

# 预应力混凝土梁破坏的教训

## FAILURE ANALYSIS OF PRECAST-PRESTRESSED CONCRETE BEAMS

黄培正

编者按：预应力混凝土技术可以节省大量钢材，60年代初开始流行，当时在加州（为适应二次大战后出生的儿童）兴建的一批中小学校舍采用了这个技术。20年后，一所中学的礼堂屋顶坍塌，调查的结果发现是由于蠕变。预应力混凝土的蠕变比普通混凝土大，在设计施工中必须采取特殊的措施。中国在现代化建设中正在推广预应力混凝土技术，希望能从本文中吸取经验教训。

预制预应力混凝土构件的应用不过仅仅二、三十年的历史。这种构件本身的缺点还没有经过长时间的考验。预应力混凝土构件的问题往往是因为工程师把它当作普通混凝土构件处理而产生的。如果我们能够摆脱普通混凝土设计的框框，了解这两种构件不同点，这些问题是可以避免的。

1980年3月，美国加州旧金山附近一所中学礼堂的屋顶板有一些小块掉下来，随后发现很多裂缝，立刻疏散了学生后一小时内一部分屋顶塌掉，呈现了一个长63英尺、宽34英尺的大洞（图1）。破坏的构件是一批预制预应力双T型梁。该梁跨度40英尺，截面高为14英寸，至梁端支承点减为7英寸。粗看会认为促成破坏的原因是抗剪破坏（图2），或局部应力集中，或是梁上翼缘的接头导致增加弯矩等等。但仍不能说明为什么这一批构件用了二十多年之后才产生破坏。这座礼堂预应力梁破坏之后，加州政府对此进行了

大规模的调查，对三十年来全州所有应用预应力构件的学校建筑进行了检验。发现预应力构件开始有裂纹就从速加固。

这批预应力构件破坏的因素比较复杂。要分析其破坏的原因，有效的办法是研究已经开裂而还没有破坏、倒塌的构件。另有一所中学单层教室的屋面板发现双T型梁两端的腹板有些已有裂缝（图3）。该教室建于1960年，与上述礼堂同由一个工程师设计，施工设计大致相同。现以此例进行分析研究。

这幢单层教室长224英尺、宽112英尺，柱间距为28×28英尺，屋面大梁也是预制预应力的构件（图4）。大梁之间设置已经开始破裂的双T型梁（图5）。该双T梁跨度实际仅28英尺，剪力很小，仅25磅/平方英寸左右，按理不应该产生剪力破坏。四周围护墙也是预制预应力的构件，设计上考虑作为剪力墙，但其侧向刚度自然不及现浇的剪力墙。



图1 部分屋顶坍塌

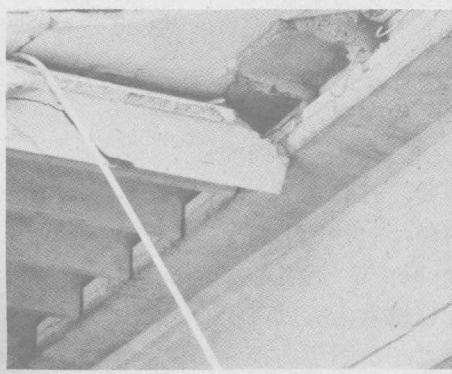


图2 梁端支承破坏

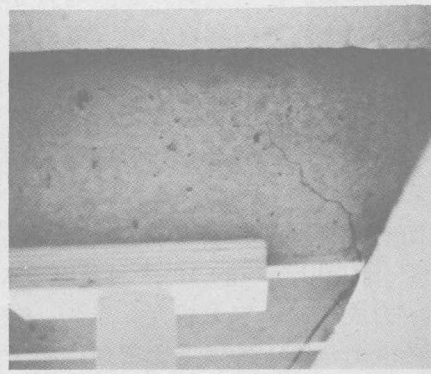


图3 T型梁端腹板产生裂纹

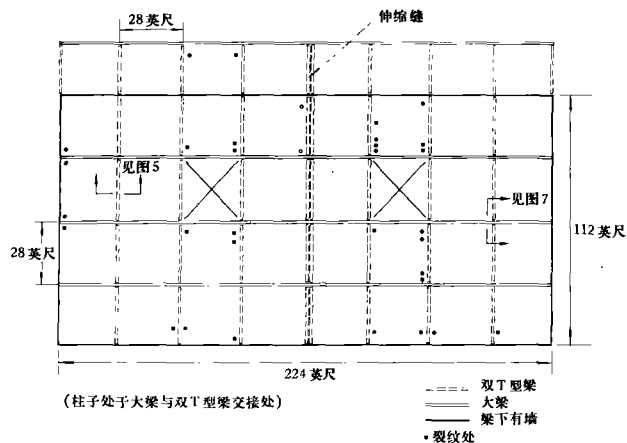


图4 平面图

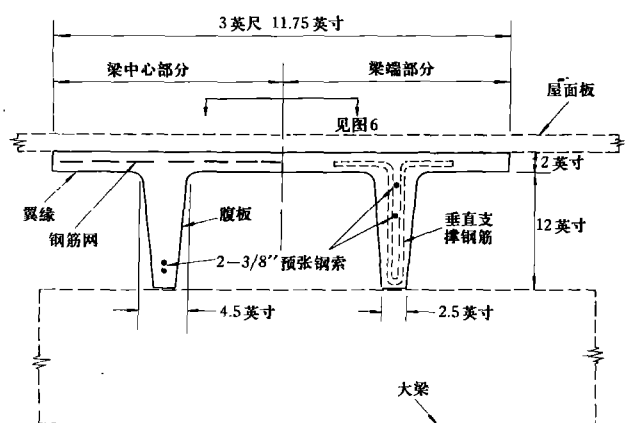


图5 双T型预应力梁截面图

加州是强震地区，因此屋面结构需要有一个能够抗剪的平面隔板（diaphragm）。双T型梁的翼缘如果每4英尺用剪力板焊接起来（图6）就可以构成一个有效的抗剪构件。此外，混凝土墙也需要有一个相当刚度的水平支撑，同时在大梁上也需要有水平支撑来防止侧向载荷，后者一般是与双T型梁的腹板下方垫板焊接（图7）。

从图5双T型梁开裂的部位看，大体上是剪力墙的附近。显然剪力墙构成阻止双T型梁收缩和开裂的一种因素。但是屋面开裂的地方并不全在剪力墙处，不过开裂的四周都有大梁，所以，似乎大梁才是阻止双T型梁收缩的因素。但是没有大梁的地方也出现开裂。因此，破裂的原因又不能完全归之于大梁。

至此，我们开始怀疑收缩可能是破坏的主要因素。但问题是：为什么同样的双T型梁，有的破坏，而有的仍然是完整的。收缩一般有两种：一种是干缩（dry shrinkage）；一种是蠕变（creep），后者与应力成正比，应力越大、越久，蠕变也越大。所以，预应力混凝土的蠕变比普通混凝土要大。从图7的接头详图可以看出，设计者对收缩是有所考虑的，并在翼缘上设置了伸缩接头，以使梁端自由转动，不致产生弯矩；其次，尽量减少腹板的接头，每隔一个T型

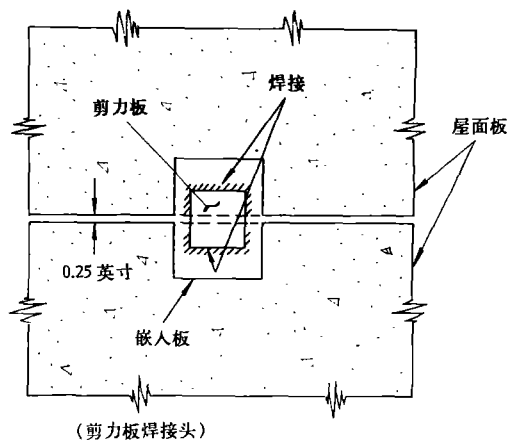
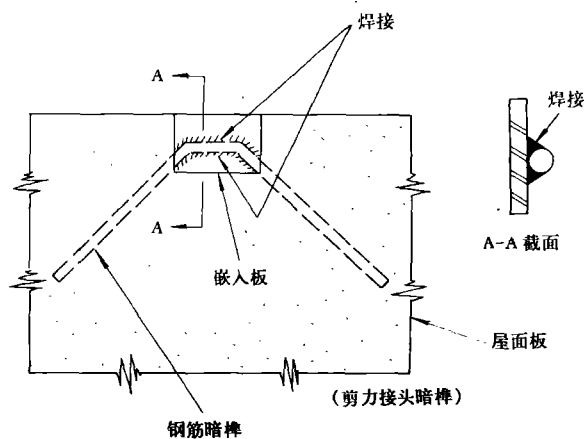


图6 屋面板（或地板）剪力连接情形

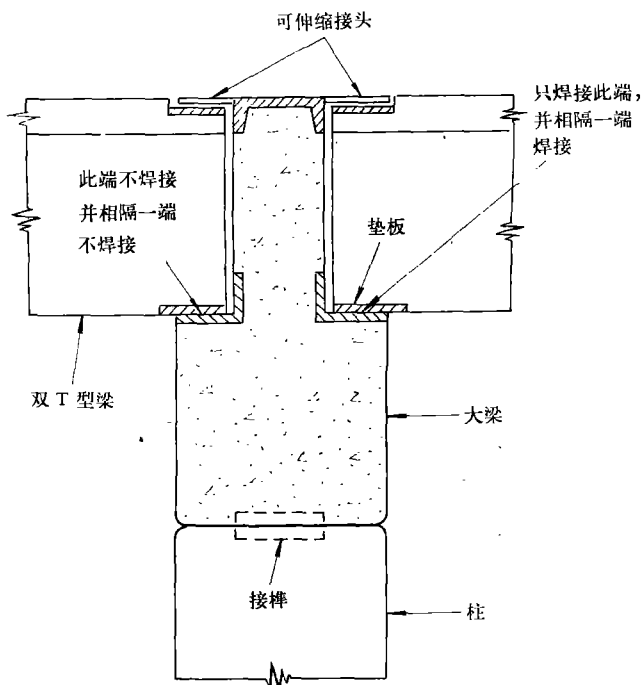


图7 预应力大梁与双T型梁相搭接处

梁仅在一边焊接，而且焊缝也很小。试想，若非预应力构件，跨度仅为28英尺的梁一般是不考虑伸缩问题的。然而，少量的焊接却带来很大的后患。

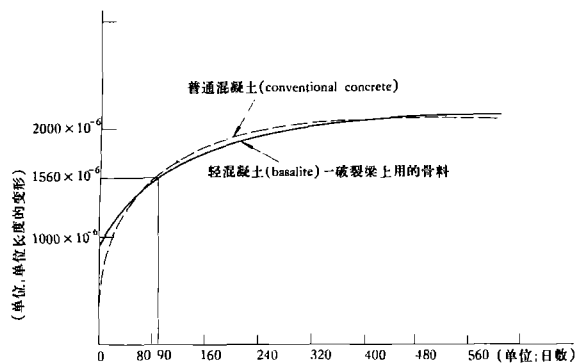


图8 普通与轻混凝土在受力后变形的比较

我们首先估计一下28英尺长的双T型梁的收缩量。影响收缩率的主要因素是混凝土的强度和砂石的硬度，不同的材料有不同的收缩率。图8是双T型所用材料的收缩曲线，试验压力是材料强度的55%。在美国，梁脱模后一般是等90天，待梁作大量的收缩后才送到现场。一般收缩试验的时间是两年左右，那时的曲线已相当平直。用公式估计20年后的变形是2,200，净值为2,200-1,560=640。其中干缩部分占220，约两年已达到；蠕变的数目为420，还需要以预应力和曲线所用应力的比例作修改。腹板下部的预应力平均仅760磅/平方英寸，而曲线图的应力是 $0.55 \times 4,000 = 2,200$ 磅/平方英寸。应力的比例差不多是一

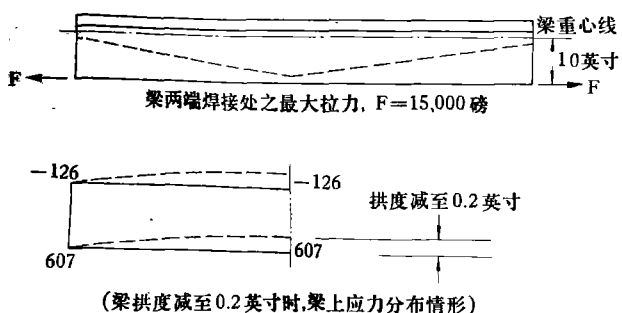
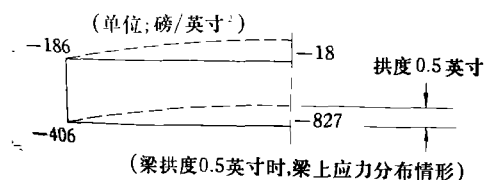
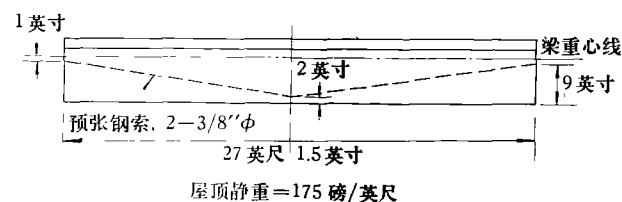


图9 T型梁上由于拱度而产生的应力分布情况

条直线，所以双T型梁收缩的总量大约是 $(220 + 420 \times \frac{760}{2,200}) \times 10^{-6} \times 28 \times 12 = 0.12$ 英寸。

此0.12英寸的收缩量经过20年的时间是会积聚出来的，但是收缩的形式却和普通混凝土构件不一样。图9的上部表示双T型梁刚安装时的应力和拱度(camber)的数值。当两端焊接之后，梁的长度就不能随着收缩而减少。但梁仍继续收缩，因此拱度将随着收缩而减少，直到曲线成为直线为止。如果再继续收缩，则梁势必开裂。不过，事实不可能如此，因为使拱度平直所需要的拉力为24,000磅，而焊缝很小，根本不可能产生如此大的拉力，即使焊缝在施工的时候加大了，也只能产生15,000磅的拉力，这将超过屈服极限(yield limit)。图9的下部表示20年后焊接接头在梁上产生的应力。将上、下部的应力结合起来，就发现只有梁端的下部存在张应力，如此可以断定必然在这里发生开裂。

混凝土稍能抗拉，一般抗拉应力强度是300至400磅/平方英寸，超过此数即将开裂。预应力梁端部位的应力十分复杂，可能是一个弹性与塑性集合的区域。这里仅按弹性作一些定性分析。

梁端预张钢索向混凝土部分施加全部压力所需

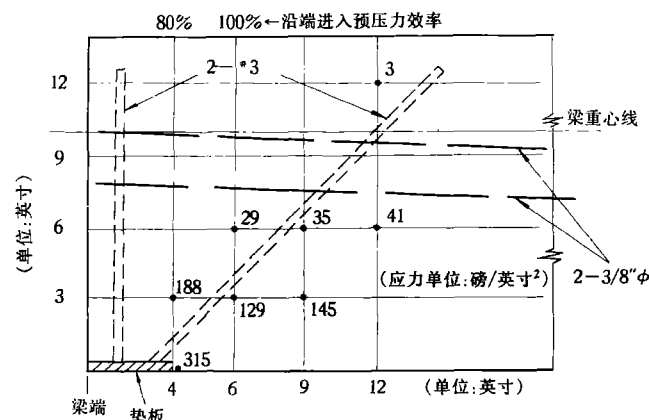


图10 T型梁端处主拉应力分布情形(破裂极限之内)

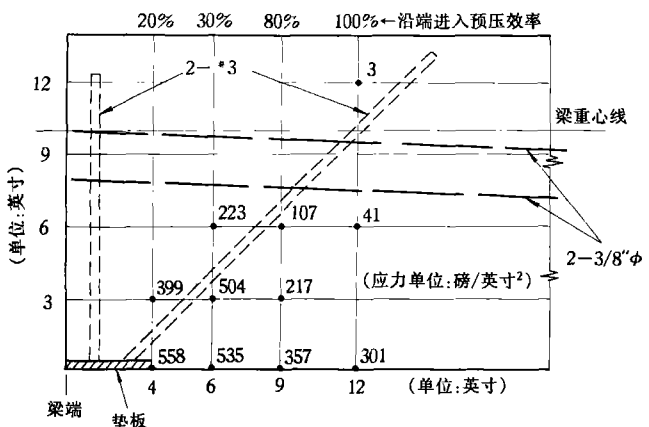


图11 T型梁端处的主拉应力分布情形(超出破裂极限)

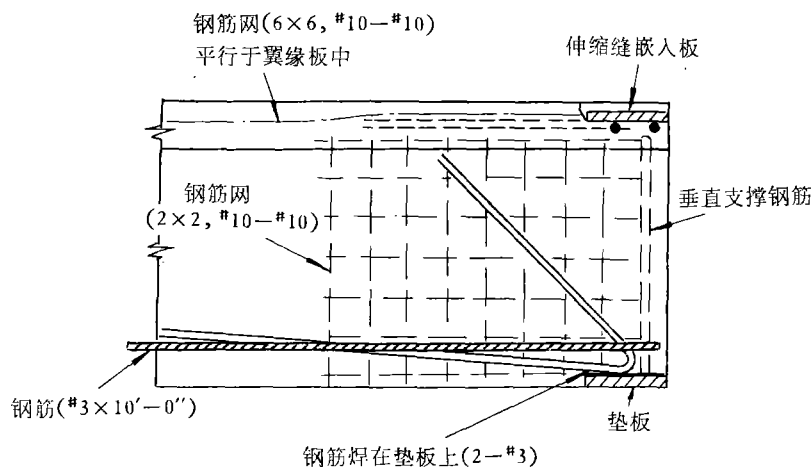


图12 双T型梁端设计

要的粘结长度不一，即梁端钢索的粘结传递（bond transfer）长度不易确定。根据调查，这种双T型梁构件的粘结传递是6英寸至13英寸。假定是6英寸，则在端部区域内，由于静载荷产生的弯矩应力和剪应力，以及钢索偏心张拉产生的应力所合成的主张应力（principal tension stress）如图10所示。如假定传递长度为13英寸，则合成的主张应力比前者大很多，见图11。

图10所示主张应力尚未达到破坏的极限，但图11所示却超出了开裂的极限值，恰与现场检验的结果相符。因为收缩的量极小，如果T型梁是一整体结构，梁的两端将外墙拉进微量，就不会产生开裂破坏的现象。本工程实际上有许多地点已经作了微量移动的接头，因此仅有一部分梁端出现破裂而并不是全部。但是还没有出现破裂的双T型梁，很可能已存在很大的张应力，而蠕变将随时日继续增加，因此绝不能保证以后不出现破裂。在已经破坏的双T型梁中，发现腹板两端都加以焊接的，其破裂程度最大，只在一端焊接的，则仅在焊接的一端开裂，而且裂缝较小。

蠕变是与应力成正比的。因为预张钢索有一定的角度，因此在梁的翼缘与腹板的上部所施加的应力比腹板下部小，由此，上部将限制下部的自由收缩，这就是说，仅在双T型梁一端焊接，也无法防止产生张应力。

梁端上钢索粘结力的大小不但决定传递长度，也决定了梁端开裂的可能性。在审查施工纪录中，发现在浇混凝土时控制不够严格，施工质量不够标准。这些双T型梁是经过十多小时的蒸气养护后拆模施加预应力的。但是记录中没有混凝土试块的试压数据，仅有经过七天标准养护室养护后试验的数据。因此，在应力传递问题上，混凝土是否达到规定的3,000磅/平方英寸的强度是一个很大的问题，如果没有达到，则粘结力自然很小，这就难免产生开裂。

该校舍建成两年后，又在其旁另建一幢。新旧两幢的长度一样，新校舍宽度稍小，但设计完全相同，利用原来的施工详图。迄今也已将近二十年，可是没有发现一丝裂缝。原因是两个施工单位不同。新的施工单位规模比较大，颇负声誉。从前后的施工记录来看，发现新校舍也是以蒸气养护处理，但经过20小时以后才施加预应力，同时他们有试验养护一天的混凝土试压纪录，强度平均比规定的超过1,000磅/平方英寸，在他们所做的细部施工图上，发现在梁端多放了三根钢筋，还加上钢筋网（图12）。这些增加的钢材对增加抗拉强度大有益处，因此不致产生开裂。（在美国，设计与施工是两个不同的公司，施工公司得标后自动增加材料是少有的现象。）

总之，预应力混凝土构件在节省钢材方面是十分显著的。但同时也必须注意在设计 and 施工两方面都要采取严格和谨慎的态度。美国二十年前有一股预应力混凝土的热风，工程师们都趋之若狂。但是由于思想认识仍受普通混凝土框框的限制，没有细致识别两种构件受力的不同；此外，没有谨慎地处理地震区的有效抗震接头，以致二十多年后，产生严重倒塌事故。

近年来加州政府进行大规模调查工作。调查结果，从1955年至1980年间建筑的公立中小学校约30,000所，其中有200所应用了预制预应力混凝土梁。这200幢建筑物中发现有小问题的共24幢，有大问题而需要封禁或作临时顶撑的共8幢。

在六十年代初期，预制预应力梁相当流行，除了学校建筑之外，商业建筑也广为采用。现在这些建筑物也发现了问题。商业建筑物为私有产业，不属于政府机构调查范围。不过将会陆续发现问题是可以预言的。

预制预应力梁因蠕变而破裂是当前美国工程界的热门课题，必将获得更加充分的研究。