

混凝土材料表層水分變化受環境濕度 影響之先期研究

Preliminary Study of the Moisture Variation in the Surface of the Concrete Material Affected by the Environmental Humidity

國立宜蘭大學
土木工程學系
教授

喻 新*

Hsin Yu

國立宜蘭大學
土木工程學系
助理教授

歐 陽 慧 濤

Huei-Tau Ouyang

國立宜蘭大學
土木工程學系
講師

江 啓 明

Chii-Ming Jiang

國立宜蘭大學
土木工程學系碩士班
研究生

林 政 隆

Cheng-Long Lin

摘 要

台灣地區溫暖潮濕，是適合霉菌生長的环境；在混凝土材料霉菌生長與表層水分有較大相關，所以本研究之目的在瞭解水害建築物室內空氣相對溼度環境因子與混凝土外殼(例如牆壁)的表層水分、孔隙相對溼度及混凝土材料水分含量變化之關係，以作為評估環境變化時對建築材料所產生之表面溼度狀況，進而評估霉菌生長之可能性。研究方法利用實驗箱中各固定溫溼度的環境狀況下，將混凝土試體鑽孔以量測其孔隙相對溼度，同時以水分計量測材料表層水分，並將試體稱重及烘乾，以得到混凝土材料含水量的變化。結果得到孔隙相對溼度、試體水分含量與試體表面水分與環境相對溼度之水分等溫圖，並可得到三種水分之相互關係圖，可以作為以環境相對溼度預測混凝土材料水分狀況之基礎資料，以評估霉菌生長之可能性。

關鍵詞：混凝土材料，表層水分，相對溼度，霉菌生長。

ABSTRACT

The climate of Taiwan area is warm and humid that is beneficial for mold growth. The effect is significant between mold growth and the surface water condition. The objective of this study is to find the relationship between the relative humidity of environment and the surface moisture, pore relative humidity, and water content of

*通訊作者，國立宜蘭大學土木工程學系教授，260 宜蘭縣宜蘭市神農路一號，yusin@niu.edu.tw

concrete materials, such as a concrete wall, in a water damaged building. Concrete samples are stored in a controlled plant growth chamber with constant relative humidity to measure the pore relative humidity by drilling a hole with a humidity sensor, and to measure the surface moisture by moisture meter, the water content of concrete samples is decided by weighting and oven-dry method. The pore relative humidity, water content, and surface moisture related to the environmental relative humidity are concluded as plots of water isotherm. The relationships between the above moisture expressions are also found. These results are not only helpful to predict the moisture condition of concrete materials with environmental relative humidity, but also can evaluate the possibility of mold growth.

Keywords: Concrete materials, Surface moisture, Relative humidity, Mold growth.

一、前言

台灣地區全年的平均氣溫介於 15°C 至 30°C 之間，適合大部分霉菌生長，建築物的室內溫度也大致介於相同範圍；加上氣候潮濕，水害建築物的比率可達 47% 至 73% (Li and Hus, 1977)，在受潮濕損害的建材上容易導致微生物生長，包括霉菌、腐爛產生的真菌、酵母菌以及病毒 (Flannigan and Miller, 1994)。在建材表面的霉菌及其菌絲可能從微生物的生長而轉化成爲氣懸生物氣膠，進而會引起吸入性呼吸道疾病或皮膚接觸性疾病，所以室內霉菌生長與材料濕度相關性的研究有其必要性，以建立評估潮濕或水害建築霉菌曝露及健康危害風險的基本資料。

在有關室內霉菌生長之研究，建築系統中室內空氣之溫溼度如何影響或傳輸至建築外殼(例如牆壁)的溫溼度狀況以提供霉菌生長之適宜環境是值得研究的課題，因爲霉菌的生長僅受到相對溼度之間接影響(Pasanen et al., 1991)，但是材料表面水分對霉菌生長有決定性影響，因爲真菌生長在基質表面，而不能利用到材料內部之水分 (Adan, 1994; Flannigan and Morey, 1996)。部分研究也證實在木材及隔熱材，霉菌的濃度與材料相對溼度有較大之相關係數($r > 0.79$)，但與材料含水量則較無相關($r < 0.45$)；但是在混凝土材料霉菌生長則與表層水分關係顯著($r > 0.74$)，與材料相對濕度則較無關($r < 0.28$) (Pasanen et al., 2000a)。所以物質表面的材料相對溼度對霉菌生長有直接影

響；相對溼度則證明對微生物生長僅有間接影響 (Pasanen et al., 1991)。

霉菌學者以水分活性 a_w 來表示水分的獲取能力，其定義爲食物中水蒸氣壓與相同溫度純水水蒸氣壓的比， a_w 與相對溼度(RH %)的換算公式爲 $a_w = RH/100$ (Bell and Labuza, 2000)。但是一般的室內環境量測均是以太室空氣的相對溼度爲主要觀測項目，平衡相對溼度(ERH equilibrium relative humidity)亦爲決定霉菌生長水分活性的最有效指標(Flannigan 1994)，水分活性又隨空氣相對溼度而變化，所以建立室內空氣相對溼度與材料相對溼度之水分等溫圖(water isotherms)後，即可以依據室內空氣相對溼度狀況預測材料相對溼度。類似的平衡相對溼度與含水量之水分等溫圖在農產品(如稻米、大麥等)生長及儲存已有研究成果(Basunia and Abe, 2005; Sun, 1999)，但是對於建築材料的水分等溫圖之研究則極少 (Andrade et al., 1999)。

已往的混凝土溼度研究多注重於內部溼度對於混凝土收縮(shrinkage)等之影響，但卻沒有對氣候影響混凝土水分含量或內部相對溼度之研究；所以 Andrade et al. (1999)針對混凝土曝露於自然或人工氣候下之內部相對溼度變化進行現場及實驗室測定，以得到相關之水分等溫圖，但是自然氣候因爲溫度及溼度的改變極不規則，所以混凝土內部也處於連續不穩定的狀況。結果發現在不受降雨影響下，混凝土內部溼度主要受到溫度影響；在未遮蔽之情形下，降雨期成

為混凝土內部溼度變化之主要影響因子。

Basheer and Nolan (2001)則對混凝土表面及表層下 10mm 近表面層之水分變化在現場進行研究，以瞭解其表面及近表面之透氣率及吸附作用。結果顯示在混凝土近表面層 10mm 以內的水分分佈對曝露環境是極度敏感。

二、研究目的

前人研究的實驗方式可提供如何量測近表面層或材料內部相對溼度之方法，以建立在水分吸附及釋放作用時之相對溼度與含水量之水分等溫圖，但是並未提供空氣相對溼度與材料相對溼度間以及空氣相對溼度與表層含水量間之水分等溫圖。台灣地區的主要建築材料為鋼筋混凝土，所以本研究之研究目的為瞭解水害建築物室內空氣相對溼度環境因子與混凝土外殼(例如牆壁)的表層水分、孔隙相對溼度及混凝土材料水分含量變化之關係，以作為評估環境變化時對建築材料所產生之表面溼度狀況，進而評估霉菌生長之可能性。

三、研究材料與方法

本實驗之目的在於尋找室內空氣相對溼度與混凝土建築外殼溼度狀況(包括表層水分、孔隙相對溼度、含水量)之關係，尤其重視混凝土材料之表層含水量，所以利用植物生長箱作為控制環境，以量測各項材料溼度狀況。

混凝土材料係以混凝土試體為對象，並在其上鑽孔約 35mm 深度以得到 4.5cm³ 之孔穴體積，再以黏土塞住作為混凝土表層孔隙相對溼度的量測區域(圖 1)，混凝土試體尺寸為直徑 100mm，高度 200mm。

試驗進行前將試體分為高濕(養護室養護 28 天試體)、中濕(在大氣環境下保存至少 60 天以上試體)、中低溼(烘乾後在大氣環境下保存 60 天以下試體)及低濕(烘乾試體)等四種處理方式，以瞭解不同處理之試體對孔隙相對溼度、試體水分含量及試體表面水分之影響程度；各種處理之試體在試驗中約為 1 至 5 個。

實驗先在實驗箱(Model LTI-611, TKS

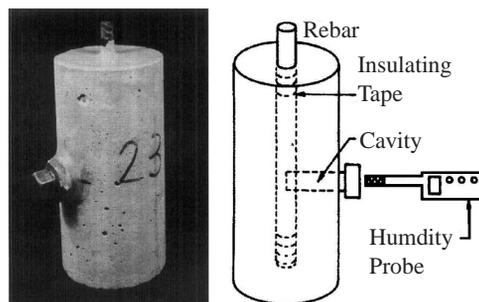


圖 1 混凝土試體孔隙相對溼度量測方式(Andrade et al., 1999)

KANSIN Instruments Company Ltd, Taiwan)內固定溫溼度的狀況下置放混凝土試體，將溼度感測器(Model HMP50, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Germany.)置於塞孔內觀察數日或數週後，使材料表層的相對溼度趨於平衡並讀取材料孔隙相對溼度。同時以水分計(Model FH A696-MF, VAISALA Group, Finland.)量測材料約 25mm 深度之表面水分；並將試體稱重及烘乾，以得到混凝土材料含水量的相對變化量。前述的試驗將於改變室內相對溼度時重複進行，以求得室內相對溼度與混凝土材料的孔隙相對溼度、材料含水量、材料表面水分之水分等溫圖。因為室內空氣相對溼度與材料含水情形在吸附水分及釋放水份不同狀況下，會有不同之關係(Pasanen et al., 2000b)，所以相對溼度的改變係從高溼至低溼(釋放水分階段)以得到水分釋放之水分等溫圖後，再從低溼升至高溼(吸附水分階段)，得到水分吸附情形之水分等溫圖，實驗最後將試體置於 105°C 烘乾 15 至 20 小時以得到材料乾重及含水量之絕對值。此外，部分實驗係在遮雨棚下進行，以瞭解混凝土試體在有遮雨之自然環境下，材料溼度與環境相對溼度之關係。

四、結果與討論

(一) 孔隙相對溼度

1. 暫態狀況

(1) 在遮雨之自然條件下

在遮雨之自然條件下，各種處理之試體隨時間變化之情形如圖 2 所示。試驗期間在 2006 年 1

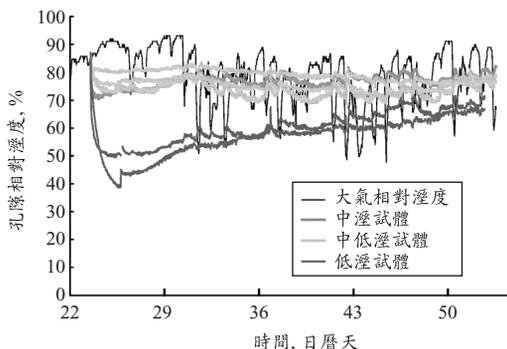


圖 2 試體孔隙相對溼度與大氣相對溼度在遮雨自然環境下變化情形

月底至 2 月底的冬季，大氣相對溼度約在 50%至 90%之間變化，但多數時間高於 70%，高於 80%的時間也佔一半以上。各種處理試體之低溼試體(2 個)的孔隙相對溼度由最初較低狀態而逐步上升。中溼試體(1 個)孔隙相對溼度維持在 70%至 80%之間，而無甚大變化。中低溼試體(3 個)孔隙相對溼度亦在 70%至 80%之間；且隨時間愈長，3 個試體之孔隙相對溼度愈集中，且與中溼試體孔隙相對溼度接近。可見在自然條件下，混凝土試體的孔隙相對溼度在 30 天之後，中溼及中低溼試體均會接近而朝向一致。

2. 穩態狀況

不同處理試體孔隙相對溼度在釋放水分與吸附水分階段與環境相對溼度之穩態關係如圖 3 所示。其中高溼與低溼試體因穩定的時間不足而使孔隙相對溼度具有較高與較低的現象，此與試體含水的處理情形吻合。

中溼試體在釋放水分與吸附水分階段之孔隙相對溼度接近，並可得到相關的迴歸曲線，顯示混凝土試體在釋放水分與吸附水分兩階段之孔隙相對溼度與環境相對溼度的關係並無變化，而可視為相同之關聯性，此一關聯性顯示混凝土試體孔隙相對溼度與環境相對溼度成正比關係。

(二) 試體水分含量

試體水分含量之定義為試體溼重減乾重後的差與乾重之比，中溼試體水分含量與環境相對

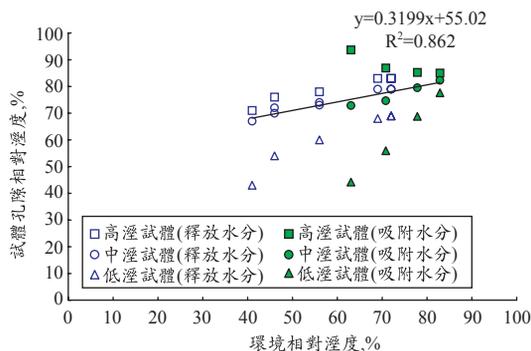


圖 3 試體孔隙相對溼度與環境相對溼度之穩態關係圖

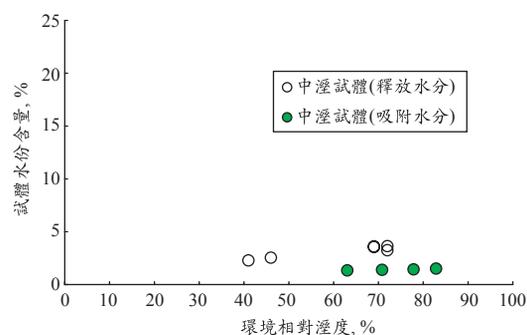


圖 4 試體水分含量在控制環境下與環境相對溼度關係圖

溼度之穩態關係圖如圖 4 所示。其中釋放水分階段與吸附水分階段有部分差異，表示試體水分含量經過釋放水分階段而降低後，即使吸附水分也不易增加試體水分含量。中溼試體水分含量在環境相對溼度介於約 40%至 85%之間，不論釋放水分或吸附水分階段仍維持在 1%至 4%之間，變化並不明顯，顯示環境相對溼度對試體水分含量的影響有限。

(三) 試體表面水分

試體表面水分是霉菌生長最重要的水分來源，所以試體表面水分的量測極為重要。試體表面水分在控制環境下與環境相對溼度的穩態關係如圖 5 所示。表面水分在釋放水分階段較吸附水分階段稍高。實驗值顯示試體表面水分會因環境相對溼度增加而增加，且試體前置處理狀況亦

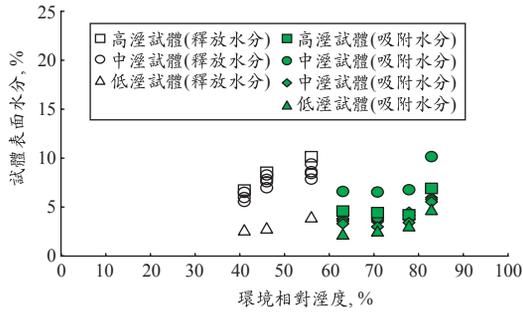


圖 5 試體表面水分與環境相對溼度在控制環境下之穩態關係圖

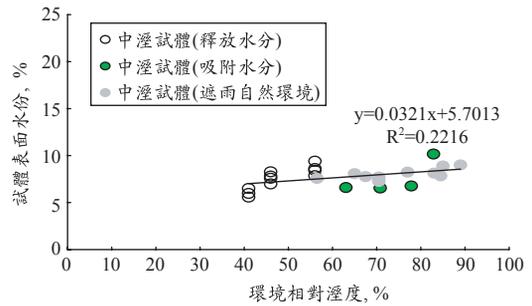


圖 7 試體表面水分與環境相對溼度關係圖

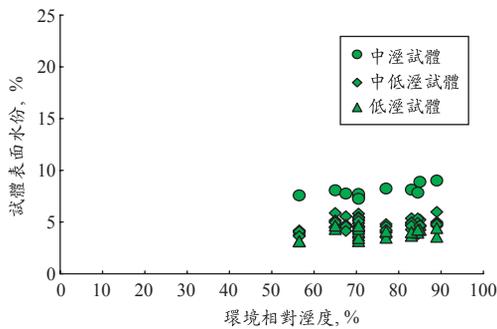


圖 6 試體表面水分與環境相對溼度在遮雨自然環境下關係圖

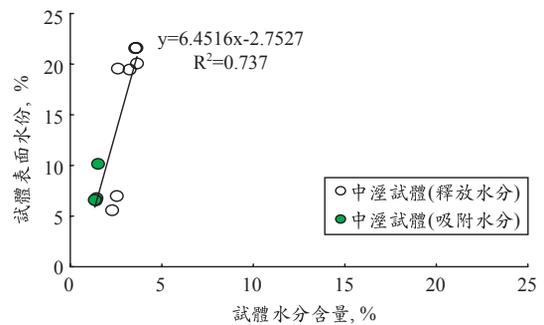


圖 8 試體表面水分與試體水分含量之穩態關係圖

會影響其表面水分；在釋放水分階段，高溼試體表面水分最高，中溼次之，低溼最小。但是在吸附水分階段，高溼試體在釋放水分實驗結束後曾經烘乾養護後再進行吸附水分之實驗，結果發現其表面水分較未曾烘乾之中溼試體為低，所以試體前置處理會顯著影響表面水分的吸附情形。

試體表面水分與環境相對溼度在遮雨自然環境下之變化情形如圖 6 所示。實驗中試體是置放於通風良好之鋼棚下，以瞭解試體溼度及水分在遮雨之自然環境下變化情形。圖中中溼試體與中低溼試體明顯分為兩個區塊，中低溼試體因為曾經烘乾處理且在大氣環境置放時間較短，而具有較少之表面水分。中溼試體之表面水分與環境相對溼度具有良好之正比傾向，且與控制環境下中溼試體表面水分與環境相對溼度的相關性極為類似。

若將控制環境下與遮雨自然環境下之試體

表面水分與環境相對溼度之關係繪如圖 7，可以發現其相關性強度不高，環境相對溼度在約 40% 至 90% 之間變化時，中溼試體表面水分約在 5% 至 10% 間起伏，顯示試體表面水分受環境相對溼度的影響有限。

(四)各種水分及溼度之關係

1. 試體表面水分與試體水分含量

試體表面水分與試體水分含量之穩態關係如圖 8 所示，兩者均代表試體的含水情形，但是有空間的差異，試體表面水分僅量測距表層 25mm 內之水分含量，試體水分含量則代表整個試體之含水量狀況。由圖顯示混凝土試體的表層聚集較多水分，比代表平均含水量之試體水分含量為高。

2. 試體表面水分與孔隙相對溼度

試體表面水分與試體孔隙相對溼度在控制

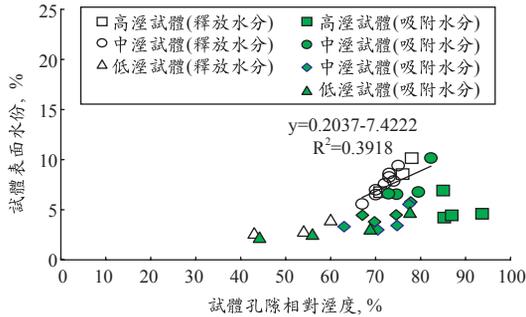


圖 9 試體表面水分與試體孔隙相對溼度在控制環境下之穩態關係圖

環境下之穩態關係如圖 9 所示。由圖可知兩者均呈正比關係，而且在釋放水分階段更為明顯。中溼試體的相互關係較為接近，其餘前置處理之試體在釋放水分與吸附水分階段差異較大。

3. 孔隙相對溼度與試體水分含量

孔隙相對溼度與試體水分含量之關係如圖 10 所示，兩者在釋放水分及吸附水分階段均呈正比關係，但兩種階段之變化並不一致。因為試體水分含量為將試體烘乾後才能得到其水分含量，所以資料數較少，但其在不同階段之相關則相當明顯，表示試體水分含量愈大，則孔隙相對溼度亦會增加。

五、結 論

在本研究中，因為中溼試體是較符合混凝土建築興建過程之實際養護情形，所以資料的分析亦以此種材料處理為重點。孔隙相對溼度在暫態變化時，發現其置於遮雨自然環境下中溼及中低溼試體在 30 天後均會極為接近，若置於生長箱之控制環境下釋放水分階段之中溼試體在一週內達到穩定，吸附水分階段中溼試體則需 2 週。孔隙相對溼度在穩態狀況時，不論釋放水分或吸附水分階段與環境相對溼度之關係均在同一曲線上而且有極大相關性。

試體水分含量是與試體前置處理有密切關聯，接觸水分機會愈多則水分重量愈大。試體水分含量與環境相對溼度亦成正比關係，但試體前置處理會影響其比例大小；釋放水分階段的試體

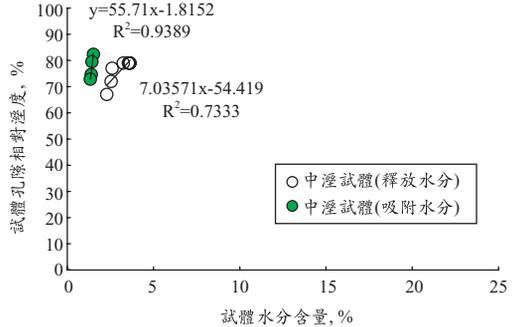


圖 10 試體孔隙相對溼度與試體水分含量之穩態關係圖

水分含量較吸附水分階段稍高。

試體表面水分是霉菌生長最重要的水分來源，所以分析結果可以發現不論在遮雨自然環境下或是生長箱的控制環境下，也不論是釋放水分階段或是吸附水分階段，試體表面水分在環境相對溼度介於 40%至 90%之間變化時，約在 5%至 10%間起伏。綜合前述結果，孔隙相對溼度與環境相對溼度之關係最密切，試體水分含量及表面水分則受環境相對溼度的影響有限。

本研究最後尋找混凝土試體的三種水分表示方式(試體表面水分、孔隙相對溼度與試體水分含量)之相互關係，發現其相關性依序為試體表面水分與試體水分含量、試體表面水分與孔隙相對溼度、孔隙相對溼度與試體水分含量；但孔隙相對溼度與試體水分含量若分為釋放水分及吸附水分階段時，則有較大相關性。由此顯示試體表面水分與試體含水量有高度相關，且表面含水量較試體水分含量大；孔隙相對溼度與試體表面水分及試體水分含量均成正相關。

若能得到氣象資料中之環境相對溼度，則依據本研究之結果，可以掌握混凝土材料之表面水分、孔隙相對溼度及試體水分含量等資料，若伴隨達到穩態狀況之時間估計，則可以預測材料滋生霉菌之可能性，作為預防室內空氣品質惡化之預警資訊。

誌 謝

本研究承蒙本校自然資源學系林亞立教

授、生物機電工程學系周立強副教授及本校土木工程學系陳春秀、吳宗晏、林嚴達、陳珮珊、周震宇、劉子龍、施慧婷等同學協助實驗以及行政院國家科學委員會補助經費(NSC94-2211-E-197-008)才得以順利完成，特此謹致謝忱。

參考文獻

1. Adan, O.C.G. 1994. On the fungal defacement of interior finishes. PhD Thesis, University of Eindhoven, Wageningen, The Netherlands.
2. Andrade, C. Sarra, J. Alonso, C. 1999. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. *Cement and Concrete Research* 29:1249-1259.
3. Basheer, P. A. M. and Nolan, E. 2001. Near-surface moisture gradients and in situ permeation tests. *Construction and Building Materials* 15:105-114.
4. Basunia, M. A. and Abe, T. 2005. Adsorption isotherms of barley at low and high temperatures. *Journal of Food Engineering* 66:129-136.
5. Bell, L. N. and T. P. Labuza. 2000. Moisture sorption: practical aspects of isotherm measurement and use. American Association of Cereal Chemists, St. Paul.
6. Flannigan, B. 1994. Approaches to assessment of the microbial flora of buildings. In: Besch, E. (ed) *Proceedings IAQ'92, Environments for People*, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, pp. 139-145.
7. Flannigan, B. and Miller, J. D. 1994. Health implications of fungi in indoor environments-an overview. In: R. Samson, B. Flannigan, M. E. Flannigan, A. P. Verhoeff, O. C. G. Adan and E. S. Hoekstra (eds.), *Health implications of fungi in indoor environments*. Air quality monographs. Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands, vol. 2, pp. 2-28.
8. Flannigan, B., and Morey, P. R., 1996. Control of moisture problems affecting biological indoor air quality. ISIAQ-guideline. Task Force I. International Society of Indoor Air Quality and Climate, Ottawa.
9. Li, C.S. and Hsu, L.Y. 1997. Airborne fungus allergen in association with residential characteristics in atopic and control children in a subtropical region. *Archives of Environment Health* 52:72-79.
10. Pasanen, A.L., Pasanen, P., Jantunen, M. and Nevalainen, A. 1991. Laboratory studies on the relationship between fungal growth and atmospheric temperature and humidity. *Environment International* 17:22-228.
11. Pasanen, A.L., Rautiala, S., Kasanen, J.P., Raunio, P., Rantamaki, J. and Kalliokoski, P. 2000a. The relationship between measured moisture conditions and fungal concentrations in water-damaged building materials. *Indoor Air* 11:111-120.
12. Pasanen, A.L., Kasanen, J.P., Rautiala, S., Ikaheimo, M., Rantamaki, J., Kaariainen, H. and Kalliokoski, P. 2000b. Fungal growth and survival in building materials under fluctuating moisture and temperature conditions. *International Biodeterioration and Biodegradation* 46:117-127.

收稿日期：民國 95 年 11 月 21 日
接受日期：民國 95 年 1 月 15 日