

材料溫度對高性能混凝土工作性及抗壓強度之影響

郭文田 潘煌錕

國立高雄應用科技大學土木工程系

摘要

高性能混凝土工作性及強度很容易受拌合材料之初始溫度影響。骨材和拌合水在不同溫度拌合時，相同配比之高性能混凝土有不同流動性質。研究結果顯示採用L型流動試驗來表示工作性比較可靠，且只要適當拌合技巧，一般小型拌合鼓也能製造高性能混凝土。當拌合後混凝土溫度介於 35~45°C 時，L型流動值變化敏感，且此時有較低之抗壓強度，對混凝土品質管制尤需注意。高性能混凝土初始拌合溫度要控制在 35°C 以下，以獲得品質穩定且性質較好之混凝土。

關鍵詞：材料溫度、工作性、強度。

THE INFLUENCE OF MATERIAL TEMPERATURE ON THE WORKABILITY AND THE STRENGTH OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Wen-Ten Kuo Huang-Hsing Pan

Department of Civil Engineering
National Kaohsiung University of Applied Sciences
Kaohsiung, Taiwan 807, R. O. C.

Key Words: material temperature, workability, strength.

ABSTRACT

The workability and the strength of high performance concrete (HPC) depend on the temperatures of the mixing materials, especially for the aggregates and the water. At different mixing temperatures but the same mix proportions, there are variations in workability. Results show that the L-type flow test had better be chosen to represent the reliability of the workability of HPC. Meanwhile, the drum mixer can also be used to product a high quality HPC at a moderate mixture technique. When the temperature of HPC is between 35°C and 45°C, the flow value of the L-type flow test is more sensitive and the strength of HPC is lower. To obtain better quality control and material properties of HPC, the temperature of HPC should be maintained below 35°C.

一、前言

高性能混凝土 (high performance concrete) 係因應傳統混凝土由於工作度與強度無法同時滿足需求，且品質不易控制之缺點而發展。因此針對各地區不同之需求及本土

材料之可用程度而有不同之定義，可要求高強度、高流動性、高體積穩定性、高耐久性、高水密性、免振動或其他特殊性能要求[1]。但無論如何，高性能混凝土必須確保最終的產品品質性能符合設計者之要求。在不同設計需求之定義下，高性能混凝土之配比方法亦各有不同，但為了

表一 粗細骨材物理性質

	比重	吸水率 (%)	單位重(kg/m ³)	洛杉磯磨損率 (%)	細度模數(F. M.)	最大粒徑(mm)
粗骨材	2.65	0.61	1438	20.1	6.25	19
細骨材	2.65	2.34	—	—	3.18	—

表二 高性能混凝土配比 (1m³)

材料	水泥	爐石粉	飛灰	粗骨材	細骨材	水	強塑劑
重量(kg)	450	50	86	855	770	175	11.7

達到其高流動性，且能保持適當之粘聚性及材料之均勻性，目前常採用強塑劑和卜作嵐材料(爐石、飛灰、砂灰等)做為輔助材料。高性能混凝土之使用係營建自動化之一環，在環保與節約資源(使用工業副產品、減少水泥用量、免振動、減少噪音等)、改善施工品質、提升施工技術、減少勞力方面均有正面之影響，因此高性能混凝土已在歐、美、日等先進國家受到重視且積極研發運用，而我國也已進入全面推動階段[2,3]，以便建立混凝土之高品質形象。

影響高性能混凝土品質之因素包括各組成材料品質、配比成份、拌合、施工、養護及使用狀況等，其影響程度不一，然而由於高性能混凝土之配比方式異於一般混凝土，各影響因子對高性能混凝土受台灣本土環境之影響，是否和一般混凝土者相同，值得探討。根據氣象局之資料，台灣地區夏天之平均氣溫在 34°C，冬天則約在 13°C 左右，且台灣地區許多預拌廠之骨材堆放場所處於露天狀況，甚易受到環境溫濕度之影響；新拌混凝土中之水泥漿體為含水之物質，於炎熱氣候下，尤其在偏高的大氣溫度、較低相對溼度及較高風速環境下，容易因失水導致工作度及強度損失。蘇南[4]曾探討不同之材料溫度對高性能混凝土強度之影響，結果發現材料溫度為 30°C 時，抗壓強度為最佳，但溫度升高或降低，反使強度降低；高健章等[5]研討新拌高性能混凝土在不同溫度環境下之流動性質，發現當氣溫大於 30°C 時，工作度將有嚴重損失現象；Mouret[6]則針對不同骨材溫度對一般強度混凝土之抗壓及劈裂強度之影響，結果發現當骨材溫度大於 35°C 時，以上兩項強度皆隨溫度之上升而下降；Al-Gahtani [7] 及 Ghosh [8] 亦有同樣之發現。因此本文為模擬拌合材料暴露於各種不同大氣溫度下，對高性能混凝土性質所造成之影響，故採用改變骨材及拌合水之溫度方式，以探討拌合材料之初始溫度對高性能混凝土工作度及強度所造成之影響，以期能建立正確之資訊，使高性能混凝土於台灣本土環境之應用技術能愈趨成熟及穩定。

二、試驗計劃

1. 試驗材料

- (一) 水泥：採用台泥公司所生產之卜特蘭第一型水泥，

比重為 3.15，Blaine 細度為 3200cm²/g，其化學成份與物理性質都符合 CNS 61 之規定。

- (二) 粗細骨材：係採自高屏溪之河砂及天然卵石所製成之碎石，其物理性質如表一所示。
 (三) 飛灰：為台電興達廠所生產之 F 級飛灰，比重為 2.05，#325 篩餘量為 15%。
 (四) 水淬高爐石粉：為中聯爐石公司所生產之高爐石粉，其比重為 2.90，Blaine 細度為 4265cm²/g。
 (五) 強塑劑：化學成份為磺化奈甲脛縮合物 (SNF)，為溶液狀態，性質符合 CNS 12283 Type G 之規定。

2. 配比設計

配比設計方法很多，各有利弊，只要能利用當地材料與滿足施工者習性要求之本土化配比，即為最佳選擇。本研究係參考「緻密配比法」之配比設計法[9]進行配比設計，即骨材以最大單位重進行最佳級配組合，構成混凝土之密實骨幹，僅留下最小之孔隙，由成本較昂貴之水泥漿填補，形成最經濟且強度高之混凝土。混凝土因要求高強度，所以水灰比要愈低愈好，可是為了高流動性又需要用水量愈高愈好，但為了乾縮及潛變因素而期望水泥用量愈低愈好，因此本試驗採用強塑劑及飛灰、爐石粉等礦物摻料，以 28 天之設計強度為 45MPa，坍度為 25 ± 2cm 進行配比設計，配比結果如表二所示。

3. 拌製流程

由於本試驗採用之拌合機係以水平軸為旋轉中心之重力式拌合機(可傾倒式)，加諸單位體積水泥量較多及拌合機拌合性能不若強制式拌合機，故拌合時間較長；且其拌合時之投料順序會影響高性能混凝土性質，經多次才試拌成功，證明低拌合效率之重力式拌合機也能生產高性能混凝土。其拌合步驟如下：

- (一) 先放粗、細骨材於拌合機內，並加 25% 之拌合水。
 (二) 開機拌合約 1.5 分鐘後停機。
 (三) 再倒入飛灰、爐石粉、水泥，並加 25% 之拌合水。
 (四) 使用塑膠袋將拌合機入口封住，以防止拌合時粉末溢出，且拌合至卜作嵐材料及水泥附著於骨材顆粒時，方將塑膠袋移開。
 (五) 將 80% 之強塑劑以 40% 之拌合水稀釋後加入。



圖 1 L 型流度試驗儀

- (丙) 剩下 20% 之強塑劑加上剩餘 10% 之拌合水，於拌合至第 8 分鐘時，緩緩倒入並拌合約 1.5 分鐘後停機。
 (丁) 停機後進行混凝土流動性、溫度及抗壓強度試驗。

4. 試驗變數

- (一) 為模擬溫度對高性能混凝土之影響，故將骨材及拌合水降溫冷卻或加熱升溫，其拌合前之溫度為 10°C、20°C、25°C、35°C、50°C、65°C、80°C。
 (二) 新拌混凝土於拌合完成後，分別以立即、延遲 30 分、延遲 60 分三種不同時間進行溫度、坍度、坍流度試驗及 L 型流度試驗，以了解其坍度變化情形。
 (三) 新拌混凝土拌合完成後立即進行流動性質試驗者，進行抗壓試體製作 (φ 12cm×24cm)，強度齡期為 1、4、7、28 天，而於 30 分及 60 分鐘後才進行流動性質試驗者，則僅進行 28 天之抗壓試體製作。

三、試驗結果與討論

1. 高性能混凝土拌合均勻性

高性能混凝土在國內之發展已有數年的時間，其拌合技術及穩定性尚有待突破。且強塑劑及飛灰、爐石粉等礦物摻料之添加，使得高性能混凝土於實際施工前必須經過一段相當長之前置作業時間 (試拌)，包含筒型試驗、原型試驗等試驗過程，以驗證高性能混凝土正式施工之可行性。因此本研究在配比試拌完成後，按照前節所述之拌製方法連續拌合三次，每次製作 12 個抗壓試體，總共 36 個，試驗其 7 天抗壓強度，分別製作個別值管制圖及移動平均管制圖。結果發現此 36 個試體抗壓強度之標準偏差為 17.7kgf/cm²，依 ACI 214 之品管標準係落於甚佳 (very good) 及佳 (good) 之範圍內；其變異係數為 4.2%，亦落於佳 (good) 之範圍內，表示本試驗精度、試驗操作及儀器穩定性相當高。因此可印證本研究拌合技術之穩定性，從而支持後研究結果之可靠性。因所採用之拌合機為傳統重力式，從本研究之均勻性試驗結果，亦可印證拌製高性能混

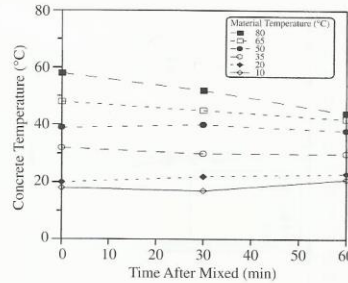


圖 2 不同材料溫度下所拌合之高性能混凝土溫度

凝土並不一定非使用強制式拌合機才能進行，重力式拌合機只要投料順序控制得宜，亦能生產相當均勻且品質穩定之高性能混凝土。

2. 高性能混凝土工作度

混凝土搗實程度對其強度品質有很大之影響；而混凝土之稠度基本要求為必須容易輸送、澆置及最後的修飾不產生析離現象，能滿足上述條件，即可稱為可工作性。雖然高性能混凝土可定義為不需藉任何搗實振動即可通過鋼筋間隙、自行充填至模板各角落的高流動性混凝土 (自充填混凝土)，但其澆置時仍應藉其自身重力及易流動性來達到去除混凝土內多餘之空氣，並且於澆置過程中必須避免混入太多之空氣，使得混凝土澆置後能達到密實狀態。因此高性能混凝土澆置過程中，本身應具有適當之能量以克服其內部顆粒間之摩擦力，和與外模或鋼筋間之摩擦力，亦即混凝土應有足夠之黏滯性，使能自行流動又不會太黏。對高性能混凝土而言，目前尚沒有一個可以完全被接受之試驗可直接量測工作度。因此本研究乃以傳統之坍度試驗，坍度試驗後量其擴散之直徑 (坍流度) 及日本土木學會所建議之 L 型流度試驗法 [10] (如圖 1 所示) 三者來代表工作度，這些試驗皆簡單易操作，且可於工地現場施行。

在試驗時之試驗室溫度約為 28°C，圖 2 及圖 3 所示分別為拌合材料在不同溫度下，高性能混凝土溫度及工作度之量測結果，圖中之 0 分鐘代表混凝土拌合後立即量測其相關性質，而 30、60 分鐘則為拌合完成後，放置 30 及 60 分鐘後分別量測其相關性質。混凝土拌合後之溫度可由 (1) 式預估 [11]：

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_{a'} W_{a'}}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_{wa}} \quad (1)$$

式中 T_a 、 T_c 、 T_w = 骨材、水泥及拌和水的溫度

W_a 、 W_c 、 W_w 、 W_{wa} = 骨材、水泥、拌和水及吸附於

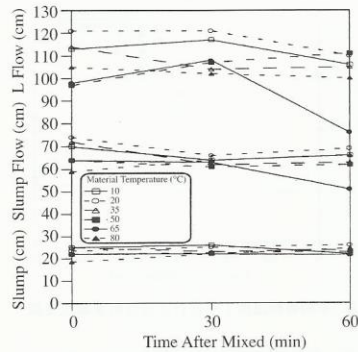


圖 3 不同材料溫度下所拌合之高性能混凝土工作度

骨材表面水之重量

$$0.22 = \text{骨材及水泥之比熱}$$

由經驗公式(1)與剛拌合完成後 (0 分鐘) 之新拌混凝土溫度量測結果比較, 如表三所示, 可看出經驗公式與量測結果相當接近。從圖 2 與圖 3 中可看出拌合材料溫度於 20°C 時, 其新拌混凝土溫度與材料溫度最為接近, 且其工作度表現最佳; 因試驗室溫約為 28°C 左右, 當材料溫度較室溫為低時, 於混凝土拌合完成後, 由於水泥水化所產生之水化熱效應大於材料溫度與大氣溫度間產生之熱交換, 使得混凝土溫度往上升高, 此現象尤以材料溫度愈低者愈明顯; 但材料溫度較室溫為高時, 由於熱交換效應較強, 相反地使拌合後之混凝土溫度下降, 亦即往室溫趨近, 且此現象尤以材料溫度愈高者愈明顯。但當材料溫度為 20°C 時所顯示之混凝土溫度與材料溫度變化最小, 連帶地使其坍度、坍流度、L 型流度皆表現出較佳之結果。由此可看出材料溫度如能接近室溫且比室溫稍為低一點, 由於熱交換作用較不明顯, 可使得混凝土有較佳之工作度, 此說明工地現場於熱天時, 拌合材料 (尤其骨材) 遮陽對高性能混凝土性質影響之重要性。另外不管材料初始溫度狀況, 混凝土拌合完成後 30 分鐘時之工作度表現良好, 推測應為強劑發揮其效能, 此情形說明混凝土拌合完成後立即澆置並不是最佳時機, 而是在於 30 分鐘後。

混凝土拌合完成後, 從圖 3 中可明顯發現材料初始溫度為 10°C 及 20°C 在 30 分鐘前有最佳之坍度表現, 且 20°C 者於 60 分鐘時亦能保持較佳之坍度, 10°C 則否。對其他較高材料溫度 (35~80°C) 者, 由於水化作用與溫度成正比, 因此將加速水化作用之進行, 使得初期水化產物產生速率加速, 進而促使整體空間網狀結構加速形成; 再加上材料溫度與大氣溫度相差較大, 兩者間之熱交換速率增加, 致使混凝土中水份蒸發速率加速, 造成混凝土中有效

表三 經驗公式(1)計算值與試驗量測結果比較

材料溫度 (°C)	經驗公式(1)計算值(°C)	量測結果(°C)
10	18.4	18
20	23.8	20
35	31.7	32
50	39.7	39
65	47.7	48
80	55.6	58

水分降低, 進而使得其初始坍度亦隨之降低。但隨著時間之增加, 熱交換及蒸發速率趨于緩和, 使得坍度反有增加之現象。因此隨著時間之增加, 使得在不同材料溫度間新拌混凝土坍度之變化愈來愈小。

混凝土拌合完成後之坍度及坍流度 (擴散直徑), 由圖 3 中可看出坍度與坍流度間存有正比之關係, 但此正比關係並不是非常一致。此為坍流度係量測混凝土坍成餅狀後兩方向之直徑平均值; 另坍度則係量測中間點下陷之高度。假如坍度試驗時, 由於試驗技術不精確, 或因混凝土材料產生析離, 致使坍流時, 僅有水泥砂漿流動, 粗骨材則停留在原處, 將影響坍度與坍流度之真正關係。從本研究中可發現在不同材料溫度下, 預期其工作度將會有所變化, 然從圖 3 中之坍度並無法表現真正之工作度變化, 而坍流度反有較大之變化。此說明在高性能混凝土中僅用坍度大小來表現工作度是不足的, 需有其它試驗來加以輔助。在 L 型流度試驗中, 由於儀器構造原理不同, 且試驗所需之數量亦不同, 故 L 型流度又比坍流度表現出更大之變化 (如圖 3 所示), 即 L 型流度比坍度、坍流度更能模擬實際施工中混凝土之流動情形, 更能表現出高流動性混凝土之工作性。由此可見高性能混凝土因其高流動性, 以傳統之坍度將無法完整表現其工作度, 應依其高流動性, 採用對工作度較敏感之 L 型流度來表示。

以混凝土剛拌合完成 (0 分鐘) 之溫度為橫坐標, 60 分鐘與 0 分鐘之 L 型流度差值除以對應之混凝土溫度差, 並取其絕對值為縱坐標, 如圖 4 所示, 由圖中可看出當混凝土剛拌合完成後之溫度介於 35~45°C 時, 混凝土每 1°C 之溫度差所對應之 L 型流度變化值最大, 換言之, 此新拌混凝土溫度範圍之 L 型流度流動性對溫度最敏感, 因此混凝土溫度介於此範圍時, 其品質管制工作尤需落實, 否則稍一不慎, 則流動性將會有很大之變化, 導致混凝土施工時將不易掌握其工作性。

3. 高性能混凝土抗壓強度

混凝土拌合完成, 在工作度試驗完畢後所製作 $\phi 12 \times 24$ cm 之圓柱試體, 分別測試其 1 天、4 天、7 天、28 天之抗壓強度, 如圖 5 所示。於 1 天及 4 天之初期強度時, 除 80°C 外, 其餘不同材料溫度所製作混凝土之抗壓強度皆相近, 可見拌合溫度太高會使其水化產物快速形成而使結構鬆散或產生微裂縫, 尤其會在骨材與水泥漿界面產生

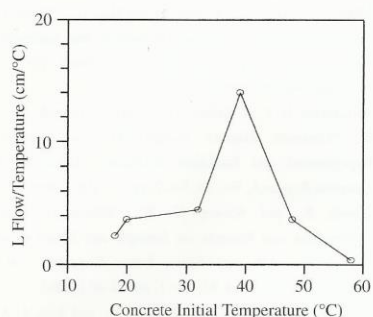


圖 4 單位溫度之 L 流度變化與混凝土初始溫度之關係

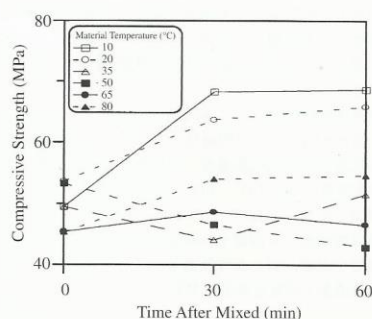


圖 6 不同取樣時間之 28 天抗壓強度

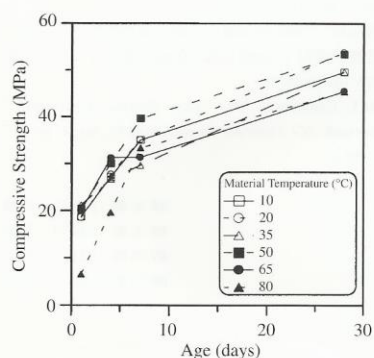


圖 5 不同材料溫度下所拌合高性能混凝土之抗壓強度

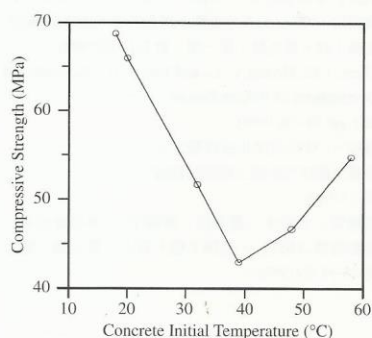


圖 7 拌合完成 60 分鐘之 28 天抗壓強度與混凝土初始溫度之關係

較大量之氫氧化鈣(CH)，此現象將導致所謂過渡區 (transition zone) 弱化[6]，對早期強度反有不利之影響。但在 7 天以後，則所有抗壓強度皆變化不大，即材料溫度為 80°C 者之初期抗壓強度較低，但於 7 天後抗壓強度亦會逐漸增加。另在 10°C 至 65°C 溫度中，於 1 天及 4 天時，其強度變化亦如常態般，10°C 者最低而 65°C 強度最大，但至 28 天時反是 20°C 者最高，這是因為 20°C 時工作度最佳導致易澆置而能充分搗實，使孔隙較少而有較佳之抗壓強度。

另以 28 天抗壓強度為基準，混凝土拌合完成後於不同時間製作之圓柱試體作比較，如圖 6 所示。由圖中可看出拌合完成後等待 30 至 60 分鐘方澆置混凝土有較佳之抗壓強度，且仍是 10°C、20°C、35°C 者有較佳之抗壓強度，且隨時間之增加，其強度愈高，尤其 10°C 為甚。

以混凝土剛拌合完成 (0 分鐘) 之溫度為橫座標，拌合完成 60 分鐘之 28 天抗壓強度為縱座標，如圖 7 所示。由圖中可看出當混凝土溫度介於 35~45°C 時所對應之抗壓強度較低，印證前述混凝土在此溫度範圍時，其每 1°C 混凝土溫度變化會有較大之流度損失，使其抗壓強度因較大之工作度損失而降低強度。

四、結 論

採用重力式拌合機及適當拌合技術所生產之高性能混凝土，能滿足品質管制範圍。本研究之試驗結果，可得：

1. 在不同材料溫度下，以 20°C 者表現出較佳之工作度 (坍度、坍流度、L 型流度)，且生產之混凝土溫度變化最小。

2. 由坍度-坍流度-L型流度之關係可發現在不同材料溫度下，坍度變化不明顯，但L型流度變化很大，可印證目前已知坍度試驗不能在高性能混凝土中當成工作度之指標。
3. 抗壓強度在早期時，除 85°C外其他變化不大，但在 7 天後則相近；其他材料溫度 (10~65°C) 在早期材齡時以低溫者有較低抗壓強度，但其晚期材齡則有較高之抗壓強度，並以 10°C、20°C、35°C較明顯。
4. 混凝土初始溫度在 35~45°C時，其L型流度流動性對溫度較敏感，且混凝土有較低之抗壓強度值。因此建議要生產高品質之高性能混凝土，一定要控制其拌合後之混凝土溫度必須低於 35°C。

參考文獻

1. 陳振川，「高性能混凝土推動與營建自動化施工技术研討」，營建管理季刊，第二十三期，第 8-21 頁(1995)。
2. 陳振川，「高性能混凝土整合推動計畫與國外經驗」，結構工程，第九卷，第一期，第 7-23 頁(1994)。
3. Chern, J. C., Hwang, C. L., and Tsai, T. H., "Research and Development of HPC in Taiwan," *Concrete International, ACI*, pp. 71~76(1995).
4. 蘇南，「材料溫度和養護條件對高性能混凝土性質之影響」，第四屆結構工程研討會論文集，台北，第 103-109 頁 (1998)。
5. 高健章、張阿本、蕭景槐、陳俊宇，「高性能混凝土流動性質之研究」，結構工程，第十三卷，第一期，第 25-34 頁(1998)。
6. Mouret, M., Bascoul, A., and Escadillas, G., "Drops in Concrete Strength in Summer Related to the Aggregate Temperature," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 345-357 (1997).
7. Al-Gahtani, H. J., A. Abbasi, G. F., and Al-Amoudi, O. S. B., "Concrete Mixture Design for Hot Weather: Experimental and Statistical Analyses," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 50, No. 2, pp. 95-105 (1998).
8. Ghosh, S., and Nasser, K. W., "Effects of High Temperature and Pressure on Strength and Elasticity of Lignite Fly Ash and Silica Fume Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 1, pp. 51-60 (1996).
9. Hwang, C. L., Lee, L. L., Lin, F. Y., and Liu, J. J., "Densified Mixture Design Algorithm and Early Properties of High Performance Concrete," *Journal of Chinese Institute of Civil Hydraulic Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 217-229 (1996).
10. 牧保峰，「高性能混凝土流動性檢測規範—日本現行規範與探討」，混凝土施工自動化研討會，台北，第 125-149 頁(1998)。
11. ACI Committee 305, "Hot Weather Concreteing," Revised- *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4, pp. 417 (1991).

88年07月06日 收稿

88年07月24日 初審

89年01月21日 複審

89年01月28日 接受