

塑化剂及其在混凝土 和砂浆中的应用

郭 成 举 著

人民铁道出版社

塑化剂是混凝土和砂浆中一种附加物，在我国广大的建筑中现已很多採用；在目前节约水泥的号召下，这更成为一种重要问题；但有許多建筑工作者尚未了解它的性能作用。本書对于塑化剂的品种、制造、应用、以及其在混凝土和砂浆中各种物理力学性质的影响，均有很透彻的说明，可以帮助土木建筑工程技术人员更好的完成他们的工作。

目 录

1. 塑化效应..... 2
2. 塑化剂对于砂浆及混凝土的物理力学性能的影响 ...11
3. 亞硫酸塩紙漿廢液制品作为塑化剂的应用情况...21
4. 关于在砂浆及混凝土中掺用塑化剂的一些问题...32

塑化剂及其在混凝土和砂浆中的应用

1. 塑化效应

在混凝土及砂浆中掺用塑化剂，具有改变混凝土及砂浆在凝固前后的各种物理-力学性质的实际意义。这些性能的改变，归根结底，都是在於塑化剂的塑化效应。在广义上说，凡是在砂浆及混凝土中掺入某种物质，使得砂浆及混凝土的塑性能够有显著改进时，这种效应就可以称为塑化效应，而这种物质也就可以称为塑化剂。但是严格地说来，只有水泥净浆、水泥砂浆和混凝土拌合物的流动度都因掺用某种物质而见加大，并且在初期内水泥浆结构的形成被阻滞时，这样的效应才能称为塑化效应。有些物质，主要是疏水性的表面活性物质，本身并没有这样的效应，只是因为当它掺入砂浆及混凝土中后能在搅拌时产生无数气泡，所以亦有改进砂浆及混凝土塑性的作用。这种物质，也有人称之为塑化剂，但是更正确一些，应当称为加气剂。能够达成直接的塑化效应的，仅仅是某些具有表面活性作用的亲水性有机物质，所以在严格的意义上，塑化剂应当是专指这一种物质。本文所讨论的，也正是属于这一种物质的木质磺酸盐类，以及以木质磺酸盐为主要有效成份的各种制品。

拌合物的流动性。在研究塑化剂的塑化效应之前，首先必须了解水泥浆、砂浆、以及混凝土拌合物的流动性。大家知道，松散体的颗粒间存在着一定的摩擦力和粘着力，所以这种物体是不能流动的。当它和水混合，成为播散体系时，由於颗粒与颗粒间的水膜削弱了颗粒的粘着力，並將颗粒隔开，而起了润滑

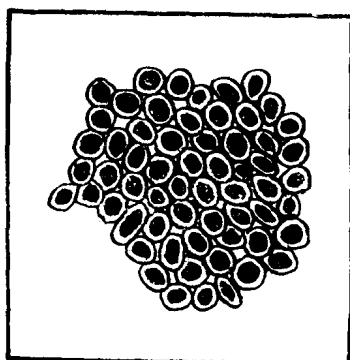
作用，播散体系就有了一定程度的流动性。流动度的大小，决定於顆粒間水膜的上述特性。一般砂石的顆粒太粗，孔隙太大，顆粒表面上的水膜太薄不能够把孔隙填滿，起不了潤滑作用，所以砂石經水湿润后，仍然不能获得流动度。水泥漿中固体和液体的互相分佈情形就完全不同，水泥顆粒的体重以及孔隙的体积是如此的小，所以水膜的作用已經大到有可能使水泥顆粒和水所成的混合物成为一种稳定的播散体系。当水泥漿受到外力触动时，体系就可以沿着連續的水膜而剪移，从而获得流动度。砂漿及混凝土的流动性，基因於水泥漿的流动性，只是当集料空隙中充滿了具有足够流动度的水泥漿、並且稍有富余时，砂漿及混凝土才有流动的可能。

水泥顆粒之間的水膜，分为两个部份，一部份是紧密地附着在顆粒表面上的溶合層（Сольватная Оболочка），另一部份在溶合層之外的，則是游离水。当普通矽酸鹽水泥加水調制的水泥漿的水灰比大約在0.24^①以下时，全部水份都被吸附在顆粒表面上，成溶合的狀態，此时水泥顆粒依然呈松散的形态。随着水灰比加大，顆粒表面上溶合層的厚度达到了極限值，此后，多余的水就作为游离水存在於顆粒之間。但是由於水泥顆粒很小，顆粒溶合層間分子力的作用，和重力比較起来，是如此的巨大，以致顆粒不是单独地存在，而是互相結集成为各种不同的結構（圖1，圖中顆粒表面上的薄層代表溶合層）。此时，游离水仍然被束縛在結構之中，不能起潤滑作用，而結構對於剪切的抗力，阻碍着水泥漿的自由流动。当矽酸鹽水泥漿的水灰比从0.24增加到0.45^②左右时，顆粒的結構逐渐从紧密过渡到疏松，而結構的抗剪强度則逐漸減小。当水灰比增加到0.45以上时，水泥漿的結構就开始破裂，其抗剪强度亦降低到零，也就是說，水泥漿就能够

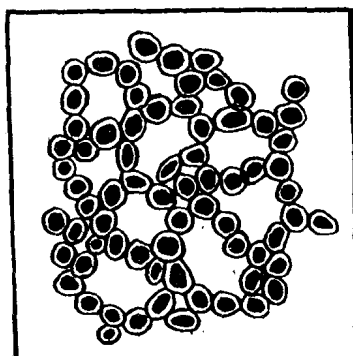
①水泥的最大分子水容量，根据 И·Н·阿赫維尔多夫的實驗資料，对于各种水泥，此項数值約为正規稠度需水量的38%。

②对于各种水泥，此項数值約为正規稠度需水量的1.65倍。

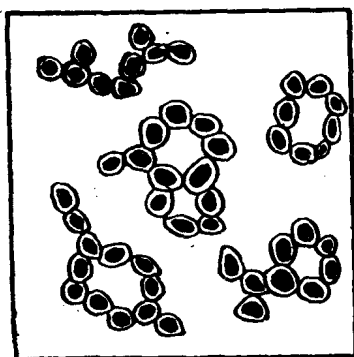
自由流动。但是必須注意，水泥顆粒溶合層的分Ⓐ子結合Ⓐ力是如此的牢固，以致增加水灰比並不能使水泥漿的結構完全消散。尽管水泥漿的水灰比增加到了極大的数值，水泥顆粒仍然以成羣結集的状态存在，成为所謂“結構的殘骸”（圖1B）。在这种殘骸之中，蓄积着一部分游离水，對於顆粒間的滑动不起潤滑作用。



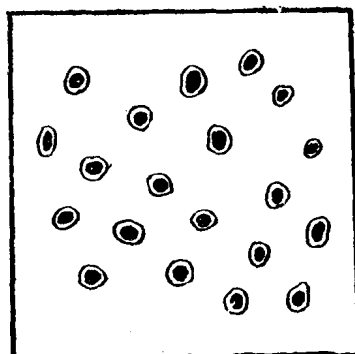
a) 密实結構



b) 閉合結構
水灰比 $\sim 0.4-0.5$



c) 結構殘骸
水灰比 $> 0.4-0.5$



d) 無結構
(摻摻化剂)

圖1 水泥漿各种結構示意图

水泥悬液中顆粒結集的状态，不但可以从显微镜中看到，而且还可以从水泥悬液中水泥顆粒沉降的情况直接或間接地察出。

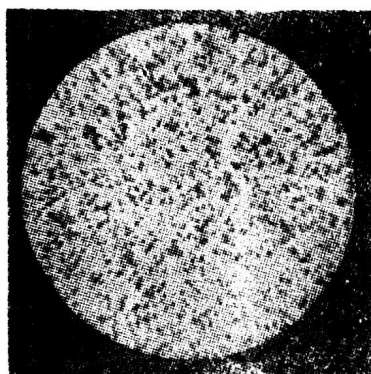
当水泥在水中沉降时，用肉眼就可以看到，下降中的“顆粒”远較水泥的实际顆粒为大，而水泥“顆粒”在水中沉降的速度远較在火油中为快。这些都說明水泥在水中是以結集状态存在着的。

流动性的提高。要提高水泥漿的流动度，必須設法破坏或削弱这种結構，把結構中所蓄积的游离水释放出来，使它起潤滑作用。对水泥漿施行机械作用，例如高頻率振动，可以使水泥顆粒表面的溶合層反溶合化（Десольватаций），並从而削減顆粒間的分子力，結果也就是破坏或削弱水泥漿的結構。通常对于硬性混凝土拌合物施行振动作業，能够保證捣筑密实，其理由就在於振动时水泥漿获得了足够流动度的原故。

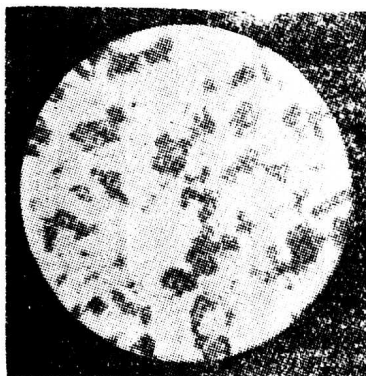
在水泥漿中掺入某些亲水性的表面活化物質，例如木質磷酸鹽，可以获得类似的效应。当水泥顆粒經水解及水化作用后，新产生的物質吸附了木質磷酸鹽，就在顆粒表面形成一層亲水性物質膠膜。这一層膠膜能够保持較多量的水，使它穩定在顆粒周圍，这样，顆粒溶合層之間的分子力就要降低。除此以外，由於这一層膠膜阻碍了水份向顆粒內部扩散（Диффузия），水泥在其初期內的異态水化和水解过程都見阻滯。這兩种現象的結果，都將促成水泥漿結構的削弱。另一些学者則認為水泥顆粒所吸附的，是木質磷酸陰离子，吸附了这种陰离子之后的顆粒，帶有負电荷，因而互相排斥，抵消掉顆粒間的分子力。這兩种学說都足以說明，在掺有木質磷酸鹽的水泥漿中，結構是被消散了的（圖12）。

从显微镜中观察掺有木質磷酸鹽的水泥悬液，或是观察水泥在水泥悬液中沉降的情况，都足以証明在掺有塑化剂的悬液中結構殘骸是減少了的，或者竟是不存在的。掺塑化剂及不掺塑化剂水泥悬液的微觀照片和沉淀情况，見圖2及圖3。

如前所述，水泥漿結構的消散，意味着它对于剪切的抗力降低，同时蓄积在結構或其殘骸中的一部份游离水被释放出来，更能促进顆粒間的潤滑作用。这就說明了在水泥漿以及砂漿或混凝土中掺用塑化剂时，拌合物流动度增大的全部机能。有人將塑化

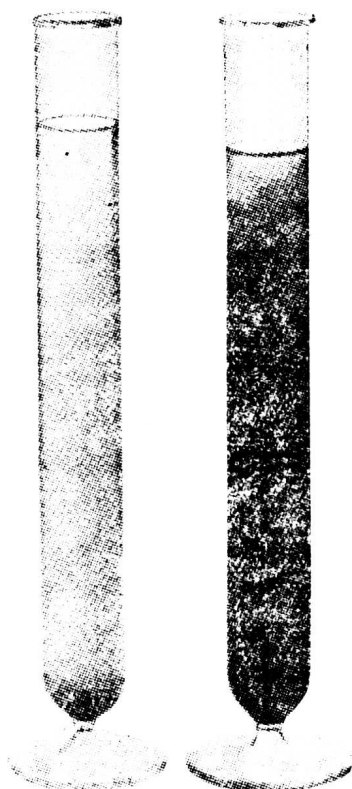


在淨水中



在塑化劑溶液中

圖2 水泥懸液在顯微鏡下的照片



淨水中

塑化劑溶液中

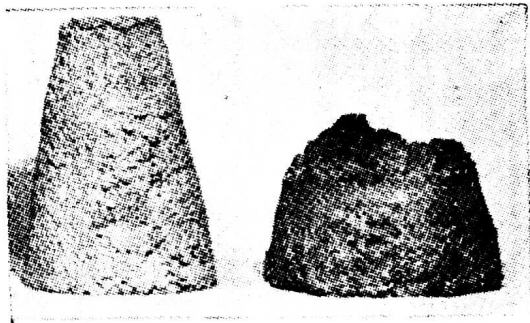
圖3 水泥在淨水中及塑化劑溶液中沉澱的情形

剂称为消散剂 (Пептизатор), 或是播散剂 (Dispersing Agent), 也都是十分切当的。

塑化剂提高流动度的效应, 可以用标准的水泥浆稠度试验和砂浆及混凝土流动度试验来比较测定。当掺用塑化剂时, 水泥浆获得正规稠度时所需的水量约可减少1~2% (绝对值), 砂浆的跳桌摊展度可以增加20~50公厘, 而混凝土的锥体坍落度则大致可以增加一倍。圖4中显示着掺塑化剂混凝土的流动度提高的情

形，兩種混凝土所用的材料完全相同，水灰比也保持不動，但摻塑化劑的混凝土的流動度遠較不摻塑化劑的高。

水化過程的阻滯。除了流動度增加以外，塑化效應也表現在水泥漿凝結時間的延緩。前面已經說過，當水泥顆粒上吸附了一層木質磺酸鹽膠膜之後，水份向着顆粒內部的擴散，就



不摻塑化劑

摻塑化劑

圖 1 混凝土坍落度的變化

要受到阻滯，水化和水解過程就要延遲。不過，當塑化劑劑量適當時，這種木質磺酸鹽膠膜並不太厚，水化過程進行到了一定程度，由於新生物質的體積膨脹，這種膠膜就被破裂，而水化過程就得以正常進行。這就是說，摻用塑化劑時，水泥漿凝結時間只是在合理範圍內延遲，除了某些特殊工程以外，不會造成施工的困難。砂漿和混凝土的強度，除了最初一晝夜內顯得較低外，在一天以後就能夠獲得應有的發展。當然，如果塑化劑的劑量過多，那末水泥顆粒表面上所吸附的木質磺酸鹽膠膜就要加厚，在這一情況下，水泥漿的凝結就會延遲到不可容忍的程度，而強度的發展也可能遭到嚴重的阻滯，甚至實際上完全停頓。

塑化劑的使用劑量。摻用塑化劑增加水泥漿流動度的效應，在於使水泥漿的結構消散，因此不難理解，這一效應的大小僅僅在一定的範圍以內取決於劑量的多少。塑化劑的劑量達到了某種數值後，水泥漿的結構就被充分破壞；繼續增加劑量就沒有進一步增加流動度的可能。根據F·M·恩斯白格和W·G·法朗斯用混濁計測定水泥比表面積的實驗數據，可以得出水泥貌似比表面積依從木質磺酸鹽吸附數量的依從關係如圖5所示。

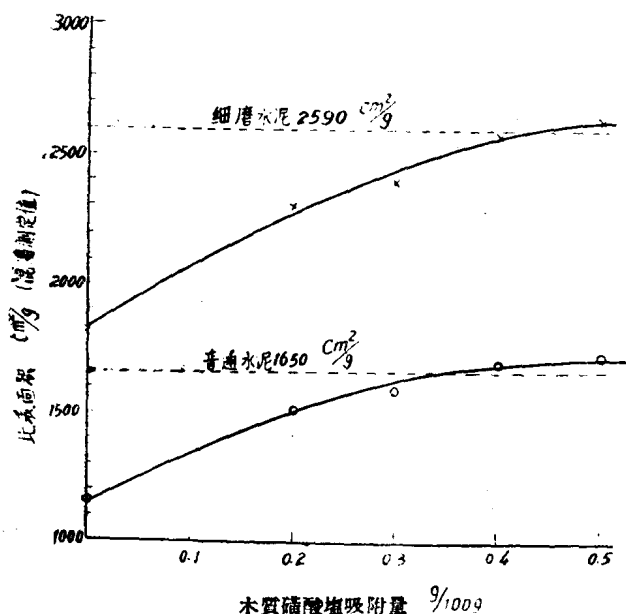


圖5 水泥比表面积依从木質磷酸鹽吸附量的关系

从圖中可以看出，木質磷酸鹽吸附量达到0.3~0.4%左右时，水泥顆粒就被完全播散，繼續增加剂量就不能进一步增加水泥的比表面积。事实上为了增加流动度，並沒有使顆粒完全播散的必要，只要把結構削弱到不能蓄积游离水就已足够。在这一观点上，塑化剂的剂量就沒有超过水泥用量的0.3%的必要。採用直接測定砂浆及混凝土拌合物流动度的方法来进行比較，也可以得到同样的結論。塑化剂剂量超过了水泥用量的0.3%时，流动度的进一步提高是很有限的。

从另一方面来看，塑化剂剂量較多时，水泥的凝結時間就要过份延迟，强度發展就要受到严重阻滯。根据我們的試驗，当亞硫酸鹽酒精廢液塑化剂剂量超过水泥用量的0.4%时，水泥的終凝時間将要延至一晝夜以上，砂浆和混凝土的早期及后期强度都要蒙受巨大損失。这样長的終凝時間，对于大多数工程來說，

是不相宜的。在这一观点上，塑化剂的剂量也应当定在0.3 % 以下，方才合理。

塑化剂的最合理的剂量，视水泥的品种、成份、研磨细度等因素而定。施工时究应掺用多少塑化剂，应当通过水泥及混凝土的物理力学试验，作出技术经济指标的比较，才能最后确定。

对于不同矿物成份的不同效应。上面所说的塑化效应，是对于普通水泥的一般现象。事实上水泥各种矿物成份吸附木質磷酸盐的数量，以及在木質磷酸盐溶液内它们的水解及水化过程的变更，也是各不相同的，因而它们的塑化效应也有很大程度的差别。根据苏联学者们的研究，各种矿物成份的塑化程度，依下列次序渐减： C_3S ， C_2S ， C_4AF ， C_3A 。这里应当指出， C_3A 的水化和水解过程是非常迅速地进行的，在塑化剂溶液中，这种水解和水化过程的新生物质将被高度播散，然后又产生一种凝集的网状结构，比较水化和水解以前的结构更为牢固。因此，塑化剂对于 C_3A 的塑化效应，是同其他几种矿物成份相反的。当水泥熟料含 C_3A 较多，而研磨时掺加石膏较少时，塑化剂对于水泥的效应也可能反常，这就是说，水泥浆的流动度反而减小，而初凝时间反而提早。在这种情况下，应当掺加一些石膏，使 C_3A 在水化过程中与硫酸钙结合而产生水化硫铝酸钙（ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ ）。水化硫铝酸钙与水化铝酸钙结合而成的凝集结构，要柔软得多，因此水泥浆的流动度仍能有所提高。

总之，由于水泥矿物成份不同，水泥的塑化效应可能有所差别，这种差别不是单纯用调节塑化剂剂量的办法所能改正的。

影响塑化效应的各种因素。除了水泥熟料的矿物组成之外，塑化剂的塑化效应也受到下列一些因素的影响。

1. 水泥的细度。对于研磨愈细的水泥，塑化效应愈为强有力。大家知道，水泥愈细时，它的比表面积愈大。当细磨水泥与水调合时，颗粒间的接触较为频繁，颗粒间分子力的作用也比较强：这就是说，细磨水泥调制的水泥浆的结构抗剪强度要比普通

水泥为高。为提高这种水泥漿的流动度而需要的水，要比普通水泥多一些。因此在这一場合採取摻塑化剂借以削弱結構的措施，就显得更为有效。这里必須附帶指出，塑化剂对細磨水泥的塑化效应較高，並不等於塑化剂的剂量可以比一般低一些；相反地，由於要在較多的顆粒表面上造成吸附的膠膜，塑化剂的用量应当比使用一般水泥时更多一些。

2. 水泥的新旧程度。水泥在存放时期內，將从空气中吸取水份，並在顆粒的表面上發生程度不等的水化过程，因而顆粒之間就有了某种膠結联系。这种联系远較一般溶合層間分子力的联系更为强有力，而不是摻塑化剂所能消解的。以存放日久的水泥調制水泥漿，有如採用研磨較粗的水泥一样。因此，塑化剂对于这种水泥的效应較一般新鮮的水泥为低。

3. 水灰比。水泥漿以及混凝土的水灰比愈低时，水泥漿的結構愈为完整，愈为牢固；因此当摻用塑化剂借以消散結構时，其作用亦愈为显著。採用干硬性拌合物时，通常水灰比总比較小，水泥用量比較多，所以特別适宜摻用塑化剂。但是如果採用水泥用量很小而水灰比很大的低标号低流动度混凝土时，則为了提高和易性，还不如採用粉狀混合材料，或是摻用加气剂，在这种情形下摻塑化剂並不能使拌合物从干硬的状态轉为可塑的状态。

4. 砂的細度。採用細砂拌制混凝土时，需要更多的流动性較佳的水泥漿，因此摻用塑化剂的效应要比採用粗砂时为高。这里应当把另一种不同的情况分辨清楚。当按照同样的比例配制砂漿时，摻用塑化剂对于細砂砂漿的效应，还不如对粗砂砂漿的效应为高。这是因为細砂的内部摩擦力極大，相形之下，水泥漿結構抗力对于流动度的影响，比較在粗砂中的影响要显得較小一些。

2. 塑化剂對於砂漿及混凝土的 物理-力学性能的影响

在砂漿及混凝土中摻用塑化剂时，砂漿及混凝土物理力学性能的改变，主要基因於塑化效应。由于在其他条件完全相同的情形下，砂漿及混凝土的流动度能够借塑化效应而增高，反过来，如果保持流动度不变，就可以不增減水泥用量而降低水灰比。採取这样的措施，就可以按照实际的需要来改进砂漿及混凝土的一种或几种性能，而这些性能的提高通常都是要求建筑成本作相应的增加的。

除了借水灰比降低而获得的性能改变以外，塑化剂溶液內水泥水化后新生物質的結晶状态有所改变，也是改进水泥砂漿及混凝土的物理力学性能的一項重要因素。苏联学者們的研究結果指出，水泥顆粒上的吸附層能够阻滯新生物質結晶核的成長，在水泥漿硬化期內單位体积內所产生晶体的数量要比不摻塑化剂时多得多，晶体的尺寸也要微細得多。同时，在吸附作用下結晶的形狀也有剧烈的改变。例如 C_3A 水化新生物質的結晶在淨水中成六边形板狀，而吸附了木質磺酸盐后就成微細得多的針狀。由于結晶的改变，水泥結石的結構亦將随着变得更为細致，这一点显然具有提高砂漿及混凝土的物理力学性能的意义。

今將塑化剂对于砂漿及混凝土的各种性能的影响，分述如后。

强度。一般說来，砂漿及混凝土內摻有塑化剂时，由於水化作用受到阻滯，初期內的强度是要降低的。經過这一个时期以后，水化过程中所产生的新生物質逐漸膨脹，顆粒表面上的吸附膠膜就要破灭，而水化过程的进一步發展就能恢复正常。同时，初期內水泥結石中結晶体的成長虽然較慢，但是晶核的数量增多却为嗣后的結晶作用提供了有利的条件。因此，当水灰比酌量減

小，而流动度保持不变时，砂浆及混凝土的28天强度一般能够有所提高。

前面已经提及，塑化剂对于水泥的各种矿物成份，具有不同的塑化效应。同样塑化剂对于不同矿物成份的强度效应，也是完全不同的。*IO·M·布特*教授用单成份水泥进行的试验说明，水泥矿物成份中只有 C_3S 能够在掺用塑化剂并降低水灰比的情形下获得比不掺塑化剂时较高的强度，其余各种成份的强度则反而降低，而以 C_3A 的情况最为不利。由此可知，各种水泥掺用塑化剂的强度效应将因水泥熟料的矿物组成的不同而有很大的差别。*C·B·谢斯托标罗夫* 根据他的实验资料建议将水泥按照亚硫酸盐酒精废液（苏联普遍采用的一种塑化剂简称 *C.C.B.*）的强度效应分为三个类别：

第一类： $C_3A < 6\%$ ； $C_3S > 50\%$ ——强度可提高 $16 \sim 25\%$

第二类： $C_3A = 6 \sim 10\%$ ； $C_3S > 40\%$ ——强度可提高 $7 \sim 13\%$

第三类： $C_3A > 10\%$ ； $C_3S > 35\%$ ——强度稍有提高。

如果保持流动度不变，同时也不打算提高强度，那末就可以从原配合的拌合物中抽除一些水和水泥，借以达到节约材料（水泥）的目的。此时，水灰比可能不必降低，也可能仍要酌量降低，视水泥的矿物组成而定。采取这样的措施所能节约水泥的百分率，按照 *C·B·谢斯托标罗夫* 的意见，可以当作强度提高的百分率的一半来估计。这样，采用上述第一类水泥时，估计可能节约水泥 $8 \sim 12.5\%$ ；采用第二类水泥时，可能节约 $4 \sim 6\%$ ；而采用第三类水泥时，基本上不能节约水泥。

当然，应用不同的塑化剂时，提高强度和节约水泥的效果会有些不同。下面我们将要提到，如果采用铁道科学研究所研究出来的草浆废液石灰沉淀剂作为塑化剂时，效果似乎要好一些。

从上面所述看来，可以理解，当掺用塑化剂时，混凝土强度依从水灰比的关系，同不掺塑化剂时的关系是有差别的。这就是说，惯常所使用的别辽也夫公式和保罗米公式不能够无保留地移

用於摻塑化劑的混凝土。根據 В·И·索羅開爾的研究，摻塑化劑的混凝土的強度仍然是同灰水比大致成直線比例，正如保羅米公式一樣。但是公式中的兩個常數則決定於水泥礦物組成等一系列因素，只能以試驗來決定。修正後的公式如下：

$$R_{\sigma} = \alpha R_n \left(\frac{II}{B} - \beta \right),$$

式中 R_{σ} —— 混凝土的強度（得為抗压，抗撓強度，亦得為三天、七天或二十八天強度）；

R_n —— 水泥的活性；

II/B —— 灰水比；

α 及 β —— 相當於各種 R_{σ} 值的參變數，決定於塑化劑種類、水泥品種及其礦物組成、粗集料形狀等等。

對混凝土施行蒸汽培育時，塑化劑的強度效應更為顯著。根據 Ю·М·布特的資料，在 90°C 溫度下施行一般的蒸汽培育時，純 C_3S 水泥砂漿的抗压強度提高 36.8%（摻 0.2% C. C. B. 的與不摻的砂漿相比）；而在 8 大氣壓力之下施行高溫培育時， C_3S 水泥砂漿的抗压強度提高 60% 之多，而 C_2S 水泥砂漿的抗压強度亦能提高 84%（在常溫下摻塑化劑反而要降低）。因此可以認為，在工廠內施行蒸汽培育法製造裝配式構件時，在混凝土中摻用塑化劑是特別相宜的。

抗滲性。砂漿及混凝土石硬化及乾燥後，具有相當數量的孔隙。這些孔隙中一部分是開放的，具有毛細管的性質，而另一部分則假定是封閉的，僅在高压及真空狀態下才和外界溝通。砂漿及混凝土的滲水性就決定於這兩種孔隙的數量和性質。

在拌合物灌注完畢但尚未凝結以前，各組成材料將發生不均勻的沉淀；其時粗集料最先沉實，形成一種骨架，而砂漿及水泥漿則在這種骨架的空格中漸漸沉實。在沉淀過程中，一部分水逐漸上升，繞過粗集料側面升至拌合物層頂面，或是停滯在粗集料底面上。這種水分流過的通路，將在水分蒸發之後成為毛細管；

这种毛细管通路，不仅为压力下的渗透、而且也为毛细管吸入性的渗透提供了条件。

封闭性的孔隙，主要是搅拌砂浆及混凝土时所引起的一些气泡。在低水压情形下，这种孔隙不能为外界的水所侵入，就是在水高压之下，渗流通过这种孔隙的速度，和通过毛细管性孔隙的速度相比，也是微不足道的。

由此可知，砂浆及混凝土的渗水性主要决定于开放性孔隙的数量和其性质。一般说来，开放性孔隙的体积百分比愈大，则砂浆及混凝土的渗水性愈高。但是如果同体积的这种孔隙所形成的毛细管分佈愈散，那末毛细管的管径必然愈细，而这种通路亦必然愈长，并且愈为曲折。当然，渗水通路愈长、愈细和愈曲折，则砂浆及混凝土对于渗透的阻力亦愈大。

普通砂浆及混凝土的水灰比较低时（例如普通水泥拌合物的水灰比 <0.50 ），除去水泥水化过程中所消费掉的水分以外的多余水分比较少，而且水泥浆中水泥的沉淀较为轻微，所以这种砂浆及混凝土的抗渗性是很高的。随着水灰比加大，开放性孔隙的体积逐渐增加，因而砂浆及混凝土的抗渗性亦逐渐降低。

在砂浆及混凝土拌合物中掺用塑化剂，可以提高它们的抗渗性。首先，由于塑化剂的具有提高流动度的塑化效应，如果不需要提高流动度，就可以降低用水量（水灰比降低或不降低）。降低用水量，就意味着混凝土的总的孔隙减小，而水灰比降低时，开放性孔隙亦将随同减小，这些都造成了抗渗性提高的条件。其次，即使在同样水灰比的情形下，当掺用塑化剂时，水泥的沉淀也较为缓慢，而且由于水泥结石内部结构更为细致，毛细管抵抗渗流的阻力也较强。所以，掺用塑化剂是提高砂浆及混凝土抗渗性的重要措施。

根据W.M.杜纳干的实验资料，在混凝土内掺用塑化剂时，混凝土的毛细管吸液速度和压力下的渗透速度，具有下列各种变化。

表 1

順序 號	水泥種類	添加劑	水 灰 比	每立方公尺 混凝土用水 量 (公升)	滲透速度 (毫升/小時/平方公尺)	
					3.5大氣壓力下 滲透速度 (50小 時內平均)	毛細管吸滲速度 (500小時內平 均)
1	普通水泥	0	0.47	210	0	5.82
2	"	塑化劑	0.47	190	0	2.15
3	"	防水劑	0.60	205	0	3.77
4	普通水泥	0	0.85	210	7.07	11.83
5	"	塑化劑	0.85	190	1.40	6.46

根据上述，塑化剂提高混凝土抗渗性的效应是很显著的。但是 I.O.M. 布特以实验指出，在一种掺有砂粉的火山灰质水泥中掺用塑化剂时，泌水率和开放性孔隙率反有些微增加的趋势。这一点引起了一种在火山灰质水泥中掺用塑化剂可能会削减砂浆及混凝土抗渗性的疑虑。

按照本文作者的意見，在火山灰質水泥中掺用塑化剂是否將增加泌水率，須視此項火山灰質摻合料的性質及細度而定。磨細的砂粉一般顆粒較粗，這種物質的分子水容量較水泥為小，在塑化剂溶液中吸附木質磺酸鹽也很少，反而容易和水泥顆粒分離而先行沉淀，而且沉淀得更為密實。因此，摻砂粉的水泥在塑化剂溶液中的沉淀，反而較淨水中為甚。在摻砂粉或其他玻璃質火山灰材料的水泥中摻用塑化剂時，泌水現象可能因此種材料含量較多反而更為強烈，但是這一點並不一定意味著砂浆及混凝土的抗滲性就要降低。前面已經說過，抗滲性的提高主要決定於水灰比的降低，只要水灰比有了一定程度降低，泌水率的些微增加，以它對於抗滲性的影響來說，是比較不甚顯著的。當火山灰質水泥中的含摻合料屬於燒粘土質時，由於一般顆粒不大，本身的播散性很高，所以摻用塑化剂更不致於引起抗滲性的降低。

耐冻性。當砂浆及混凝土含水飽和，然後遭受冰凍時，由於水份在凍結時體積膨脹，砂浆及混凝土就要受到極大的內部應力。在理論上，這種內部應力估計可達2000公斤/平方公分，遠

远超过了砂浆及混凝土的抗拉强度。实际上由于砂浆及混凝土体内存在着一定数量的封闭性孔隙（普通砂浆约有3~5%，普通混凝土约有1~2%），在砂浆及混凝土充水饱和时并不能为水所侵佔，这些孔隙形成了无数可以压缩的气室，所以冰冻时所发生的内部压力就見降低。不过这种孔隙的分布并不是十分均匀的，在冻结时砂浆及混凝土的局部地点仍然要发生超过了抗拉强度的内应力，因而砂浆及混凝土内部就要产生许多微细裂痕。每经过一次冻结，砂浆及混凝土内部将增加一些新的微细裂痕，而原有裂痕亦将有一些扩大。当冻结和融解循环进行到了一定的次数，砂浆及混凝土的强度将降低到了不可容忍的数值，而外表层将发生龟裂，脱皮，崩角等等损伤，也就是说，砂浆及混凝土到达了它们的耐冻极限状态。

显而易见，砂浆及混凝土内部开放性孔隙体积愈大，渗水性愈严重，则充水时侵入砂浆及混凝土体内的水亦愈多，冰冻的作用亦愈强烈。当水灰比较大时，水化后剩余的水较多，凝固前水泥的沉淀亦较甚，因此这样的砂浆及混凝土要比水灰比较小的易於遭受冻坏。为了保证结构坚固耐久，必须按照当地环境和气候条件，分别控制砂浆及混凝土的水灰比，不使它低於规定的数值。

同时，从上述也可以看出，砂浆及混凝土中的封闭性孔隙，却是有利於耐冻性的一项因素。封闭性孔隙的相对体积愈大，分布愈为均匀，则砂浆及混凝土的耐冻性亦较高。在混凝土中掺用加气剂，可以大大地提高它的耐冻性，因为这样的措施可以使混凝土内部的封闭性孔隙的体积从一般的1~2%增加到3~5%，而且由于水的表面张力降低，这种孔隙将以数量极多而直径极小的气泡存在着，也就是说这种孔隙的分布远较一般混凝土中更为均匀。

在砂浆及混凝土中掺用塑化剂，也是提高它们的耐冻性的有效措施。利用塑化效应，可以降低水灰比，此时，剩余水分也就