

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會
作品說明書

科 別：物理科

組 別：國 小 組

作品名稱：卡！卡！卡！卡得好！

關 鍵 詞：卡榫、六子連方、結構強度

編 號：

摘 要

老師在上國語課時，有提到鹿港天后宮與龍山寺，老師有說過這些古蹟建築不用一根釘子，而是利用木頭的凹凸角度，一個個卡上去的，而且還比用釘子釘的還堅固。

這讓我想到有一年暑假，爸爸帶我到科學教育館時，在二樓的益智區的中國益智科學中有一個「六子連方」的遊戲。當時讓我百思不解，六根有缺口的木頭竟能巧妙的組成立體的十字結構，不僅神奇也讓我佩服中國老祖先的智慧。因此，我爲了想瞭解到卡榫結構的強度，便和爸爸：

- * 用陶土捏出一模一樣的卡榫，在利用負重實驗來測試在不同角度下，卡榫結構的強度。
- * 並根據負重實驗的結果，歸納出決定卡榫結構強度的原則。
- * 再利用所歸納出的原則重新設計一全新且結構更爲堅固的卡榫結構來。
- * 最後利用工字結構來改善卡榫結構的重量與部分強度。

我希望以科學的方法來改良、發揮老祖先的智慧結晶，並將這種成果發揚光大。不管是建築、家具還是臨時搭建的組合屋，都可以直接應用本實驗的結果。

一、研究動機：

以前有一次暑假，爸爸帶我到科學教育館時，在二樓的益智區中除了有許多科學實驗的介紹外，還有屬於中國人的益智科學。其中有一個「六子連方」的遊戲讓我百思不解，六根有缺口的木頭竟能巧妙的組成立體的十字結構，不僅神奇也讓我佩服中國老祖先的智慧。於是便想挑戰這個遊戲，可惜到最後還是沒辦法將它拼好，只好把形狀畫在紙上帶回家好好研究一番，除了想找出它的解法外，還想知道老祖先當初是怎麼會想出這種設計及這種設計在現今有甚麼實用的價值。

二、研究目的：

(一)探討卡榫設計的特徵

- 1.如何巧妙的組合在一起的
- 2.這種設計有什麼優、缺點

(二)分析卡榫設計結構的承載力

- 1.積木的外觀和承載力間的關係
- 2.積木缺口位置和承受力間的關係
- 3.同一塊積木在不同角度時承受力改變的情形

(三)改良傳統卡榫設計的缺點

- 1.如何減輕榫接結構的重量
- 2.如何提高榫接結構的強度

(四)如何根據需求來設計卡榫結構

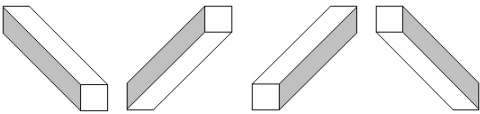
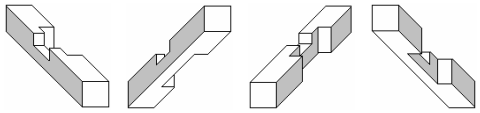
三、文獻探討：

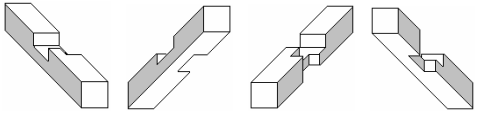
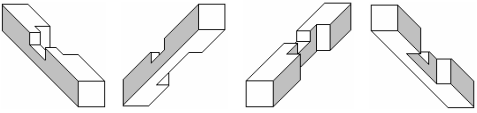
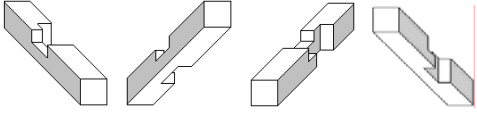
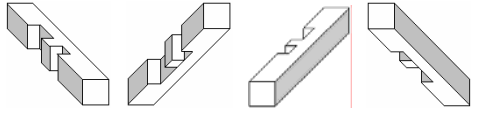






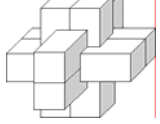
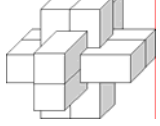
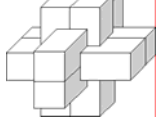
六子連方

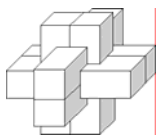
相傳古時候建造廟宇樑柱，其接合不用粘也不用釘，使其契合的方法，是利用木頭與木頭之間不同的凹槽相互嵌合成一個完整的接合。目前較古老的廟宇或許還能見到。為了不讓老祖先的技術失傳，我們在本展示裡特別提出兩種類似樑柱契合的木塊組合，做為古老技藝之提倡。

在這裡有兩組各六塊互有凹槽的木塊，你能想像古時候的人是如何建造樑柱的嗎？讓我們運用智慧，將這些木塊相互嵌住，成爲一個完整之實體。(摘錄自：台灣科學教育館三樓展覽場)

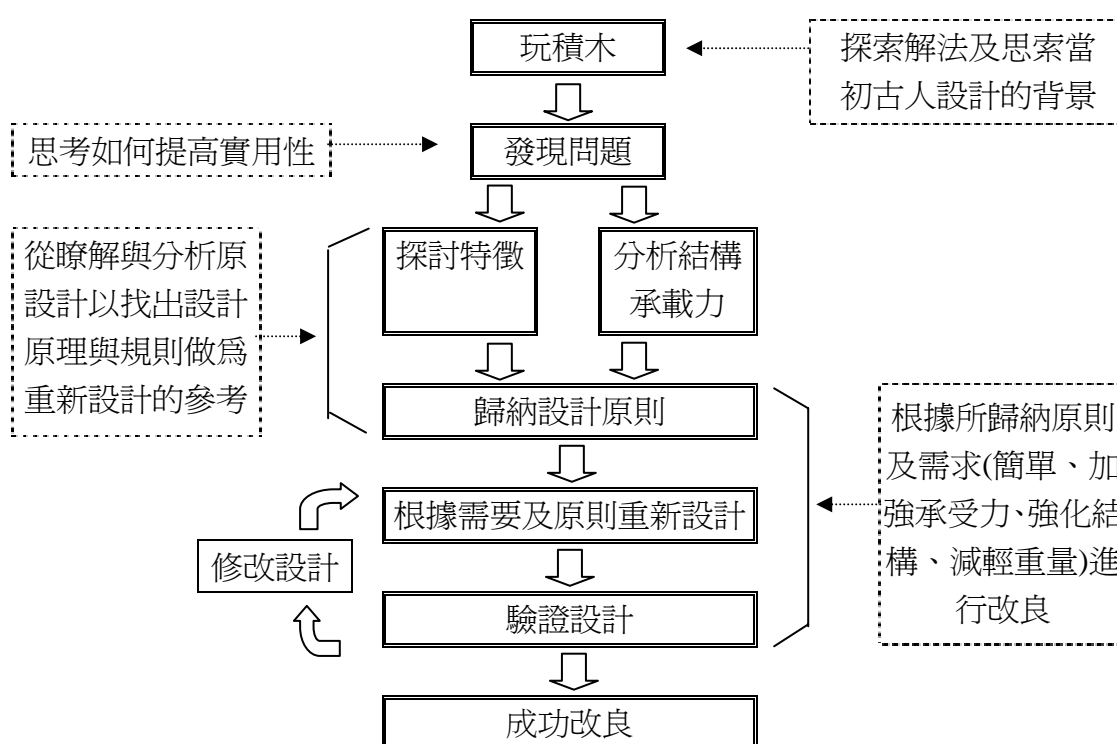
四、研究器材及流程圖：

名稱	規格	數量	圖樣	備註
積木 A	8cm*2cm*2cm (陶土製)	1		實驗一
積木 B	8cm*2cm*2cm (陶土製)	1		實驗一

積木 C	8cm*2cm*2cm (陶土製)	1		實驗一
積木 D	8cm*2cm*2cm (陶土製)	1		實驗一
積木 E	8cm*2cm*2cm (陶土製)	1		實驗一
積木 F	8cm*2cm*2cm (陶土製)	1		實驗一
積木組	8cm*2cm*2cm 無卡榫設計 (陶土製)	1 組		實驗一
積木組	8cm*2cm*2cm 一般卡榫設計 (陶土製)	1 組		實驗一
積木 A,B,C, D,E,F,	8cm*2cm*2cm (陶土製)	各 4		實驗二
工字結 構 A	10cm*2cm*2cm ㄇ字型厚紙板	4		實驗三
工字結 構 B	10cm*2cm*2cm ㄇ字型厚紙板	4		實驗三
工字結 構 C	10cm*2cm*2cm ㄇ字型厚紙板	4		實驗三
積木組	20cm*5cm*5cm 特殊卡榫設計 (保麗龍製)	1 組		實驗四
積木組	20cm*5cm*5cm 改良卡榫設計 (保麗龍製)	1 組		實驗四
積木組	20cm*5cm*5cm 改良卡榫設計 工字&保麗龍製	1 組		實驗四

積木組	20cm*5cm*5cm 改良卡樺設計 工字加強&保麗 龍製	1 組		實驗四
小石子	直徑 0.5cm 以下	2 公斤		實驗
磅秤	秤重 2 公斤	1		一、二
塑膠袋	一般購物用	1		三、四
保麗龍	全開	1		實驗四

研究流程圖



五、研究步驟：

(一)如何玩積木

想辦法將積木拼好：

我請爸爸將科學教育館內積木的構造圖畫下來，然後原樣再仿做一個。在完成那天便迫不及待的開始玩起來，但是一直到晚上還是沒有辦法拼好，於是再請哥哥及爸媽一同來幫忙，好不容易終於完成了。

記住卡樺的步驟：

爲了避免再忘記拼的步驟，於是把拼好的積木記好位置依序分解、再拼好，如此重複幾次之後，便能駕輕就熟了。

但是：

我現在卻產生幾個疑問，那便是：

- 1.它是如何巧妙的組合在一起的？
- 2.這種設計有什麼優、缺點？

(二)針對疑問與同學一起討論

疑問一：它是如何巧妙的組合在一起的？

針對這個問題我們從積木外觀看起，經過討論後我們發現它有以下的特徵：

- 1.它是一個卡一個的互相結合
- 2.這種卡法是「前一根木頭必須要靠下一根木頭來固定」
- 3.最後卡上去的木頭具有固定整個結構的功用，也就是拿走這一塊木頭的話所有的木頭就會全部散落
- 4.所有的凹槽的長、寬、深都是以木頭厚度的一半為單位
- 5.可以從不同形狀的木頭開始拼起，但最後結束的木頭卻是固定的同一根

疑問二：這種設計有什麼優、缺點？

針對這種老祖先用於房屋結構的特殊設計，我們想要是用來蓋房子的話，它的優點會是：

- 1.整個結構不需要用到一根鐵釘便能固定
- 2.拆、裝都很方便，只要移走固定用的木頭，整個結構就會散落
- 3.在拆除的過程中不會像一般釘過鐵釘的木頭容易損壞
- 4.它所受到的重量會平均分散到整根木頭上面，應該會比較堅固

既然堅固那麼現在為何會很少見呢？我想有可能是(缺點)：

- 1.除非熟悉拆、解過程，否則不易施工
- 2.是實心的結構，要是用來蓋房子的話，可能會太重

於是：

我們便想設計一個實驗來證明這種構造是否真的很堅固

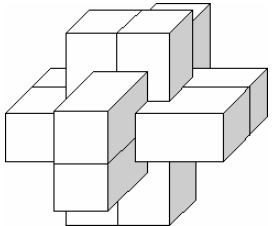
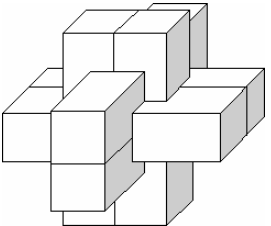
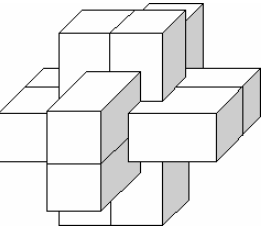
(三)設計木頭結構的載重力實驗

實驗一：特殊設計的卡榫結構和一般結構在載重上有什麼差別

由於用木頭做成的結構無法以手邊現有的工具來試驗載重情形，於是我們便將材料「改以陶土」來代替

步驟：

- 1.將陶土切成 8cm*2cm*2cm 的長條狀 18 根
- 2.按比例將六根土條削成如積木中各木條的形狀後組合起來
- 3.再拿六根土條削成一般的凹凸狀後組合起來
- 4.將剩餘的六根土條直接用釘子組成相同的形狀
- 5.在橫條位置上分別掛上小石子
- 6.增加小石子的數量，直到土條斷裂為止並記錄其重量

名稱	特殊設計卡樁	普通卡樁	無卡樁
圖樣			
兩根並排受力	4.93~20.1kg	2.8kg	1.2kg
兩根重疊受力	5.04~4.5kg	3.4kg	1.6kg

結果：

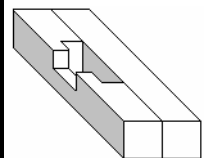
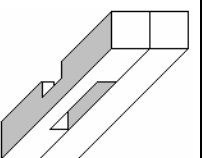
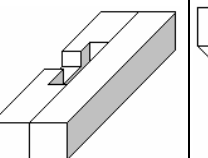
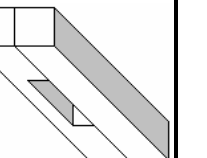
1. 不管哪一種樁接方式，重疊受力要比並排受力要強
2. 若以樁接形式的受力情況可發現
特殊設計卡樁 > 普通卡樁 > 無卡樁
3. 特殊設計卡樁在不同面的受力情形各不相同，但因為是屬於貫穿式的設計所以不會脫落，而是到最後直接斷裂，所以比起其它兩組要來得堅固許多
4. 一般卡樁在受到壓力時會先彎曲將凹槽撐開，等到超過卡樁的承受力時便會脫落，並在接合的部分產生磨損或斷裂
5. 一般卡樁的受力與特殊設計不同，它主要是靠接合處的凸起與凹槽撐著，也因為卡樁長度有限，在受力時常常會造成變形
6. 無卡樁設計的承受力主要是在接頭處鐵釘的長短，因為沒有卡樁來分散力量，所以承受力全部都集中在釘子的部位，只要一稍微變形彎曲便整個脫落

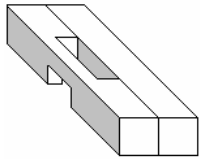
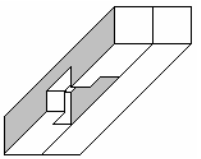
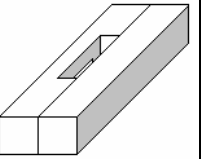
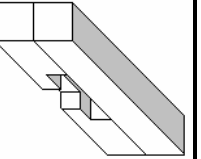
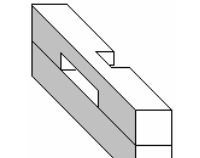
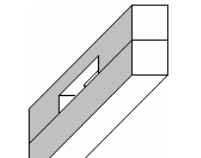
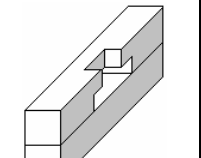
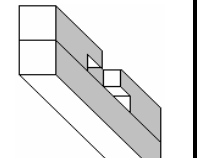
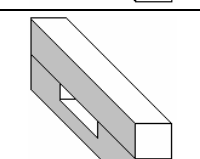
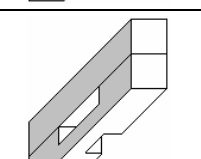
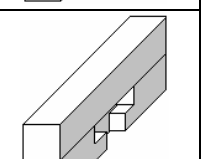
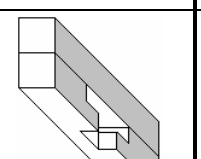
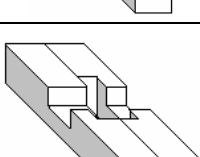
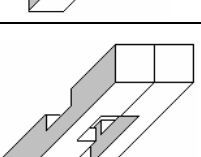
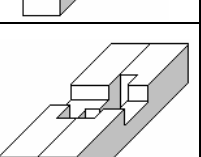
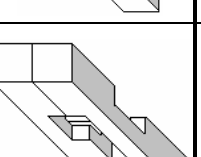
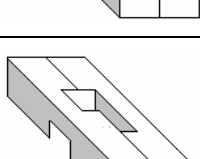
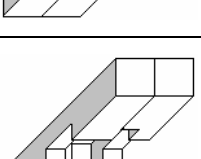
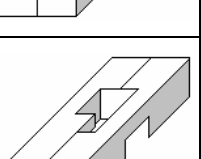
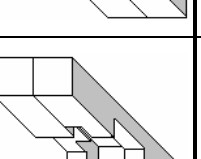
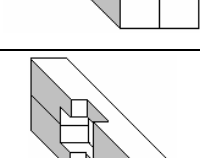
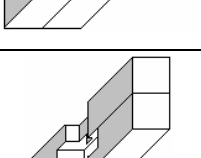
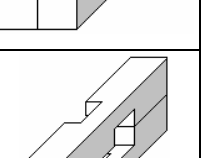
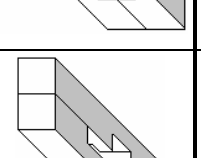
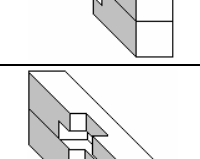
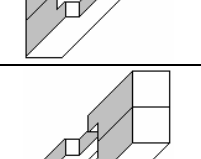
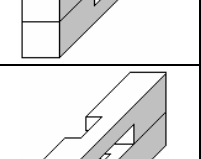
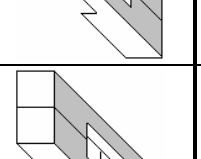
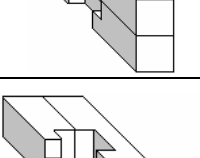
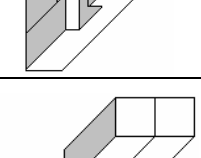
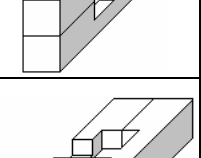
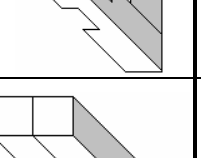
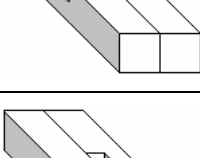
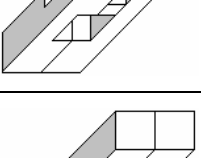
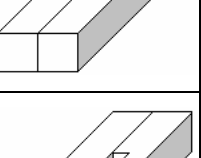
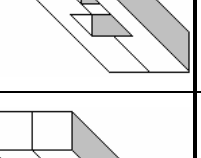
實驗二：特殊設計的卡樁結構在不同的載重面上有什麼差別

步驟：

1. 將陶土切成 8cm*2cm*2cm 的長條狀 24 根
2. 按比例做成 4 組(每組六根)相同型式的特殊卡樁結構並組合起來
3. 把原來的木頭模型組合上，並把其中相對的兩根抽換成陶土
4. 在陶土的位置上掛上塑膠袋，並將小石子倒入袋中
5. 增加小石子的數量，直到土條斷裂為止並記錄其重量
6. 抽換另外三組相同形狀的陶土分別以三個不同面來測試承載量
7. 分別再以另外兩組沒有抽換過的木條重複 3~6 的步驟

結果：

	左上看	左下看	右上看	右下看	承受重量
A+B→1					19.2kg

A+B→2					20.1kg
A+B→3					24.5kg
A+B→4					23kg
C+D→1					4.53kg
C+D→2					4.93kg
C+D→3					5.04kg
C+D→4					5.12kg
E+F→1					6.11kg
E+F→2					6.31kg

E+F→3					6.61kg
E+F→4					6.45kg

1. 陶土的組合形狀會影響它的承載力

$$A+B > E+F > C+D$$

2. 同一組合的陶土若轉成不同的四個面，它本身的承受力會改變
3. 兩根重疊的受力要比並排受力強
4. 原則上缺口越少的承受力越強
5. 同一組合中缺口朝下的承受力比缺口朝上的強
6. 同一組合中缺口朝左與缺口朝右的承受力相差並不大

討論一：分析不同載重面上的受力情形

1. 從斷裂的位置都出現在最細的部位
2. 從三組(AB、CD、EF)的最細部位來看，它將會影響整個結構的承受力
3. 將三組最細部位的截斷面畫出，並比較先前的結果可發現：

組合形式	並排一	並排二	重疊一	重疊二	截斷面	平均
A+B					5	
承載力	19.2kg	20.1kg	24.5kg	23kg		21.7kg
C+D					2	
承載力	4.53kg	4.93kg	5.04kg	5.12kg		4.91kg
E+F					3	
承載力	6.11kg	6.31kg	6.61kg	6.45kg		6.37kg
平均	9.95kg	10.45kg	12.05kg	11.52kg	3.3	10.99kg

4.再次證明兩根重疊受力大於兩根並排
 $12.05\text{kg}、11.52\text{kg} > 9.95\text{kg}、10.45\text{kg}$

5.截面愈大承載力愈強

6.如果把截斷面與平均承載量做比較時可以發現

截面數	1	2	3	4	5	6	7	8
承載力		4.905kg	6.37kg		21.7kg			

7 影響承載力的因素在於

截斷面的面積→最主要

並排與重疊 →其次

缺口擺的位置→最後

8.而且所增加的截面承載力不是以單純的比例上升，而是更可觀的倍數
 上升：截面 5 為截面 2 的 2.5 倍，但承載力卻是 4.5 倍

9.所以增加截面積對承載力的改善有極大的幫助

10.從斷裂的位置來看，每一種組合的積木中都有它受力最強的地方，若是加強這些部位的強度的話，積木的承受力應該會加強

11.這種榫接的積木外觀上雖然都一樣，可是它它的內部結構中一定有一面是最堅固的，在蓋房子的時後應該要把這些地方擺在最需要受力的位置，這樣房子才會穩固

疑問三：這種設計既然堅固、好用，那要如何改良才能應用到日常生活中？

(四)既然堅固又好用，要如何改良

經過討論之後我們發現這種設計最大的缺點便是**重量太重及結構過於複雜**，因為這樣不僅施工不易而且所用的材料也比較多，所以我們想先將每一個積木改成「**工字型**」的結構

但是減重後的積木它的承載力會降低，為了加強承載力於是我們朝「**改良榫接的型式：簡化結構、加強卡榫受力的截面**」及「**加強受力部位強度**」兩方面來做

實驗三：不同型式的工字結構在強度上有什麼差別

步驟：

- 1.將厚紙板切成 10cm*3cm 的長條狀 12 條
- 2.把紙條摺成工字型的長條狀
- 3.將這些長條黏貼成三種不同型式的工字結構
- 4.將三種工字結構固定好之後於兩端掛上小石子
- 5.增加小石子的數量，直到紙條斷裂為止並記錄其重量

型式	橫排為主	縱排為主	綜合
圖樣			
承受重量	4.32kg	7.63kg	6.11kg

結果：

1 結構強度依序為

縱排為主 > 綜合 > 橫排為主

2.我們可以根據實際所要受力的情形調整工字結構的擺放方式

討論二(之一)：重新設計樺接型式

1.在設計之前我們整理受力強度的結果以做為設計的參考原則

直立 > 重疊 > 並排

無缺口 > 缺口少 > 缺口多

缺口朝旁 > 缺口朝下 > 缺口朝上

2.由於無法將每一根積木都設計成無缺口、重疊及缺口朝下，因此我們便定出優先設計的順序

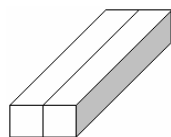
3.三組中(並排、重疊、直立)並排的受力較差，因此儘量設計成無缺口或缺口朝旁

4.根據以上的原則我們設計出許多種樺接的型式

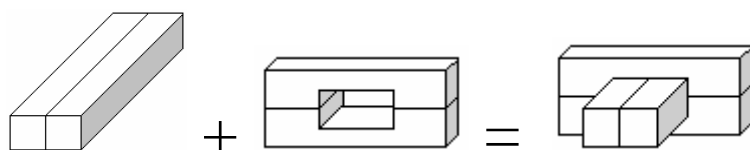
5.用保麗龍板來製作這些樺接積木

設計過程

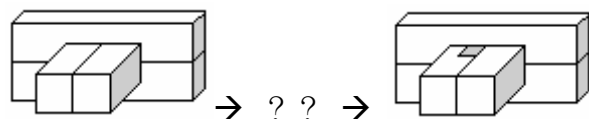
a.先設計並排的一組



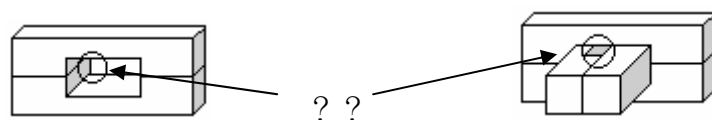
b 再設計重疊的一組，由於並排的優於重疊，所以缺口開在重疊的一組上



c 再設計直立的，但由於已無缺口，且垂直的已開過，只好從並排下手。為不影響並排強度所以只開最小的細縫，而且以開在兩側為優先

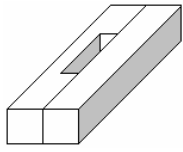


d.但如此一來，重疊的一組也需跟著調整，以填補並排一組的空隙

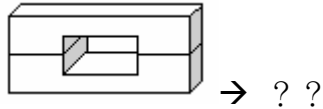


e.要如何做？有兩個做法

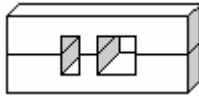
第一個方法是
若並排這樣開小缺口



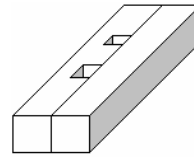
則重疊便要填補縫隙



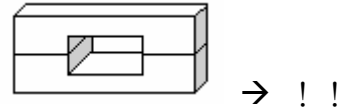
像這樣



第二個方法是
若並排這樣開小缺口



則重疊便不用填補縫隙

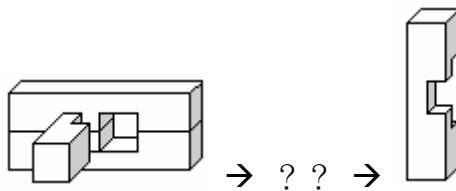


決定使用哪一組設計：

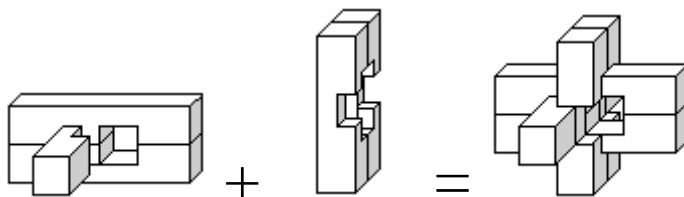
由於這兩種設計的並排組它的截面都相同(皆為 6)

所以選擇第一種方法的設計

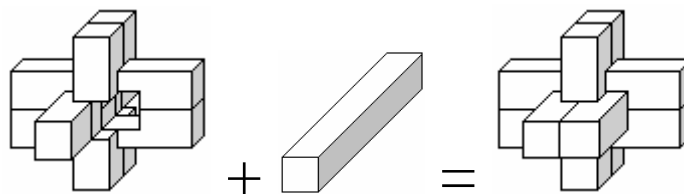
f.並排與重疊排好之後，剩下的空間便留給垂直一組



g.像這樣橫向塞入



h.最後固定----完成



討論二(之二)：強化樺接結構

- 1.根據實驗二的討論活動中我們由積木的形狀推論出受力最強的部位後做上記號
- 2.將有記號的部位改以不同的材料代替或換成實心的設計

疑問四：這種設計真的堅固、好用嗎？

(五)套用先前研究結果設計一個全新的木頭

實驗四：改良過的樺接積木在強度與重量上有何改變

步驟：

- 1.依比例將保麗龍做成原先的特殊卡樺結構
- 2.再依比例將保麗龍做成重新設計的卡樺結構
- 3.重複步驟 2 並將內部改成工字型的結構
- 4.重複步驟 3 但在受力大的部位填成實心
- 5 分別量取四組保麗龍模型的重量
- 6.再分別將四組保麗龍模型的橫條位置上掛上塑膠袋並放入小石子
- 7.增加小石子的數量，直到橫條斷裂為止並記錄其重量

型式	改良前 (實心)	改良後 (實心)	改良後 (工字結構)	改良後 (工字加強)
圖樣				
重量	55g	53g	22.3g	26.5g
兩根並排受力	3.52kg	6.83kg	4.33kg	6.42kg
兩根重疊受力	8.64kg	12.8kg	9.1kg	11.4kg
總合	12.16kg	19.63kg	13.43kg	17.82kg

結果：

- 1.結構強度依序為
實心(改良後) > 工字加強 > 工字結構 > 實心(改良前)
- 2.在相同卡樺設計下，實心的強度大過空心，只要加強受力最大的部位強度，雖然增加一點重量，但強度卻大為提高

六、討論

- 1.原先的樺接結構在重量和強度上的比較：我們以實驗四的結果中改良前(實心)做為比較的標準時將可發現

型式	改良前 (實心)	改良後 (實心)	改良後 (工字結構)	改良後 (工字加強)
重量	55g	52g	22.3g	26.5g
減重比	100%	-5%	-59.5%	-50.9%
兩根並 排受力	3.52kg	6.83kg	4.33kg	6.42kg
強度比	100%	194%	123%	182%
兩根重 疊受力	8.64kg	12.8kg	9.1kg	11.4kg
強度比	100%	148%	105%	132%

- 2.相同材料及形狀，實心的承受力要比空心的強
- 3.以空心的情況來看，補強受力最大的部位的可增加整體的承受力
- 4.在考慮強度可接受的範圍內「工字加強」不失為一種節省材料及減輕重量的好方法

七、結論

(一)結果摘要：根據實驗發現

- 1.經過特殊設計的卡樁承受力會比一般的卡樁強
- 2.卡樁設計木頭的擺放位置及角度改變時它的承受力也會改變
- 3.卡樁設計木頭的承受力除缺口朝左與缺口朝右相差不大外，其它則如下：
無缺口 > 缺口少 > 缺口多
直立 > 重疊 > 並排
缺口朝旁 > 缺口朝下 > 缺口朝上
- 4.利用歸納出的原則可以根據需要重新設計所要的卡樁結構
- 5.從斷裂的位置來看，每一種組合的積木中都有它受力最強的地方，若是加強這些部位的強度的話，積木的承受力將會加強
- 6 工字結構中受力強度會隨受力的方向而改變
- 7 實心結構的承受力比空心結構強，但如果適當的調整空心的設計(工字加強型)則又可大幅提高結構強度
- 8 爲了節省材料及減輕重量，空心設計是一個必然的趨勢，同時又爲了因應強度降低的結果，勢必要朝強化結構(重心設計樁接型式及工字加強)，如此一來才具有實用價值

(三)研究的重要性

- 1.從分析卡樁設計，規納出卡樁受力強度的原則
- 2.根據歸納出的原則，成功的改良原有卡樁的設計，包括：
 - (1)簡化設計：提高施工便利性
 - (2)提供卡樁設計強度：從增加受力的截面積，提高整個結構的承載力
 - (3)減輕重量：成功利用工字結構，不僅節省材料而且便於施工
 - (4)強化受力點：利用少許材料強化重點受力區，不僅強化原本的工字結

構，又不會使重量增加太多

(三)未來的展望

- 1.本研究在於提高中國古老榫接設計的實用價值，以利日後能廣泛的應用到建築及家俱中
- 2.榫接的設計不僅可提高結構的強度，而且在拆、裝的過程中不易損壞，對於一些時常需要組裝的用具可採用此設計以提高耐用性
- 3.對於臨時搭建的房屋也可採此設計，不僅不必擔心接縫處是否牢固更可提高房屋的安全性
- 4.本研究的承受力試驗是針對整體載重方向而設計，日後可朝加強多方向的承受力來繼續努力

實驗過程照片

開始研究積木拼發	想一想	
開使研究積木拼發	想一想	
將土條按照 ABCDEF 的相關位置分類		
		
		
		

將要實驗的相關木頭位置抽換成陶土



要很小心的抽換

開始進行載重實驗



一直加石子直到土條斷裂為止



記錄小石子的重量



便之到土條能承受的載重力有多少



繼續再做其它的土條實驗





根據實驗數據規納原則後開始設計更堅固的卡榫裝置





無 缺 口 > 缺 口 少 > 缺 口 多

直 立 > 重 疊 > 並 排

缺 口 朝 旁 > 缺 口 朝 下 > 缺 口 朝 上

評語

080110 國小組物理科 最佳創意獎

卡！卡！卡！卡得好！

1. 針對傳統之卡榫設計，提出改進方式，頗具創意。
2. 研究過程詳實，態度嚴謹。