

A Comparison of CO₂ Emissions between Conventional and Rammed Earth House Constructions

Shi Ching Wu¹, Jhe-yu Yang², Fenghsiu Lin³

1. Dept. of Environmental Resources Management, TransworldUniversity, Douliu 64031, Taiwan.

2. Dept. of Environmental Resources Management, TransworldUniversity, Douliu 64031, Taiwan.

3. Dept. of Business Administration, TransworldUniversity, Douliu 64031, Taiwan.

Email: 1. titwu12345@gmail.com, 2. yang.jhe.yu@gmail.com, 3. fenghsiu@tit.edu.tw

Abstract: According to our estimation which is based on the method of Chinese Wood Construction Buildings Association, the rammed earth construction emits 8.08 kg/m² of CO₂, compared with 37.79 kg/m² of conventional wood house (4.7 times of the rammed earth construction), 57.42 kg/m² of framed wood house (7.0 times), 108.4 kg/m² of framed wood house (13.4 times), and 160.4 kg/m² of reinforced concrete house (19.8 times). This result is encouraging when facing the pressure on energy and environment.

Keywords: rammed earth construction, CO₂ reduction

传统及夯土式住宅型建筑二氧化碳排放之比较

吴世卿¹, 杨哲宇², 林凤秀³

¹ 环球科技大学, 云林县斗六市, 台湾, 64031

² 环球科技大学, 云林县斗六市, 台湾, 64031

³ 环球科技大学, 云林县斗六市, 台湾, 64031

Email: 1. titwu12345@gmail.com, 2. yang.jhe.yu@gmail.com, 3. fenghsiu@tit.edu.tw

摘要: 本研究依据中华木质构造建筑协会的方法推估,发现住宅型夯土建筑每单位建筑地板面积 CO₂ 排放量约为 8.08 kg/m², 而传统木质梁柱为 37.79 kg/m² (约夯土建筑的 4.7 倍)、框组壁式木构造为 57.42 kg/m² (约 7.0 倍)、钢筋预铸为 108.4 kg/m² (约 13.4 倍)、钢筋混凝土为 160.4 kg/m² (约 19.8 倍)。面对当前能源以及生态环境压力, 此结果是令人鼓舞的。

关键词: 夯土技术; 二氧化碳减排

1 引言

生态环境保护与永续发展是目前众所瞩目的议题,自 1987 年「世界环境与发展委员会」所发布的「我们共同的未来」中,除了阐述人类目前所面临的经济、社会与环境问题外,更提出了「永续发展」的观念,强调「实现我们当前的需要,应以不损害子孙后代的需要为前提」。因此,夯土技术,这个传统的建筑工法又受到重视。它曾以有效地利用天然资源、节能、冬暖夏凉、耐久等优势而倍受建筑学家关注^[1]。本文则以二氧化碳减排的角度探讨此一工法之时代意涵。

2 文献回顾

在建筑发展史上,夯土建筑一直是受到广泛讨论的建筑技术^[2],它其实是生土建筑中的一种建造技术,

而生土建筑则是一个现代使用的术语,泛指世界各地仅以简单加工的土质材料建造的建筑,包括黄土高原上开挖的窑洞、用夯土形式建成的古城、用土坯形式砌筑的墙体、用泥加草调拌后修造的挑土墙、用版筑形式夯造的版筑墙和生土块砌筑的构筑物等^[3]。

2.1 建筑材料的使用

夯土建筑的最大特点是使用土做为材料,由于主要采用当地资材,因此较不需要耗费大量的能源加工生产,且使用后的材料,可以重复再利用,进入当地的循环系统,以形成一个完整的封闭式循环,而不会像目前的建筑废弃物所导致的线性循环,形成很多负面的影响。这种自然材料的生态优势是其它任何工业墙体材料无法取代的。

2.2 建造技术

夯土技术具有悠久的历史，主要是使用夯土工具将泥土夯实，以外部的作用力加以使得局部的土壤坚实牢固，从而求得整体的坚固，故也称做夯筑或版筑技术，秦汉时的许多段长城，就是夯土版筑而成^[4]。从 4000 年前的龙山文化遗址中，已发现了夯土所建造的城墙、台基和墙壁，可见当时人们已掌握了较成熟的夯土技术^{[5],[6]}。

按照施工技术可以分为直接夯筑和版筑夯土两种^[3]。直接夯筑依据建筑用途又可分为基槽型与堆土型，前者先拟定建构位置，挖沟做为墙体的基础槽，之后从基槽底部逐层向上夯实，主要为城墙之用；后者在需要夯实的部位直接堆土，然后用夯具逐层夯实，无须在土的周围进行支挡，使土自然成坡，主要用于构筑城台、墩台及大型墙体。

版筑的施工方式，是先制作夯筑模具以限定墙基的方位和墙体的长度、宽度，在模具内向土中加水，使其达到一定湿度（最优含水率），具备黏结的条件后填土加入版筑的模具内，整平夯实，当夯土层达到顶层高度时，两边再加木板或圆木，继续填土夯打，当第一、第二层完成后，取下第一层木板，放到第三层，再填土夯打，这样连续不断，直到需要的高度，就完成了一堵夯土墙的建造。

2.3 环境影响

建筑物的生命周期主要分为五个阶段：原材料的开采、建材的生产与加工、现场的施工、建筑物的运行及维护、拆毁处置。而绝大部分的能源消耗和环境污染，大都在建材生产和建筑物的运行这两阶段；从建筑的生命周期来评价其对于环境的影响，则建筑材料的物化能、建筑物的运行耗能以及建筑物的使用寿命，是主要的三大因素。^[7]

夯土建筑的主要的基本材料是泥土，而其泥土通常是取之于施工场址所在地，从物化能的角度看，相对于目前的砖瓦或 RC 结构之建筑的建材而言，泥土是不用在加工与运输过程中消耗物化能的，因此，这是一种理想的建材。

研究者发现^{[8],[9]}，夯土墙厚重的墙体具有优越的储热能力，可以在冬季的白天吸收太阳的热能，并将热能储存在墙体中，等到夜晚时再透过其辐射能提高室内的温度。夏天的时候，也可以透过建筑物的遮阳设备与良好的通风设施，并利用墙体吸收多余的热量，

以帮助维持室内凉爽舒适的温度，在室内温度稳定的条件下，也就相对减少了许多人为、额外加热或制冷的耗能需要。在条件适当的情况下，夯土建筑比传统的木框架填充墙建筑更节能 80%^[10]。

夯土建筑的可使用寿命很长。据普查数据统计，建造历史 500 年以上的古土楼有 20 多座，400-500 年的有 32 座，300-400 年的有 51 座，200-300 年的有 72 座，100-200 年的有 73 座；其中最古老的土楼是书洋镇下阪村的“裕昌楼”，建于公元 1308-1368 年间，至今已约有 600 多年的历史^[11]。

3 材料与方法

本研究以新式工法构筑一间夯土屋，并推估其二氧化碳排放，再与文献数据比较其排放之高低。

3.1 新式工法之夯土建筑

根据测试不同比例的夯土结构，发现「土：沙：熟石灰」比例以「5：3：2」的孔隙率较高^[12]。较高的孔隙率砌体对于外墙的保温具有优势，故采用此比率建构台湾的夯土建筑。且尚建丽^[13]的研究中发现，夯土墙之厚度采用 30 cm 以上较能达到其强度与稳定性。

因此，本研究改良传统版筑建构方式，先将夯土模具建成厚度 0.3 m 的空间，所形成的土墙长、宽、高内径各为 12、12、3.3 m，即地板面积为 136 m²。土墙内靠室内空间侧先放置硅酸钙板(12 mm 厚)，完工后即为夯土屋之内墙面，外模直接用六分板(18 mm 厚)构成鱼鳞板以防水，完工后不拆除。

3.2 建物 CO₂ 排放量推估

依中华木质构造建筑协会建筑物二氧化碳排放量精算法^[14]，将所有建筑物结构体的建材推估（不包括水电、设备、室内装潢、家具等资材），由各项建材的实际使用量与各建材之单位排放量，累算求得建筑物结构体的排放量，如次式所示：

$$E_{CO_2} = CO_2_i \times M_i$$

其中，

E_{CO_2} : 建筑物结构体总 CO₂ 排放量计算值(kg/m²)

CO_2_i : 各项建材之单位 CO₂ 排放量

M_i : 建筑物结构体中各项建材的实际使用量

4 结果与讨论

4.1 夯土建筑之建材用量与 CO₂ 排放量推估

如表 1 所示,本研究之夯土屋主体结构建材总量约 263.6 m³,而二氧化碳总排放约 1,099.9 kg,且完全来自硅酸钙板(水泥类)与六分板(木质类),其占比虽然不高,但却是唯一的二氧化碳来源。若不采用此类建材,夯土建筑其实已接近零排放。

表 1 住宅型夯土屋建材使用量与 CO₂ 排放量推估

类别	名称	体积(m ³)	体积(%)	排碳(kg)	排碳(%)
土质	泥土	128.8	48.9	0	0
	沙	77.3	29.3		
	石灰	51.5	19.5		
水泥	硅酸钙板	2.1	0.8	400.1	36
木质	六分板	3.9	1.5	699.8	64
合计		263.6	100	1099.9	100

注*: 地板面积 136 m²(约 41 坪)

4.2 传统建筑与夯土建筑 CO₂ 排放之比较

表 2 为以地板面积 136 m²住宅型建筑之比较结果,传统木质梁柱住宅约为 5,140 kg,钢筋预铸约为 14,743 kg,钢筋混凝土约为 21,814 kg(中华木质构造建筑协会^[15]),框组壁式木构造住宅约为 7,809 kg^{[16],[17]},均明显大于夯土建筑的 1,099 kg,可见得夯土建筑在二氧化碳减量的优势远远胜过其它传统的建筑。

表 2 夯土与各种传统住宅型建筑 CO₂ 排放之比较

建筑种类	排放量(kg)	地板面积排放量(kg/m ²)	比较
夯土 ⁽¹⁾	1,099	8.08	1.0
传统木质梁柱 ⁽²⁾	5,140	37.79	4.7
框组壁式木构造 ⁽³⁾	7,809	57.42	7.0
钢筋预铸 ⁽²⁾	14,743	108.4	13.4
钢筋混凝土 ⁽²⁾	21,814	160.4	19.8

资料来源: (1)本研究、(2)中华木质构造建筑协会^[15]、(3)涂三贤&林润宜^{[16],[17]}

5 结论与展望

5.1 结论

本研究发现,地板面积在 136 m²的各式住宅型建筑当中,夯土屋的单位地板面积的二氧化碳排放为 8.08 kg/m²,具有最高的减碳效益,依次为传统木质梁柱(4.7 倍)、框组壁式木构造(7.0 倍)、钢筋预铸(13.4 倍)、钢筋混凝土(19.8 倍)。且若只保留土墙部份,基本上是二氧化碳零排放。

5.2 展望

由于目前排碳推估只考虑建材(含加工)本身,排除建造过程中的运输、机具等因素,本研究建议日后研究者可加入生命周期评估方法,以更精确推估各种建筑的排碳量。

References (参考文献)

- [1] SHANG Jian-li, LIU Jia-ping, & ZHAO Xi-ping, "Test study on construction performance of energy-saving material," *J. Xi'an University of Arch. & Tech.*, vol. 35, 2003, p. 325 - 328. 尚建丽, 刘加平, and 赵西平, "低能耗夯土粗粒土建筑特性的试验研究," *西安建筑科技大学学报*, vol. 35, 2003, pp. 325 - 328.
- [2] D. Easton & C. Wright, *The rammed earth house*, CSIRO, 1996.
- [3] ZHANG Huyuan, ZHAO Tianyu, & WANG Xudong, "The geotechnical construction methods in ancient China," *DUN-HUANG RESEARCH*, 2008, p. 81 - 90. 张虎元, 赵天宇, and 王旭东, "中国古代土工建造方法," *敦煌研究*, 2008, pp. 81 - 90.
- [4] ZHANG Bo & WANG Yun, "Construction Technique Analysis and Improvement of Rammed Earth Wall of Rural Houses in Hanzhong," *J. Anhui Agri. Sci.*, 2010, p. 4327 - 4329. 张波 and 王赟, "汉中农村民居典型夯土墙营造技术解析及改进," *安徽农业科学*, 2010, 頁. 4327 - 4329.
- [5] CAO Wei, "On ecological building and its technology," *Industrial Construction*, vol. 31, 2001. 曹伟, "论生态建筑及其技术," *工业建筑*, vol. 31, 2001.
- [6] WANG Jun & LU Dong-jun, "To the future of the immature soil buildings," *J. Xi'an University of Arch. & Tech.*, vol. 33, 2001, p. 147 - 149. 王军 and 吕东军, "走向生土建筑的未来," *西安建筑科技大学学报*, vol. 33, 2001, pp. 147 - 149.
- [7] GU Daojin, ZHU Yingxin, & GU Lijing, "Life cycle assessment for China building environment impacts," *JOURNAL OF TSINGHUA UNIVERSITY(SCIENCE AND TECHNOLOGY)*, vol. 46, 2006. 顾道金, 朱颖心, and 谷立静, "中国建筑环境影响的生命周期评价," *煤*, vol. 9, p. 99.
- [8] ZHAO Xi-ping, MEN Jin-jie, SHI Qing-xuan, & LIU Jia-ping, "Experimental study on seismic performance and shear behavior of rammed-earth wall," *WORLD EARTHQUAKE ENGINEERING*, vol. 22, 2006, p. 29 - 33. 赵西平, 门进杰, 史庆轩, and 刘加平, "夯土墙在单调和反复水平荷载下的试验研究," *世界地震工程*, vol. 22, 2006, pp. 29 - 33.

- [9] LIU Yanfeng, LIU Jiaping, & ZHANG Jiliang, "Thermal stability of traditional tamped-soil dwelling in winter," *SICHUAN BUILDING SCIENCE*, vol. 34, 2008, p. 204 - 206.
刘艳峰, 刘加平, and 张继良, "传统夯土民居冬季热稳定性研究," *四川建筑科学研究*, vol. 34, 2008, pp. 204 - 206.
- [10] L. Elizabeth & C. Adams, *Alternative construction: contemporary natural building methods*, Wiley, 2000.
- [11] SU Xizhang, "A Marvel of Human Building——Nanjing Tulou," *FUJIAN GEOGRAPHY*, vol. 17, 2002, p. 35 - 37.
苏锡璋, "人类建筑的瑰宝—南靖土楼," *福建地理*, vol. 17, 2002, pp. 35 - 37.
- [12] WANG Dong & MA Quan-ming, "Experimental Study on Building Materials of Low-Energy Rammed Earth Houses in Anji of Zhejiang," *JOURNAL OF XUZHOU INSTITUTE OF ARCHITECTURAL TECHNOLOGY*, vol. 8, 2008, p. 47 - 50.
王栋 and 马全明, "浙江安吉低能耗夯土房建筑材料试验研究," *徐州建筑职业技术学院学报*, vol. 8, 2008, pp. 47 - 50.
- [13] SHANG Jian-li, "A Study of Optimization of the Ecological Building Material System of Traditional Rammed Earth Dwellings," *Xi'an University of Arch. & Tech.*, 2005.
尚建丽, "传统夯土民居生态建筑材料体系的优化研究," *西安建筑科技大学*, 2005.
- [14] CHANG Yu-Sheng, CHAENG Yuan-Liang, LIN Shien-Te, & SHEU Maw-Shyong, "A Simplified Evaluation Method for the CO₂ Emission of Buildings in Taiwan," *JOURNAL OF ARCHITECTURE*, 2002, p. 1 - 21.
張又升, 鄭元良, 林憲德, and 許茂雄, "台灣建築物 CO₂ 排放量簡易評估法之研究," *建築學報*, 2002, pp. 1 - 21.
- [15] Chinese Wood Construction Buildings Association, *Technical Handbook on the Construction of Wooden Houses*, Taipei: Forestry Bureau, of Council of Agriculture of Executive Yuan, 2005.
中華木質構造建築協會, 樑柱工法木構造建築物(住宅)之施工技術手冊, 台灣台北: 行政院農業委員會林務局, 2005.
- [16] TU San-Hsien & LIN Jun-I, "Performance of Energy Conserving and Carbon Dioxide Reduction by Platform Wooden construction house in Taiwan," *Forestry Research Newsletter*, vol. 16, 2009, p. 37 - 40.
塗三賢 and 林潤宜, "框組壁式木構造房屋在節能減碳上的表現," *林業研究專訊*, vol. 16, 2009, pp. 37 - 40.
- [17] TU San-Hsien, "Contribution of Carbon Sequestration and Carbon Dioxide Reduction by Wooden Construction Buildings in Taiwan," *School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University*, 2007.
塗三賢, "台灣地區木構造住宅對碳貯存與二氧化碳減量之貢獻," 2007.