加权平均数。以后在計算团块整体化的

需水量时，使用所求出的容重平均值及含水量平均值。土的天然含水量、塑限含水量和容重等数据，应当直接在土場进行測驗，按类别加以确定。

3. 在實驗室条件下粘土团块的整体化

为了确定設計建筑物中粘土团块整体化后的物理力学特性，在實驗室中用压实器或大的試驗槽作粘土团块整体化的专门試驗。

压实器或試驗槽中的粘土团块，应在与施工条件近似的物理条件下整体化和压实。

压实器是一个有底的金属圓筒。圓筒內徑不小于30~40厘米，高20~25厘米。压实器的頂盖直徑較小，同时是压載器，杠杆或彈簧产生的荷重通过它傳遞給压实器中团块状的粘土。

作整体化試驗的土块，取自該試坑所有已进行研究的原状試样。从每一件原状土样所取的土量，应与其层厚成正比。这样便可以利用已求出的每一个試坑的容重(γ)、天然含水量(W_e)和塑限含水量(W_p)的平均值。

試驗証明，致密粘土团块的整体化在粘土含水量 W_0 超过塑限含水量(W_p)3~4% 的情况下最有效。例如某种致密粘土团块的混合料，应当浸湿到 $W_0 = W_p + 3\%$ (所有数值均以百分比表示)。如果混合料的天然平均含水量(W_e)为 $W_p + 3\%$ ，那末就不再需浸湿；如果混合料的含水量小于 $W_p + 3\%$ ，則应将土料补充浸湿到 $W_0 = W_p + 3\%$ ，此时含水量的增加額为 $(W_p + 3\%) - W_e = K\%$ (浸湿含量，以百分比計)。

压实器中均匀浸湿块状土所需的水量，按下列公式計算：

$$X = Q \frac{W_0 - W_e}{1 + W_e} = \frac{QK}{1 + W_e},$$