

甘肃瓜州东千佛洞第5、7窟主室顶部历史 保护加固调查

杨 韬¹ 杨志强²

(1. 敦煌研究院保护研究所, 甘肃敦煌, 736200; 2. 麦积山石窟艺术研究所, 甘肃天水, 741020)

摘要 瓜州东千佛洞石窟是敦煌石窟群的重要组成部分, 第5窟、7窟在20世纪90年代因窟顶坍塌严重, 采取支顶加固方式确保洞窟的整体稳定, 时隔20年东千佛洞第5窟、7窟壁画塑像出现各类病害, 历经4年洞窟的壁画塑像得到了全面保护。立足今天石窟观赏性和展示利用需求, 本文系统梳理了第5窟、7窟支顶结构的设计方案、实施及效果, 并将相关内容整理完善, 提出了替代结构的设计思路, 为未来采用合理的结构体系对其进行替代提供依据, 对东千佛洞保护利用具有重要的借鉴意义。

关键词 东千佛洞 第5、7窟 窟内顶部 保护加固

引 言

东千佛洞石窟位于甘肃省酒泉市瓜州县城东南92km处, 西距敦煌莫高窟148km、瓜州榆林窟约75km, 因与敦煌西千佛洞相对的地理位置, 故惯称“东千佛洞”, 又因其中第7窟绘有接引佛, 因此又称“接引寺”。东千佛洞洞窟群开凿于长山子北麓的古河道两岸的崖壁上, 距地高4~15m, 长约600m。洞窟始创于五代, 宋、西夏、元、清代各有增修, 逐渐形成规模较大的石窟群^[1]。现存23个洞窟, 保存有壁画和塑像的洞窟共9个, 民国十八年时任安西县县长的曹馥首次对洞窟进行编号, 现在采用的洞窟号为1982年10月常书鸿先生所编^[2]。

甘肃瓜州东千佛洞石窟是敦煌石窟群的重要组成部分, 现存最早的壁画彩塑洞窟为西夏时期洞窟, 与榆林窟同时期洞窟共同构成西夏和元代的佛教艺术宝库。同时它又具有自身不可替代的价值与特点, 是西域早期石窟形制的再现, 具有较高的文物价值。但因其自然环境恶劣, 地理位置偏僻而交通不便, 以至于长期处于无人问津的状态, 虽然后来经历多次保护加固, 但2014年之前所做的保护工作均未能留下可供参考的资料。近年来在保证第5窟、7窟主室顶部稳定性的前提下, 敦煌研究院组织人员完成了对20世纪90年代加固的协调处理, 保证了整窟观感。本文立足于敦煌研究院前后两次东千佛洞的现场保护修复工作, 并以此积累的重要成功实践经验为基础做一对比总结, 同时

会对5窟所设支撑立柱结构进行详细叙述，以期今后技术成熟和各方面条件允许且不影响整窟长期保存的情况下能予以拆除，恢复洞窟形制。

1 两次保护工程概况

1.1 20世纪90年代第5窟、7窟现状

受时代和条件所限，早期对文字、图片资料的收集和保存极少，幸张宝玺、周维平二位先生文献内有第5窟主室顶局部照片一张、少量现状记录及7窟较为详细的现状记录^[3, 4]，且笔者当时修复现场笔录中也有以下记录。

第5窟主室：南北两壁壁画保存较为完好，东壁除北侧保存一部分壁画外其余均脱落，顶部壁画大部分塌毁且崖体有掉落情况（顶部崖体较薄，砾石层疏松）；整窟无保留塑像。1991年安西博物馆为该窟加设了铁门。

第7窟主室：西壁壁画大面积脱落，其余各壁壁画保存基本完好，顶部无壁画保留且崖体塌毁严重（顶部崖体较薄，砾石层疏松），尤其窟门顶部位置；整窟保留塑像4身，东壁中心佛龕内塑像被毁严重。1991年安西博物馆为该窟加设了铁门。

1.2 2014年第5窟、7窟现状

第5窟、7窟主室：各壁面壁画大部分区域经过加固，已加固地仗层强度过大且表面协调处理工艺不成熟，导致加固表面和壁画边缘部位有明显炫光，局部开裂严重；第5窟顶部麻泥加固表面未进行协调处理，第7窟顶部水泥加固表面未进行协调处理。

20世纪90年代，东千佛洞洞窟因年久未修，大部分洞窟存在坍塌、裂隙发育、洞窟壁画受损、自然环境侵蚀严重等问题。敦煌研究院保护研究所组织专业技术人员，开展了抢救性的保护修复，有效遏制了洞窟坍塌、壁画和塑像长期受自然因素侵蚀的现状。特别是针对第5窟、7窟严重坍塌的现状，本次抢险加固工作在消除洞窟安全隐患的同时，保证了两窟窟形完整，使洞窟免遭塌毁威胁，可谓意义重大。随着时间推移及保护工作的深入进行，发现当时针对第5窟、7窟主室顶部的抢险加固工作虽然消除了洞窟存在的安全隐患，也保证了窟形完整，但第5窟、7窟主室顶部水泥加固严重影响了窟内整体观感，亟待处理。由此，2014年开始，敦煌研究院组织相关技术人员开展了东千佛洞的第二次保护加固工作，此次保护加固工作对东千佛洞现存有壁画彩塑的洞窟从前期调查、方案设计到实施等做了一系列的全面性工作，至2018年底解决了各洞窟壁画彩塑面临的各项问题，同时对第5窟、7窟主室顶部做了协调处理，保证了此二窟整体观感。由于第5窟1993年所设支撑立柱依旧发挥着遏制洞窟顶部坍塌的作用，因此设计方案中未对其进行改动，但支撑立柱的存在对洞窟形制、参观游览和洞窟整体观感均有不同程度的影响，因此，在技术成熟时，可采用更加隐蔽的措施替代现存结构。本文系统梳理了第5窟、7窟主室顶部的前后两次保护工作，并提出第5窟、7窟立柱替代的设计思路，对第5窟所设支撑立柱处理具有重要的借鉴意义。

2 第5窟、7窟保护现状与设计方案

2.1 5窟现状和洞窟窟顶加固设计

2.1.1 保存现状

本次加固发生于1993年7月，由于东千佛洞崖体结构较疏松且又受湿度影响，主室窟顶崖体有塌毁危险，本次加固旨在能够长期完整地保存洞窟形制及窟内遗存。

2.1.2 保护设计

在主室中心设一立柱，且依据顶部形制所保留四披仿木梁痕迹的走向，在所设立柱上加梁对顶部进行支撑。此立柱主体边长为1m，通高为4.2m（图1）。

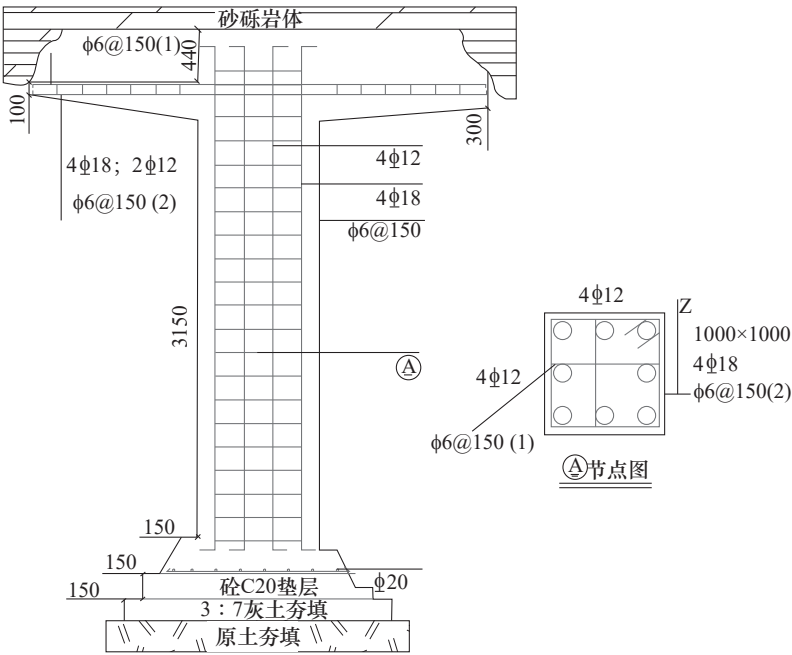


图1 支撑立柱及梁体结构图
(本图标注尺寸单位均以mm计)

(1) 支撑立柱基础

在距中心佛台0.25m，距南壁2.38m，距北壁2.38m，距东壁2.4m的中心位置，以面积为1m²的正方形范围内下挖0.3m为基础；于下挖处四角各立一根B18螺纹钢，并于下挖处四边中点部位各立一根B12钢筋，螺纹钢和钢筋均通向窟顶；使用Φ6钢筋制作成边长为0.95m的正方形箍筋结构，共计制作21个；从底部开始每间隔0.15m，将制作的21个正方形箍筋体固定在通向顶部的8根螺纹钢和钢筋上；完成后对基础使用水泥砂浆进行灌筑，水泥砂浆配合比为，水泥：砂：水=1：1：（0.38~0.4），水泥为425号普通硅酸盐水泥。

（2）支撑柱体

对通向顶部的8根螺纹钢和钢筋支模并进行固定，此过程耗时较长，因为要详细检查各受力点，防止灌注过程中跑模对本体造成的污染；确保万无一失后，开始灌注水泥砂浆形成支撑柱体部分，灌注过程中要保证灌注浆液的密实度（当时东千佛洞未通电，水泥砂浆振动设备无法使用，只能使用手工分段进行柱体浇筑）；水泥砂浆灌注至3.15m处时停止，准备四披加梁托撑的工作。

（3）四披加梁托撑

四披加梁托撑工作是至关重要的一环，各梁与支撑柱体衔接，可以有效分散托撑顶部压力，保证加固效果。各披间加梁的制作方法为：按照窟顶形制的四披仿木梁走向，以支撑柱体3.08m以上未浇筑水泥砂浆的钢筋柱体为基础，在每披下方使用B18螺纹钢及B12钢筋做与各披等长（尺寸基本为长1.4m、宽0.3m左右）的梁骨架；梁骨架由上方每披各4根B18螺纹钢、下方每披各2根B12钢筋及6根2m的螺纹钢为主体固定于支撑柱体3.08m以上未浇筑水泥砂浆的钢筋柱体上，并使用围筋再次固定梁骨架主体使其更具稳固性，围筋由Φ6钢筋制作成0.3m×0.2m的长方形结构，共计制作24个；将制作的24个围筋固定在四个梁骨架上，以每披梁骨架配6个围筋且间隔0.15m的结构布设；对梁骨架支模固定后使用水泥砂浆进行灌注。

（4）壁画脱落部位加固

使用1（PS）：1（水），加入2%（ Na_2SiF_6 ）为配比的材料对顶部壁画脱落部位崖体进行喷渗加固。为了使整窟协调统一并巩固加固效果，在完成喷渗加固后使用麻泥将壁画脱落部位进行了加固，受当时地仗层加固表面协调处理的理念影响（地仗层加固表面均处理至光滑），地仗层加固表面常有炫光现象。

（5）砌筑墙体支撑顶部

为了保证洞窟顶部更具稳定性，又在窟门南侧部位设置墙体对顶部进行支撑，砌筑墙体由水泥砂浆及红砖构成，砌体高3.02m，宽1.7m，进深0.25m。

（6）水泥支撑表面协调处理

对砌筑墙体、各披梁体及支撑立柱表面进行协调处理。所用材料为1（PS）：1（水），加入适量当地黄土（以不影响喷渗为宜）。

2.2 第7窟现状与洞窟窟顶加固设计

2.2.1 保存现状

受湿度影响，第7窟与第5窟一样的疏松质崖体常有塌落现象（1992年窟顶崖体就发生大面积掉落），窟顶西侧靠窟门部位塌毁尤为严重，于1993年7月开始对其进行加固。主室顶部已无壁画保留，由窟顶东壁两角保存开凿的孔洞来看，推测开窟时佛龕应设有木结构。与第5窟加固目的一样，本次加固旨在长期完整地保存洞窟形制及窟内遗存。

2.2.2 保护设计

依据顶部形制所保留痕迹的走向制作钢筋骨架，完成后支模并使用水泥砂浆进行填筑（图2）。

（1）顶部崖体加固

使用1（PS）：1（水），加入2%（ Na_2SiF_6 ）为配比的材料，对顶部崖体进行喷渗加固。

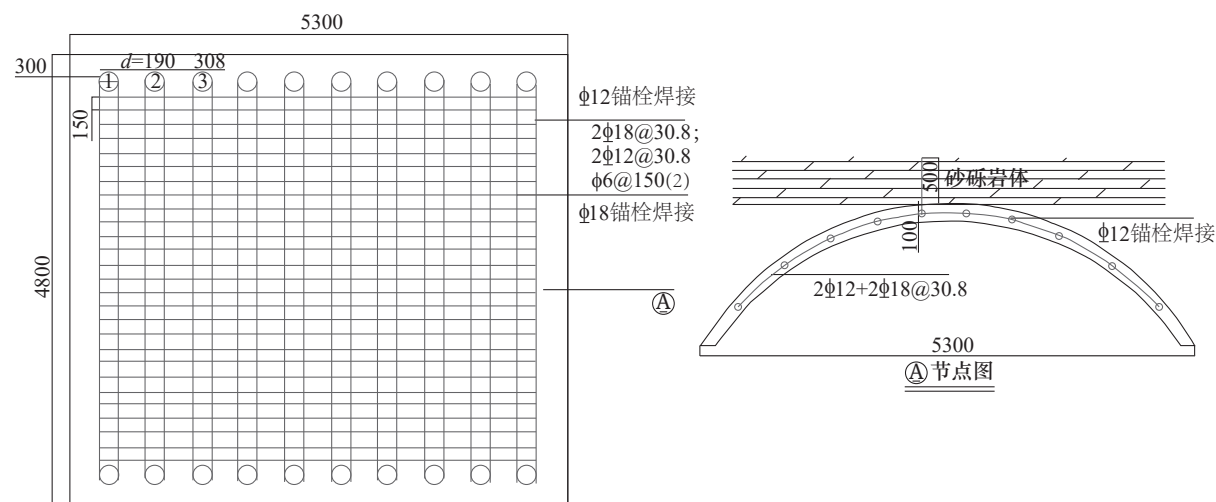


图2 钢筋骨架结构

[本图标注尺寸单位均以mm计；编号1、3……的锚固点由长麻缠绕的2根 $\Phi 12$ 组合而成植入，
编号2……的锚固点由长麻缠绕的2根 $\Phi 18$ 组合而成植入]

(2) 制作钢筋骨架

在南、北壁与顶部交接处开设深为0.5m的锚孔各10个，两壁第一个和最后一个锚孔距东、西壁0.3m，且各锚孔间距0.31m左右；按窟顶形制走向在锚孔内植入钢筋作为主筋，两壁东起第1、3、5、7、9锚孔内植入B12钢筋，第2、4、6、8、10锚孔内植入B18螺纹钢，每个锚孔内均植入两根钢筋和螺纹钢且用长麻缠绕后，使用水泥砂浆进行加固；保养至主筋植入部位稳固后，使用 $\Phi 6$ 钢筋在主筋上部焊接围筋，围筋共计27根为东西走向，每根间隔0.15m。

(3) 支模填筑

从北壁东侧起，以长为2m的木板且两块为一组固定后使用水泥砂浆进行填筑，到窟顶中心位置后停止；使用同样的方法以3.2m长的木板使用水泥砂浆进行填筑，直至窟顶中心位置；两处至中心位置准备封闭时出现困难，经反复商榷后决定将木板截成0.3m，以使两处在中心位置更好地结合，完成后使用水泥砂浆自东向西进行填筑，直至两处完全结合。

2.3 5窟、7窟壁画塑像保护

2.3.1 保护现状

本次保护工作是2017年开始的一次全面性保护工作，但由于本文针对洞窟顶部，旨在能够更好地保存第5窟顶部壁画的同时对加固部位进行协调处理，并对7窟顶部水泥加固层进行协调处理，使整窟观感统一，因此梳理并未将壁画塑像本体的保护工作列入其中。第5窟顶部和第7窟顶部经过20世纪90年代设计加固后，两窟窟顶稳定性均得到基本保证，趋于稳定，但观感协调性尚不佳（图3）。

2.3.2 保护设计

对5窟顶部麻泥加固表面进行拉毛处理，完成后使用当前成熟的地仗层脱落加固工艺加固；对第7窟顶部水泥加固表面开设锚孔并拉设长麻，完成后使用壁画地仗层脱落加固材料及工艺进行协调处理。

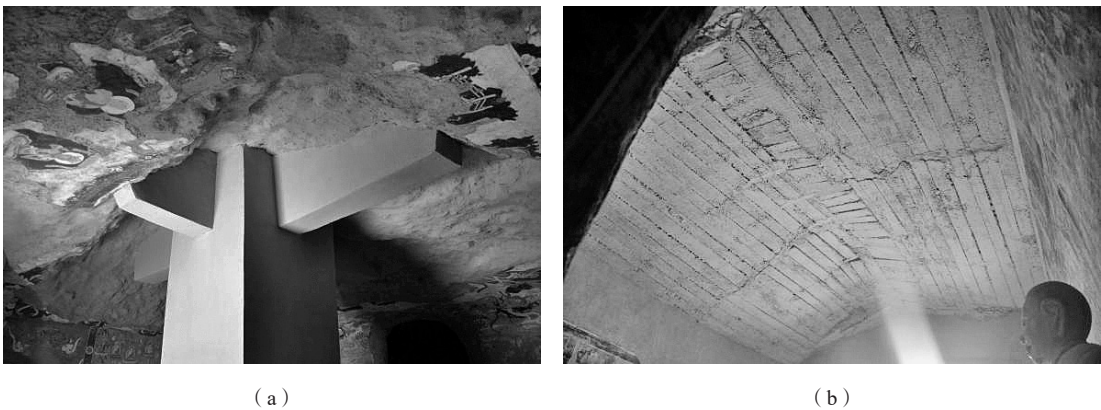


图3 20世纪90年代加固后保存现状
(a) 第5窟主室顶部现状；(b) 第7窟主室顶部现状

2.3.3 保护实施过程

第5窟顶部：受第一次加固理念及材料的限制，被加固区域效果凸显出不尽如人意之处。因此，对东千佛洞的早期加固严格按照室内实验结果，结合现场试验，考虑补配材料的收缩性、颜色、强度等多项指标后，使用当前成熟的地仗层脱落加固工艺再次进行加固。具体修复工艺为：①先对早期修复材料使用纯净水进行渗透软化，分次剔除后用蒸馏水进行清理；②待地仗层干燥后，采用浓度为1%的丙烯酸乳液对地仗层多次渗透加固；③随后利用当地土、澄板土与细沙质量比为1：1：1的草拌泥进行加固，为了使新加固地仗中的水分对壁画颜料层的影响降到最低，在与壁画相连接部位预留至少1cm，待加固部位完全干燥后再对预留部位进行修复，有效避免了大量水分渗入壁画表面，污染壁画；④新加固地仗表面使用麻泥进行加固，加固表面应低于壁画颜料层0.1~0.2cm，体现文物保护“可识别”原则；⑤加固完成后使用自制钢刷对加固表面进行协调处理，使新加固地仗表面处理至自然脱落状^[5]。不同的是，被加固区域除局部高于壁画表面外，大部分区域均只需对第一次加固表面进行拉毛处理后，施以较薄麻拌泥即可。因此，只对局部高于壁画表面被加固区域进行剔除。经过本次协调加固处理，历史加固地仗层表面光滑及炫光的现象得到有效解决（图4）。



图4 第5窟主室顶部协调处理加固效果
(a) 主室东侧顶部柱南协调处理加固前；(b) 主室东侧顶部柱南协调处理加固后

第7窟顶部：考虑到顶部水泥加固层目前状态良好，且未对窟内遗存产生其他影响，因此暂时保留，但需对其进行协调处理。由于窟顶面积大且受重力影响，采用传统锚固法对大面积水泥加固层进行协调加固，能有效解决加固材料与水泥层连结性差的问题。协调加固过程具体为：①在水泥层加固表面开设深0.06m、直径0.014m，且间距0.25m左右的锚孔共计390个；②制作长0.07m、直径0.013m左右的竹质锚杆共计390个，完成后置入开设的锚孔内；③待植入锚杆稳固后在锚杆上挂设长麻，一半将各锚杆相互串联，一半在后面泥层加固材料处理时将泥层串联，这样相互串联可以使泥层加固材料与水泥层加固衔接，更具稳定性；④使用壁画彩塑地仗层加固材料对水泥层进行加固，加固过程分三次进行，完成后使用修复工具将泥层加固表面处理至斑驳效果，使其与原有地仗层相协调（图5）。

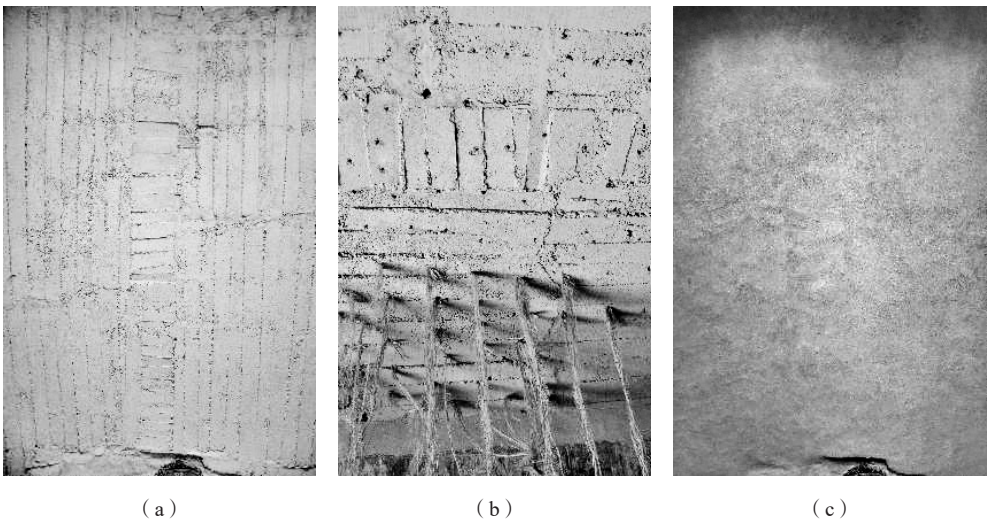


图5 第7窟主室顶部水泥层协调处理加固效果

(a) 协调处理加固前；(b) 协调处理加固中；(c) 协调处理加固后

3 第5窟、7窟保护两次保护效果讨论

3.1 时代背景

20世纪90年代，石窟寺生活条件非常艰苦，尤其是北方偏远地区的东千佛洞石窟，交通、用水、用电极为不便，所以开始的第一次保护也相当困难，当时，保护人员不仅要进行高强度的保护工作，生活基础问题也需要自身解决，高度“奉献精神”便是在长此以往的保护工作中形成。第二次保护时，全国生活条件有了长足改善，东千佛洞整体生活条件也有所提升，但受地理位置影响还是较为滞后，这一时期对于保护人员各方面工作的开展同样是不小的考验。

3.2 保护理念

20世纪90年代是敦煌研究院对石窟寺保护工作由摸索向高速发展转变的阶段，这一时期也是敦煌研究院对莫高窟以及周边石窟抢险加固工作最频繁的时期，尤其针对崖体结构性问题及洞窟形制

的保护,对于很多濒临坍塌洞窟的存亡起到关键性作用,当时石窟寺保护理念以抢救性保护为主。进入21世纪,国际和国内文物古迹保护理念开始深度融合,敦煌研究院对石窟寺各项保护工作也达到趋于成熟的阶段,文物保护理念开始由注重抢救性保护向抢救性与预防性保护并重转变。

3.3 保护材料、技术

20世纪90年代,石窟寺保护材料、技术处于发展阶段,这一时期保护技术明显粗糙,多数保护工艺欠缺科学依据,基本都以“保命性”加固为主,很少考虑加固表面观感。在崖体渗透加固材料方面,此前目光多聚集于有机材料,李最雄先生经过长期室内试验首次研发出一种无机材料——高模数硅酸钾(PS),并且在庆阳北石窟寺风化砂岩的封护加固试验和现场应用中效果理想^[6],且经过约5年时间,其稳定性表现依然良好,为了使这一新型材料更好应用在风化砂岩之上,又在庆阳北石窟寺黄砂岩、炳灵寺石窟红砂岩以及日本福岛县小高町药师堂黄色凝灰岩上进行了一系列研究,研究表明PS材料加固风化砂岩的关键点在于其模数,将模数控制在3.8~4加固效果较理想,同时也对其加固工艺进行了把控^[7],而PS也成为这一时期东千佛洞窟顶加固工作中的主要渗透加固材料;在洞窟内顶部加固工艺方面,传统加固方法主要有拱形砌补和混凝土支柱法两种,从1991年开始,敦煌研究院和美国盖蒂保护所专家合作对薄顶洞窟进行了加固试验研究,在模拟实验的基础上成功加固了莫高窟460窟窟顶^[8],但加固主要针对窟外顶部,敦煌研究院保护研究所后于1993年在铁道部科学研究院西北分院的滑坡治理专家及结构专家协助下,对榆林窟6窟顶部采用新加固技术进行了稳定性保护工作,对于整窟遗存保护是行之有效的^[9],东千佛洞窟内顶部的加固便发生在这一时期,其中5窟内顶部加固采用混凝土支柱法,而7窟内顶部加固则与榆林窟6窟加固方法基本一致又较早于其加固时间,处于对洞窟内顶部加固新工艺的摸索试验阶段。

随着保护工作的深入,保护技术也在长期探索中变得精细,多数保护技术也能够得到科学理论支持。在崖体渗透加固材料方面,PS材料的适用性不断得到验证,其施工工艺研究也不断细化^[10-15];在洞窟内顶部加固工艺方面,工程地质学、地质力学、滑坡学及岩土工程学等学科的一些成熟理论和技术引入文物保护中,隐蔽型结构得以大量应用于薄顶洞窟加固之中^[16-19]。科技在保护工作中的重要性日渐明显。

3.4 替代结构设计思路

第5窟、7窟第一次加固受保护理念和技术影响,顶部加固设计主要衡量点是崖体结构性问题及洞窟形制的保护,加固过程中很少考虑到可逆性和对本体全面性的保护。随着保护理念和技术的不不断提升,第二次保护工作更为细致全面,即在第一次加固基础前提下,侧重点偏向对窟内遗存的保护和加固部位整体协调性方面,为将来的展示利用打下了坚实基础。就最终加固效果而言,第7窟内顶部经过前后两次保护加固后,基本达到展示利用要求,而第5窟内顶部因为有壁画保留,导致第一次加固时采用了传统的“混凝土支柱法”,虽然第二次保护加固时对第一次加固面进行了协调处理,但第一次加固时所设支撑立柱和砌筑墙体问题的解决未涉及其中,这对于石窟将来的展示利用和观赏性影响依然较大。笔者认为条件允许后应该对此结构进行替代,比如可以依托此前加固基础,对四披加梁托撑的受力点进行科学分析后采用先进的轻型受力材料进行隐蔽处理,这将是后保护时代需要着重考量的问题,倘若替换可行性达到要求,也要再三进行综合考量,当前对其进行数字化保护应该是迫在眉睫的,相信随着保护理念、技术以及科技的不断加持,定会将此问题很好地解决。

结 语

东千佛洞石窟地处偏僻，生活和工作困难重重，尤其是第一次加固异常艰辛，局限于时代背景、保护理念和保护技术发展，虽然两次保护工作均有不尽如人意之处，但是两次保护加固均有效遏制了东千佛洞第5窟、7窟病害的进一步发展。20世纪90年代通过结构性支顶，保留了原有第5窟、7窟窟形、阻断了自然风雨对洞窟壁画塑像的侵蚀；此次修复最大限度地保护了洞窟壁画塑像，遏制了洞窟各类病害的进一步发展，两次保护工作对第5窟、7窟的长久保存意义重大。

1) 实践证明，随着保护理念和技术的发展，所有保护工作均具有时代的局限性，每一项保护措施均应充分考虑保护工作的可逆性。

2) 保护工作永远是循序渐进的过程，保护档案在为后续保护工作提供技术借鉴的同时，更多将为精准施策提供工程依据。

3) 保护措施从来没有“一劳永逸”，保护材料、技术和保护理念都在不断更新，因此，保护工作要在现有保护基础上尽最大努力延长文物本体寿命的同时，尽可能保证所采取保护措施的可逆性。

附记：1992年东千佛洞第5窟及7窟保护加固总负责人为时任敦煌研究院保护研究所所长的李最雄先生，现场负责人为陆立成，参与本次保护加固工作的敦煌研究院保护研究所其他人员为：杨韬、马述仁、付有旭、裴佐成、张道林，安西博物馆（现瓜州博物馆）的刘晓东、张杰儒、解学云、杨洪文、聂洪清。

参 考 文 献

- [1] 周维平. 东千佛洞石窟述论[J]. 社科纵横, 1996(3): 32-34.
- [2] 李春元. 安西早峡石窟[J]. 敦煌研究, 1996(2): 46-50, 188.
- [3] 张宝玺. 东千佛洞西夏石窟艺术[J]. 文物, 1992(2): 81-94, 57.
- [4] 周维平. 东千佛洞石窟述论[J]. 社科纵横, 1996(3): 32-34.
- [5] 杨韬, 张亚旭, 杨志强, 等. 甘肃瓜州东千佛洞壁画材质分析及保护修复思考[J]. 文博, 2020(6): 91, 99-104.
- [6] 李最雄. 应用PS—C加固风化砂岩石雕的研究[J]. 敦煌研究, 1985(2): 3-6, 156-168.
- [7] 李最雄, 西浦忠辉. PS加固风化砂岩石雕的进一步研究[J]. 敦煌研究, 1988(3): 28-40, 115-116.
- [8] 李最雄, 王旭东, Agnew N, 等. 薄顶洞窟窟顶加固实验[J]. 敦煌研究, 1995(3): 18-22.
- [9] 李树若. 榆林窟第六窟整修报告[J]. 敦煌研究, 2000(1): 143-149.
- [10] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[J]. 中国文化遗产, 2004(3): 118-122.
- [11] 王旭东, 张虎元, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟崖体风化特征及保护对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1055-1063.
- [12] 郭青林, 王旭东, 范宇权, 等. 砂砾岩石窟灌浆材料PS-F机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3330-3335.
- [13] 李黎, 陈锐, 邵明申, 等. 经PS加固土遗址水饱和强度及加固效果的环境影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1074-1080.
- [14] 王彦兵, 王思敬, 李黎, 等. PS对潮湿环境土遗址加固潜力探讨[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32(4): 537-542.
- [15] 吴冠仲, 刘立志, 王捷. PS浆液加固西北地区砂砾岩石窟施工工艺研究[J]. 四川文物, 2014(1): 63-65.
- [16] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] 李文军, 王逢睿. 中国石窟岩体病害治理技术[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
- [18] 王逢睿, 肖碧. 大跨度薄顶石窟洞室加固技术探讨与实践——北石窟寺165号洞窟加固[C]. 2007海峡两岸岩土工程地工技术交流研讨会, 2007.
- [19] 满君, 谌文武, 孙光吉. 濒危薄型窟顶石窟加固新技术的应用研究[J]. 敦煌研究, 2009(6): 21-25, 121, 127.