

高級水泥



重工業出版社

高 級 水 泥

Л. Д. ЕРШОВ 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

重 工 業 出 版 社

Л. Д. ЕРШОВ

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЦЕМЕНТЫ

Государственное издательство технической литературы

Киев 1952

* * *

高級水泥

趙維彭 譯

重工業出版社（北京西直門內三官廟11號）出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第〇一五號

* * *

重工業出版社印刷廠印

一九五四年八月第一版

一九五四年八月北京第一次印刷（1—5,130）

787×1092 • $\frac{1}{25}$ • 20,000字 • 印張4 • 定價5,100元

* * *

發行者 新華書店

目次

問題的提出.....	1
------------	---

理 論 基 礎

水泥的動壓性質及其試驗方法.....	4
水泥的礦物岩質結構與相組成.....	22
決定水泥強度及其它性質的各因素.....	39

製 造 技 術 原 理

原料與外加劑.....	55
熟料的燒成與粉碎.....	57
試製研究.....	62

水泥的性質與應用

衝擊韌性、硬度及抗折力.....	74
水泥的脆弱性、變形性與內應力.....	83
體積變化.....	85
特殊高級水泥的使用.....	87
參考文獻.....	95

問題的提出

我們知道，矽酸鹽水泥的歷史大約已經有一百三十年之久了。但在這一百多年當中，它卻仍然停留在低級膠凝物質的階段上，且其物理技術指標也極不穩定。儘管是這樣，但在最近以前，矽酸鹽水泥還仍是唯一的、萬能的一種膠凝材料。它的使用範圍包括了地上、地下、水工及其他各種建築工程。

在最近二十年中間，由於建築技術的顯著提高，個別建築工程種類的劃分和專門化，就完全說明，僅有一種矽酸鹽水泥已遠不能滿足建築者的需要了。近代的建築事業，根據水泥和混凝土在構築物中的使用條件的不同，而對它們提出了很多不同的要求。例如：鋪路用的混凝土就必須具有高的抗摩性、抗折強度和抗張強度，而且乾縮性要小，彈性及抗凍性亦應比較高。水利工程用的混凝土，除了密度、不透水性和抗凍性要很高以外，還必須具有儘量大的需變性和最小的放熱量。對築城用混凝土的基本要求是抵抗衝擊和爆破的性能要高，耐壓、抗張和抗折強度等也應該比較大。

所有這些情況，就是進一步研究生產技術和組織生產一系列特殊品種的矽酸鹽水泥的必要前提。

在最近的十五年到二十年中間，由於蘇聯學者：А.А.Байков 院士、П.П.Будников 院士、П.А.Ребиндер 院士、В.Н.Юнг 教授、Б.Г.Скрамтаев 教授、В.А.Кинд 教授和 А.Е.Шейкин 等人的研究，使得對矽酸鹽水泥的化學礦物組成和技術性質方面的科學知識水平已經提高到完全可以進一步解決生產一系列特殊品種的水泥和提高產品質量這一問題的程度。

由於蘇聯學者、技師和生產人員的勞動而創造出來了像多成份水泥、防水水泥、耐硫酸水泥、膨脹水泥、高級水泥、礬土水泥和其他等等品種的水泥。

雖然是這樣，但是很多的特種建築工程，如築路工程、快速和事故搶修等工程，仍在需要一種具有很高強度的、強度增長率迅速的、韌性比較高並且有其他特殊性質的特殊水泥來施工；而這裡祇有礬土水泥才能够滿足對這種快硬高級水泥所提出的要求。

礬土水泥的生產問題，已由我們的 П.П.Будников、В.Н.Юнг、В.А.Кинд、Б.Г.Скрамтаев、С.М.Рояк、Н.И.Левин、Т.С.Вальберг 和其他人勝利的解決了。П.П.Будников 和 И.И.Гольденберг 並且解決了在巨大構築物中及在高溫條件下使用礬土水泥的問題。

所有這些研究都保證了礮土水泥榮任特高級和快硬膠凝物質所應有的榮譽，而且證明了，它在一系列的特殊情況下確是不可缺少的。然而，由於鐵礮土的稀少和礮土水泥的製造費用比較昂貴，從而就限制了大量生產這種水泥的可能性；因此生產快硬高級的快硬鹽水泥的問題就被提到首要的地位。

直到現在為止，對高級水泥和其他性質的各種水泥的生產技術和研究，已經作過很多次的試驗，並且對於用這些水泥所製造的混凝土也作過很多次的試驗。這些研究工作均有着很大的科學和實際意義。但是應該指出，過去所發表的有關這些水泥強度性質的研究結果，大部份祇是些靜壓應力和靜壓負荷方面的試驗結果，涉及到水泥之動壓性質方面的材料是很少的。

然而，由於近代工業企業和道路建築工程的技術水平不斷地提高以及高速度迴轉機器、大型汽錘和電錘的廣泛被利用和具有大跨度的橋梁的修建等，所有這些情況，都給材料和結構帶來了很大的震動和動壓應力。

當動壓力驟然的衝擊到材料和結構上的情況下，這些材料和結構中的動力學問題就具有了很重要的意義。在這種力的作用下，材料當中所產生的合成應力是極端複雜的，而變形速度在每秒鐘內亦將達到數百甚至數千公尺之多。

衆所週知，動壓力的作用同靜壓力的作用，在原則上就是不同的。在外部動壓力作用下，材料所表現出之性質同靜壓力作用下所表現出之性質是有很大區別的，甚至常常是完全相反的。材料的這些新的性質，在我們慣常對建築材料所採用的靜壓試驗方法當中是表現不出來的。

例如：在漸加荷重下表現有塑性的材料，若對它驟然施以負荷，那麼它就會變成脆弱性的材料。又例如柏油，若在比較長的時間內施以靜壓力作用時，那它甚至能夠產生一種相當程度的塑性變化，以致在本身重量的作用下而開始流化。但若是在它上面驟然施以負荷，那麼它相反又會表現出脆弱的性質。又例如用阿拉伯樹膠作成的四方體，若用手指慢慢地施以很小的壓力時，它就很容易變形，但如果將它急速的扔到地板上，它却具有很大的彈性。

因此說，變形力的性質和速度乃是使材料的性質和抵抗性起顯著變化的因素；並且在有驟然的動壓力作用時，這些因素同時又是促使我們採用高強度的以及動壓抵抗性很高的材料的首要前提。

修築寬大的幹線汽車路的經驗告訴我們：要想延長混凝土路路面的使用壽命，就必須使用高級水泥。這種水泥除了其他各個性質以外，還必須具有很高的耐壓強度和適當的彈性。但是，直到現在為止所能生產之水泥，却都具有這樣一個特點：當其耐壓強度增加時，則水泥石的脆弱性也隨之加大，以致影響了混凝土路上層路面抵抗衝擊負荷和抵抗週期性交變負荷的抵抗力，從而也就影響着它

的使用壽命。除此之外，當水泥石的脆弱性增加時，它的彈性就會隨着周圍濕度條件的不同（雨、太陽等等）而減小，並且很容易發生體積變化。結果，道路修好後，經過一些時間就會在混凝土路面上出現裂縫。這些裂縫將混凝土路面切割成碎塊，而最後使路面完全潰壞。

因此，在具有很高的耐壓強度和抗折強度的同時還必須具有較高的韌性和動壓抵抗性，這是特種道路水泥的一種很重要的性質。

對於修建將要承受破壞力很大的動壓負荷的構築物來講，生產一種特別的、高級的、可以抵抗動壓負荷的水泥的問題是特別迫切的。這種動壓負荷必將在工程物中產生很巨大的應力。正如Г. И. ПОКРОВСКИЙ 教授所指出，在這種應力下已經再也「看不到彈性原理的基本前提了，並且材料應力的基本情況也有很大的變化」〔3〕。

所有這些，就是迫切需要製造特殊的、能够抵抗動壓力的高級水泥的基本原因。這種水泥需要能够抵抗交變負荷和衝擊作用下所產生的動壓應力。

爲解決這個問題，一方面要去研究製造這種高級水泥的理論基礎和生產技術原理，另一方面就要賦予這種水泥以特殊的性質；主要的就是要提高其動壓力抵抗性。

沒有必要證明，像這樣一個問題的全部解決，決非某一個研究家的單獨力量所能作到的，而確是很多方面的專家——生產專家、建築專家、化學專家、物理專家、地質專家和機械專家等等共同進行科學研究最適當的對象。

後面所列舉的研究結果，乃是作者在最近十五年當中，在對這種具有較高的動壓力抵抗性的特殊高級快硬水泥方面進行科學研究和生產試驗所得到的結論。

理 論 基 礎

水泥的動壓性質及其試驗方法

關於材料的動壓應力問題，在最近時期內受到了普遍的注意。但是，直到現在為止，在有關文獻中，關於水泥、混凝土及其他建築材料的動壓性質的經驗資料還從來未有過任何記載。實際上，現在在計算承受動壓力作用的結構和構築物時，也只是按着構築物的靜力學原理計算而已；在必要的情況下，方才採用一種固定的而又沒有理論基礎的動壓係數。

由以下的事實當中很容易看得出，這樣來計算承受動壓負荷的結構，是不能令人滿意的。假若我們用 f_0 代表結構本身的振動次數，用 f 代表動壓負荷循環作用的次數，那麼動壓負荷對構築物的作用，總的來講，可以用下面兩種情況說明：

甲，動壓負荷的循環作用次數 f ，顯著的小於或者顯著的大於結構本身的振動次數 f_0 ，即 $f \neq f_0$ ；

乙、動壓負荷的循環作用次數 f 和結構本身的振動次數 f_0 完全符合或者極為近似，即 $f = f_0$ 。

對第一種情況加以研究後，就很容易看得出：如果動壓負荷的循環作用次數 f 比結構本身的振動次數 f_0 小很多時，則結構中所產生的應力就會很接近於類似負荷的靜壓作用。在這種情況下，用於計算中的動壓強度係數通常等於 1.2—1.5，這只能使構築物的安全強度過大，而對材料的浪費是毫無辦法的。

如果負荷的循環作用次數 f 比結構本身的振動次數 f_0 大很多時，那麼負荷的振幅就要大大的小於結構本身的振幅，因而在這種情況下，產生於結構內的應力甚至將要小於在類似負荷的靜壓作用下所產生的變形。很明顯，在這種情況下，採用動壓係數就會使構築物的過剩安全強度值更大。

當負荷的循環作用次數同結構本身的振動次數完全符合或者很近似的情況下，那麼情況就完全不同了，結構即將工作於共鳴帶中。在這種情況下，材料和結構當中將呈現出振幅很大的震動，在它們裏面將會發生超過允許限度好幾倍的應力，甚至採用我們現在所通用的最大動壓係數也是不夠的。[在這種結構中，不僅不能保證所需要的安全強度，甚至還不能夠滿足對所有構築物所提出之起碼要求——足夠的硬性] [4]。

因此說，按着構築物的靜壓理論，並取用一定的動壓係數來計算承受動壓力作用的結構的方法是不會令人滿意的，而且也必須由適當的、以精確的材料動壓

性質的知識和動壓現象在構築物中的本質知識為基礎的動壓力計算方法所代替。

動壓力現象的實質

根據現代的觀點來講，構築物中的動壓力現象，乃是三種主要的、互相重疊的作用的合成：

甲、負荷的動力學；

乙 結構的動力學；

丙、材料的動力學。

我們將負荷動力學和結構動力學的問題放到一邊不談，因為它們已經超出了我們的研究範圍，而比較詳細的來研究一下有關材料（其中包括水泥和混凝土在內）的動力學問題。

所謂材料的動力學，應當理解為該材料在靜壓力和動壓力兩種不同的負荷作用下所表現出的不同的性質的總合。動壓力同靜壓力作用間的原則區別，就在於當某種材料受到外來的動壓作用後將表現出顯然不同的、而常常是完全相反的性質。這裏，由於表現動壓負荷的形式很多（震動、交變負荷、驟然荷重及衝擊等），所以也就決定了材料性質的可能變化範圍也是很廣的。

我們知道，在動壓負荷下，材料中最敏感的性質乃是它的脆弱性。然而，某種材料所特有的脆弱性和可塑性，並不是在所有的情況下都是固定不變的性質。隨着一系列因素的不同，第一例如變形速度的不同，這兩種應力——滑動應力（可塑性）和分裂應力（脆弱性）對同一種材料就不會是固定不變的。常常有些材料，在漸漸的對它施以負荷的時候，它就具有可塑的性質，而驟然施以負荷時，則就會變得脆弱起來。

在測定變形力速度對靜壓應力值的影響的試驗當中證明了：增加變形力的速度就會引起材料應力的急劇增加。

第1表內所舉出之數字，乃是在固定的負荷下對錫作抗張試驗時所得到的；第2表，是在固定的速度下對錫作抗張試驗時所得之相適應的資料。

第1表

應力 (公斤/平方公厘)	拉張速度 (10^{-9} 秒)
0.283	6—8
0.425	13—19
0.565	25—35
0.707	60—75
1.425	1000—1200
2.120	14000—16000

第 2 表

拉張速度 (10^{-3} 秒)	應力 (公斤/平方公厘)
43750	2.38 2.42
175000	2.69 2.76
700000	3.04 3.15
2100000	3.36 3.46
6060000	3.60 3.71
24500000	3.96 4.10
48500000	4.22 4.38

第 1 和第 2 兩表內所提出之數據，屬於試體之延伸率等於 15% 時的情形。

對這些數據加以分析後，就會看得出：在不同的拉張速度和不同的應力下，却可以產生完全相同的變形——比試體原有長度伸長 15%。例如：在錫的拉張速度為 8×10^{-3} 秒時，應力為 0.29 公斤/平方公厘，而當拉張速度為 1200×10^{-3} 秒時，則應力已經是 1.425 公斤/平方公厘了。

鋼與其他材料，也得到與此類同的結果。當我們在很多水泥工廠的化驗室中作水泥試驗時，對速度的增長也進行了實際的觀察，同樣證實了這點。如果在用壓力機作耐壓試驗的時候，若能用手動油泵往活塞下面加油的話，那麼在增加這種加油速度的同時，水泥和混凝土就會得出比較高的強度指標。

所以說，增加變形速度就會提高材料的強度的現象，乃是大多數材料所共有的性質。並且當增加變形速度時，材料的滑動應力也將加大，正如 П. Н. Давид-Григорьев 教授 [7] 所談：「所有的材料，不論是可塑性的或是脆弱性的，在很高的變形速度下，都能够像脆弱性材料一樣的變形」。尤其是建築材料，當受到驟然的動壓力作用時（如衝擊和爆炸），變形速度在每秒鐘內竟達到好幾百公尺之多，這時候，這種性質就表現得更加明顯。在這種條件下，材料的脆弱性、韌性和抗衝力將具有特別重要的意義，並將成為材料動壓性質的主要特性。

從另一方面我們又知道：外力作用常常要引起材料內部應力狀態發生某種變化。然而，這時外力的能量却不能够全部變成結構的位能，一部份得自外面的能量將被材料吸收和散佈成熟。當材料承受靜壓負荷的條件下，應力狀態變化的情況是很少有的，而且只是在裝載或卸載的時候，因此由材料所損失的能量也是很微小的。然而，當材料承受動壓負荷的時候，則材料的應力狀態將不斷的發生變化，並且在這種情況下的能量損失也是很大的一個數值。

上面所談到的這項材料的性質，在外部動壓力作用下表現得最為明顯，並定

名爲「材料的內部應力」，而且又是材料最主要的動壓特性。

所以說脆弱性、衝擊韌性、衝擊硬度和內應力，乃是表示材料動壓性質的主要項目。

水泥與混凝土之內應力

我們已確定，水泥和混凝土乃是一種非塑性的材料，它們都具有很低的比例極限，因此變形的增長比負荷的增長要快得多。甚至在應力未超出比例極限的情況下，像水泥和混凝土這種建築材料，也是不符合虎克定律的，從而它們是工作在不完全的彈性帶內。與此相適應的壓力圖表載於第1圖中。由第1圖中可以看出：變形同負荷間的關係不是正比關係，而是一條傾向負荷軸的曲線。分析之，此曲線可由下列公式表示：

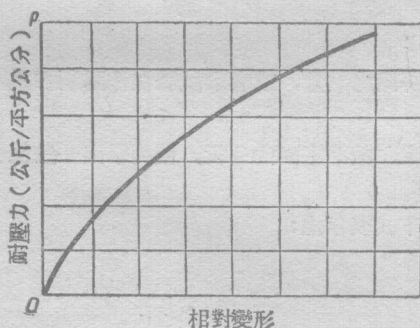
$$\varepsilon = \frac{P^n}{E}$$

式中： ε ——相對變形；

P ——壓應力；

n ——決定於材料性質的數份；

E ——壓力彈性係數。



第1圖

面積 OCB_e 代表卸載時外力之功。由兩個面積之差所構成之磁滯圈面積 $OABC$ 代表每一次裝載和卸載循環中所損失之功。

當材料承受靜壓負荷的條件下，只有在裝載和卸載的時候，應力狀態才有變化，而且不是經常重複的，所以這時由材料所損失之能量是很微小的，並且完全可以由靜壓計算中所採取之安全係數補償之。

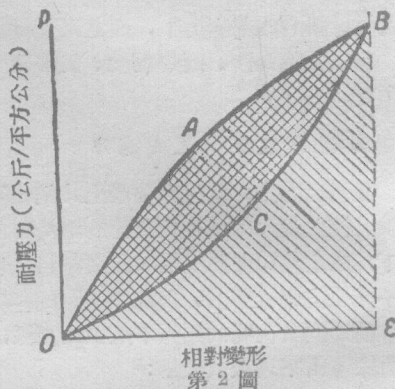
純水泥的 $n=1.09$ ，而花崗岩的 $n=1.13$ 。

在裝載和卸載的過程中，若對變形進行觀察，那麼就會發現水泥和混凝土的不完全彈性的另外一種表現。精確的加以測量，則就會發現：混凝土在裝載和卸載當中的變形，不是互相重合的，而構成一種所謂「磁滯圈」。

描於圖表（第2圖）上的面積 OAB_e ，就是代表裝載時外力之功。而

然而，當材料承受動壓負荷的條件下，則材料的應力狀態就會發生不斷的變化，並且在每次這種負荷變化的循環當中，有一部份能量將被吸收。在這種情況下，由材料所損失的能量就會是一個很大的數值。這個數值要在計算承受動壓作用時加以特別的考慮。

每一立方公尺的材料，在每一次完全的振動循環時間當中（裝載和卸載）所吸收的和散佈的能量，就叫做材料的內應力 δ 。但是，爲了估計材料的情況和進行動壓力計算，最能够說明問題的還不是材料在每一次負荷變化循環當中所吸收的能量的絕對值，而是它同一次振動循環之全能量之比，即 $\frac{\delta}{D}$ 。



該值稱之爲材料的相對或單位內應力 ψ 。

材料的內應力，可以用好幾個方法求得：

甲、求出磁滯圈後再計算其面積；

乙、求振幅的對數衰減率值；

丙、求每次裝載和卸載循環中所分解出之熱量，或者求試體在作強制振動時所化費之電量等等。

我們對這些方法的原理不準備作物理和數學方面的分析，僅列舉出一些能够說明這個問題的個別結果。

每次振動循環所消耗之能量，可由下式表示之：

$$\Delta W = \pi x \omega S^2$$

式中： x ——內應力係數；

ω ——強制振動之週波；

S ——振幅。

由上式中可看出，材料所消耗之能量，是同振幅的平方成正比。這說明，在振動達到最大振幅的共鳴帶中，結構中的材料是最吃力和最危險的。

上述非循環振動的衰減振幅，可求自物理中有名的公式：

$$S = a e^{-mt} \cos qt,$$

式中： a ——線值：可能是在 t 時間取的初振幅；

m ——衰減係數；

q ——振動週波。

從這個公式的外表，就很容易理解出它所表示之振動運動的性質。實際上，當 t 值增加時， $\cos qt$ 將在 $+1$ 到 -1 之間發生不停的變化；這說明振幅的符號將依次地變成爲正的和負的，因此說，運動是振動的。正因爲衰減係數 m 是正值，所以當 t 值增加時，乘數 e^{-mt} 亦不斷在減小着，所以上面的公式是代表振幅不斷在遞減的振動運動。

衰減係數，乃是非固定值，而是隨着週波變化的。因此，應用衰減振動運動的對數衰減率 λ 是比較方便的。對數衰減率，就是兩個循序衰減振幅之比的自然對數。該比值同週波已無關係。依據下列的方程式可求出衰減率之數值。

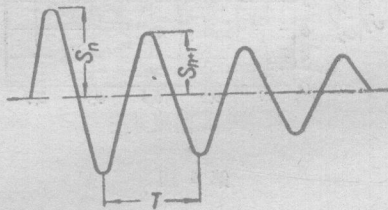
取 n 振幅（第3圖）的：

$$S_n = S_0 e^{-mt} \cos qt.$$

$$\text{所以： } S_{n+1} = S_0 e^{-m(t+T)} \cos q(t+T),$$

$$\text{從而： } \frac{S}{S_{n+1}} = e^{mt},$$

$$\text{或： } \lambda = \ln \frac{S_n}{S_{n+1}} = mt.$$



第 3 圖

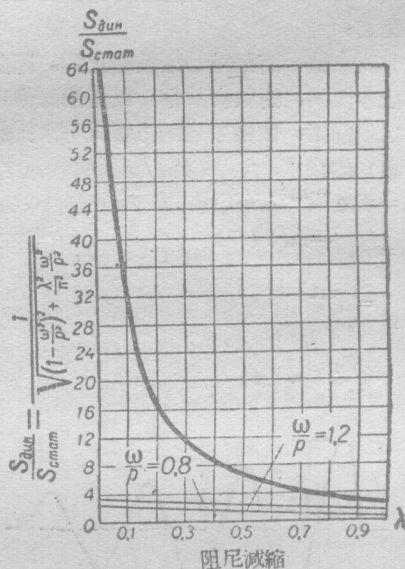
強制振動之振幅量同對數衰減率間的關係，從我們摘自 С. П. Тимошенко 教授〔8〕所發表之專題論文中的圖表（第4圖）可以看出來。分析之，此關係可由下式代表：

$$S_{\text{動壓}} = S_{\text{靜壓}} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{P^2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda^2}{\pi^2} \times \frac{\omega^2}{P^2}\right)}},$$

式中： ω ——強制振動之振幅；

P——本身振動之振幅。

由圖中可看得出：當材料是在離開共鳴狀態很遠的範圍內工作時，即當 $\frac{\omega}{P}$ 之比等於 0.8 和 1.2 的時候，那麼在動壓負荷作用下，材料內應力的變化對強制振動之振幅量的影響是不很大的。在這個時候，S 動壓和 λ 間的關係可以用與振幅率之座標軸差不多互相平行的直線來表示。



第 4 圖

在共鳴的情況下，如果 $\omega = P$ ，又比值 $\frac{\omega}{P} = 1$ 的時候，那麼情況就完全不同了。在這種情況下，上式將變成如下的形式：

$$S_{\text{動壓}} = S_{\text{靜壓}} - \frac{\pi}{\lambda},$$

即 $S_{\text{動壓}}$ 完全決定於 λ 值，並且由第 4 圖中可以看到，在共鳴帶中，由於振動振幅 ω 的速度增長所造成的代表材料內應力的衰減率的變化是很微小的。

因為有內應力存在，系統中強制振動的振幅在逐漸的減小；而且材料的內應力愈大，則系統中振動振幅的減小速度就愈快，從而構築物所必要的安全強度就

比較容易得到保證。

所以說，材料內應力的計算確是建築材料的動壓特性的一項極主要的項目。

水泥與混凝土的脆弱性、動壓硬性和抗衝性

除了內應力之外，建築材料的抗衝性也是它另外一項主要的動壓特性。所謂抗衝性和動壓硬性，應當理解為材料能予有效的抵抗各種動壓負荷的破壞作用（震動、交變負荷、驟加荷重等等）的性能。

而脆弱性，則可看成為與韌性相對的一種性質。然而，在不同的條件下，不管是脆弱性或者是韌性，却全不是某種材料所特有的固定的特性。

由於一系列因素的不同，首先例如變形速度的變化，就會使韌性的材料變成為脆弱性的；相反地，在一定的條件下，脆弱性材料也可能發生塑性的變形。變形速度愈大，則韌塑性質的材料就愈容易變成為脆弱性的材料。同時，材料的塑性愈大，則內部摩擦也就愈高，從而材料的動壓硬性也就愈高。因此說，韌性、可塑性、脆弱性、動壓硬性和抗衝性等等，乃是材料中彼此相關的性質；變動其中任何一個，例如變動脆弱性，那麼材料的其他性質也就要發生與之相適應的變化。

當某種材料受到壓力或拉力的時候，那麼在它內部，組成這種材料的結構成份，首先開始相互滑動。這種滑動是沿着某些結晶面發展着。滑動的開始決定於上述結晶面內所產生的碎裂應力值或滑動應力值。這種滑動所引起的變形值本身就確定了材料的可塑變形。

除此之外，在材料內部，沿着一定的結晶面，還會產生一種力圖克服各個結構成份間之粘着力的應力。根據材料中所具有的是那一種應力——滑動應力還是分裂應力，就可以判明材料是脆弱性質的還是塑性的。

生鐵、混凝土和水泥石均具有滑動應力，所以這種材料是脆弱性質的。鋼、鐵和其他金屬具有分裂應力，所以說這種材料是塑性的。

脆弱性材料，例如混凝土，它的破壞是因為粘着力被克服之故，因此預先不會發生很顯著的塑性變形。局部的最高應力，在這裡一直可以保持到材料被破壞的一剎那為止。

塑性材料，例如鋼，只有在它的滑動應力被克服之後才開始破壞，而且只是在最後才夠克服其粘着力。有見如此，所以說，試體在破裂或折斷以前，這裡將發生很大的塑性變形。從而得知：若能降低滑動應力或碎裂應力，那麼材料就會變脆弱性為塑性；因此在這種情況下，該材料的壓力彈性係數和張力彈性係數就可能相等。考慮到，在動壓負荷下，材料中最敏感的性質是它的脆弱性，因

此就可能得出一個結論：提高材料可塑性質的同時，就能引起材料的動壓硬性的增加。

但是，水泥的韌性和抗衝性，在很大的程度上，確是決定於其耐壓強度的高低，尤其是抗張強度（靜壓試驗方法所得）。在衝擊體作用到某構築物上的時候，若對產生於其中的應力加以分析，則可證實這一點。

在構築物體受到衝擊的地方，將得到一種帶有很多放射狀裂縫的所謂衝擊陷凹。這種陷凹就是一種大小不同的尖錐形；其尖頂朝向構築物的裡面。根據構築物的尺寸和衝擊體重量的不同，除了得到這種衝擊陷凹之外，同時在構築物中還有着一系列其他的變形。其中，在理論上最值得注意的，就是所謂劈裂。劈裂產生於構築物體的裡面，與受打擊之面相對。這種劈裂也是尖錐形的；尖頂朝向構築物的裡面。劈裂之尖錐體的底部也有很多放射性的裂縫。然而，隨着變形規模的不同，劈裂也可能呈其它形狀出現。

根據 Г. И. Покровский 教授所作過的實驗和與試驗相適應的計算可以證實：在鑽入到混凝土中之衝擊體的前面，可能生成一個加固地帶；該加固地帶，將力量分佈到此平面或其他平面上。該地帶之橫斷面積，將隨着鑽入深度的增加而加大。因此，對繼續鑽入之力的應力亦將增加。

該加固帶是線尺寸，大約與鑽入深度的開平方（ $\sqrt{I_1}$ ）成正比。因此，這種地帶的橫斷面積必將與鑽入深度 I_1 大致成正比：

$$Q = a I_1,$$

式中：a——比例常數。

這時，總的制止力為：

$$F = QP = a I_1 P$$

式中：P——介質對壓力的應力，公斤/平方公分。

該力之功等於

$$\int_0^L F dI_1 = \int_0^L a P I_1 dI_1 = \frac{a}{2} P I_1^2.$$

但是，按着能量不減定律來講，衝擊體的動能必將被產生於介質中之總制止力所平衡，即：

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{a P I_1}{2},$$

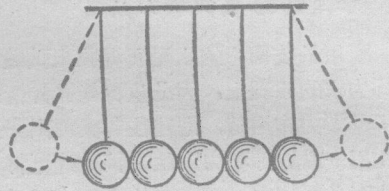
由此：

$$I_1 = v \sqrt{\frac{m}{aP}}.$$

所得之公式證明：衝擊體鑽入的深度，和它的速度成正比，和介質的耐壓強

度的開平方成反比。

劈裂，乃是堅硬性的一個表現，即機械運動的特殊惰性現象的一種。衝擊體也可能穿不過障礙層，但是它所具有的運動量却能部份地穿過此障礙層，而傳遞到劈裂體上。這種現象，正像對一排並列的、互相接觸的彈性鋼球給予打擊所得到的結果一樣。例如我們在打槌球的時候，若衝擊第一個球，則必引起後面球的反應。這在下面的實驗中就可以明白（第5圖）：左面的球抬起多高，則右面的球就彈出多高。這說明，力的脈動可經過整排的鋼球而傳遞過去。



第5圖

如果在一脆弱性桿子的一端，順着它給一打擊，那麼其另一端也就會脫落。原因是這樣的：當桿子的一部份受到打擊的時候，則開始壓縮，而此壓縮波則沿着桿子一直傳遞到其相對的一端，到這裡之後就無處再傳遞了。在壓縮彈性力的作用下，桿子的一端可以獲得某些速度。結果，桿子的一端開始從其他部份掙脫出來。與此同時產生張力。如果桿子材料的 $R_{耐壓} > R_{抗張}$ 時，則張力可能將桿子的一端折斷，那怕在這個時候，以前作用於桿子上的壓力還沒有破壞它。由這個實驗中可以得到：劈裂愈可能，則最大可能的壓力能量彈性密度與折斷此材料所必要的能量密度之比就愈大。

該比值等於：

$$U = \frac{\int_0^{\sigma_1} \sigma_A d\delta_A}{\int_0^{\sigma_2} \sigma_B d\delta_B},$$

式中：
 σ_A ——壓應力；
 δ_A ——壓力之相對變形；
 σ_1 ——壓力之彈性極限；
 σ_B ——拉應力；
 δ_B ——相對延伸率；
 σ_2 ——抗張強度（抗拉）。

所以說，衝擊時產生於構築物中的應力的理論分析，在絕大程度上與水泥及混凝土的耐壓和抗張強度以及構築物的動壓硬性因素是相協調的。而水泥與混凝土的動壓硬性決定於已硬化之水泥和混凝土的結構情況。水泥的脆弱性同樣也決定於已硬化之水泥和混凝土的結構。