

污水下水道自淨設計之流量—坡度—管徑圖

駱尚廉、廖淳延

國立台灣大學環境工程學研究所

摘 要

污水下水道採用單一自淨流速之規範，並不能滿足所有污水下水道流況之自淨要求，本文比較探討各自淨流速之設計理論，評估採用新設計規範之必要性。若欲於下水道管渠之設計過程中，引用各種新的設計觀念，可將設計方程式建立於現行之下水道設計試算表中，另外亦可直接由下水道流量—坡度—管徑設計圖表，查得所需管徑及坡度，避免繁雜之計算過程。

關鍵詞：污水下水道、自淨規範、自淨流速、剪應力

一、前 言

傳統之污水下水道維持自淨的策略大致上分成三類，第一類在下水道中提供某一特定大小之自淨流速以維持污水管道之暢通；第二類是容許下水道中沉積物之存在，再以定期沖洗的方式去除之；第三類則是屬於進口管制，設置除砂除油井，限制砂土與油脂進入下水道系統。上述三類方法中，以自淨流速設計較能兼顧經濟及有效兩方面之考量，為各國所樂用。

目前各國污水下水道之自淨規範，大致仍用單一自淨流速下限之設計方式，但 Nalluri and Dabrowski (1994) 表示，此一設計方式並不能滿足所有污水下水道流況之自淨要求，在小管徑下水道會有過度設計之情況發生，而在大管徑下水道卻有設計不足之虞。由此，正值國內準備積極展開污水下水道建設之際，實有必要就污水下水道自淨設計規範進行探討，以提出更合理及有效之設計方法，供下水道主管單位及時修正設計規範之參考。

二、文 獻 回 顧

1936 年 Shields 根據他本身及其他學者所進行有關單一粒徑材料之床載傳輸(bed-load movement)行為的實驗結果，指出水流中沉積物粒子沿管渠底部移動所需的臨界曳引力(critical tractive force)，大致與沉積物粒子之直徑與沒入水中之密度成正比。承續 Shields 之結論，Camp(1942)推導出帶動單一粒徑沉積物所須之管渠自淨流速公式，建立了摩擦係數、沉積物直徑及沒入密度與管渠自淨流速之間的函數關係。

1950 年代初期，美國 University of Iowa 的兩位學者 Craven 與 Ambrose 也針對管渠中沉積物的傳輸狀況進行研究。Craven(1953)以小型管渠(50mm 和 140mm 之圓管)及均勻粒徑的砂粒(直徑 0.25mm 至 1.62mm)於滿管流下進行實驗，求得在無沉積床(no deposition)狀態下給定水力坡降與最大沉積物質傳輸率的關係；另外 Craven 亦求得在移動床(mobile sediment bed)狀態下之沉積物傳輸函數。Ambrose(1953)則針對具移動床之不滿管流進行類似的實驗，指出此一流況的不穩定性。

Laurson(1956)歸納 Craven 與 Ambrose 之研究結果，認為在滿管流情況下結合摩擦方程式與沉積物傳輸方程式可以定義出管渠之水流容量及沉積物傳送能力。因此只要給定已知的水流量與沉積物通量，即可預測沉積床是否產生並求得其沉積床高度，此即近年研究結果之雛型。

Ackers(1978)延續 University of Iowa 之系列研究，結合 Ackers-White(1973)的沉積物傳輸公式與 Colebrook-White 的阻抗公式，推導平均流速、水力坡降、管渠直徑、管渠粗糙度、沉積物粒徑及濃度、沉積床粗糙度及水流深度之間的關係，得到與 Laursen 大至相同之結論，而且發現一般工程規範(例如單一自淨流速)在大管徑下水道之自淨設計上明顯不足。不過他也提出由於缺乏下水道現場調查之資料，故無法對此情形進一步確認之。

自 1973 年起，英國 University of Newcastle 的學者進行一系列有關下水道自淨能力的研究。Novak and Nalluri(1975)首先針對光滑之固定沉積床(smooth fixed bed)中沉積物之初始運動行為進行實驗，再於 1984 年引入沉積床粗糙度為變因，以因次分析的方式設計有關固定床之管流中無機物沉積物質運動行為的實驗³，指出現行之單一自淨流速規範在小管徑下水道（直徑 500mm 以下）中有過度設計之情形。

Nalluri and Alvarez(1992)引入沉積物之凝聚性(cohesion)及固定沉積床之粗糙度為實驗變因進行研究，將凝聚性添加物與砂粒混合以模擬凝聚性沉積物之黏滯行為，量測管流中之剪應力分布，再以無因次分析的方式比較凝聚性與非凝聚性沉積物存在於管渠中時，作用於管渠底部沉積床上之剪應力之經驗公式，並建議對於弱凝聚性沉積物而言，其剪力強度約 2.5N/m^2 。此處之沉積物剪力強度指欲使沉積物降伏(yielding)以達移除效果所需施加的剪應力。

Nalluri, Ghani, and El-Zaemey(1994)延續其系列研究結果，提出在沉積物為非凝聚性之條件下，渠道之最小無沉積流速計算方式，並進一步討論有限度沉積床(limit deposition)下管渠之水力行為，以及渠道形狀（圓型管及方型管）之影響。Nalluri and Dabrowski(1994)針對英國現行之下水管渠設計規範與剪應力準則、以及他們本身所提出之新設計準則進行比較，認為現行的單一自淨流速規範在小管徑（直徑小於 500mm 者）下水管渠中有過度設計之現象，但在大管徑（直徑大於 500mm 者）下水管渠中卻有設計不足之情形，並建議下水管渠在設計時應使相對水深(relative flow depth)維持在 0.5 以上以防止沉積情況產生。另外，他們也提出以更複雜的計算方式（考慮沉積物濃度、粒徑分佈等因素）取代單一自淨流速的規範。Nalluri and Ghani(1996)則總結 University of Newcastle 之系列研究結果，舉出對含非凝聚性沉積物之下水管渠之自淨流速計算公式，並建議在較大管徑之管渠中可允許有限之沉積存在，以降低設計坡度，達成設計之經濟性。

自 1975 年起，在 CIRIA(Construction Industry Research and Information Association)的資助下，一系列有關下水道自淨規範評估與更新的研究開始進行。May(1994)回顧前人研究結果和現行設計規範，並參考現有下水管渠現地調查的結果，認為現存之設計方式由於考慮的設計因子不足而有改進的空間。根據其實驗結果，下水管渠之自淨流速應與沉積物之物理性質、管渠大小、輸送之沉積物濃度等因子有關，且設計流速之決定可依對凝聚性沉積物之沖刷、有機物與微小粒子之懸浮傳輸、粗顆粒無機物質之床載傳輸等三種模式考慮之。

May et al. (1996)指出較大管徑若欲維持無沉積流況，所須之設計流速與埋設深度將過於龐大且不經濟，故建議容許一有限度之沉積床存在以降低設計流速，這項結論與 University of NewCastle 之建議類似。

Butler et al. (1996)承續上述之系列研究結果，對三種下水道設計概念之方程式型式、參數選擇、適用情況作較完整之說明，並列舉各種自淨流速設計曲線之計算過程。另外，Ashley(1995)也針對各種新的下水道設計方法進行回顧，並提出決定下水管渠設計流速之方式與建議流程。

三、污水下水道自淨能力之設計規範

現行污水下水道自淨設計多採用單一自淨流速之規範，亦有少數國家採用管壁平均剪力為基準者。以美國、英國及我國而言，其污水下水道自淨設計方式為維持一固定之最小設計流速（表 1），並規定一設計流速上限（通常取 3m/s）以避免管流對管壁之過度沖刷，另外對於下水管渠之最小管徑之限制，各國之規定大致類似，以「台北市下水道工程設施標準」為例，圓形污水管渠之最小管徑不得低於 200mm。

至於波蘭現行之下水道設計規範(Polish Code of Standards)則採流速限制及最低剪應力要求並行之方式，一方面規定特定流況時之

最低設計流速，一方面限制小管徑下水管渠坡度與管徑乘積之下限值（表 2），以保證小管徑下水管渠在滿流或半滿流時有 2.45N/m^2 以上之平均管壁剪應力作用，達到管渠自淨之效果。表 3 則為對污水下水管渠最低平均剪應力要求之建議值比較。

表 1 各國污水下水道最小流速規定及建議

來源/提出者	國家	最小流速 (m/sec)	下水管渠流況
ASCE(1970)	USA	0.6	滿管流
下水道工程設施標準	中華民國	0.6	計畫下水量
British Code of Practice(1987)	UK	0.75	1/3 計畫污水量
Polish Code of Standards	Poland	0.8	滿管流
Bielecki(1982)	Germany	1.5	滿管流

表 2 Polish Code of Standards 中對下水道最小鋪設斜率之規定

管渠直徑(mm)	最小鋪設斜率
200	5×10^{-3}
250	4×10^{-3}
300	3×10^{-3}
>1000，截流管渠	0.5×10^{-3} 至 1×10^{-3}

表 3 各國學者及 Polish Code of Standards 所建議之污水下水道平均剪應力規範比較

出處/提出者	國家	最小平均剪應力規定
Yao(1974)	USA	$1-2 \text{ N/m}^2$
Maguire	UK	6.2 N/m^2
Bischof (1976)	Germany	2.5 N/m^2
Polish Code of Standards	Poland	對直徑 300mm 以下之水管渠於半滿流時提供 2.45N/m^2 之平均剪應力

四、各種自淨設計理論

1. Camp 自淨流速理論

Camp(1942)根據 Shields(1936)的研究結果，指出帶動均勻粒徑沉積物所須之管渠自淨流速與管渠中沉積物之粒徑大小及沒入水中時之比重有關，(1)式為 Camp 所提出之自淨流速公式與曼寧公式合併所得之結果，式中假設下水道沉積物具均勻粒徑 d ，而 k 之建議值在污水下水道中為 0.8。

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \sqrt{k(G_s - 1)d} \quad (1)$$

2. 平均管壁剪應力準則

傳統之下水管渠設計習慣上依據單一最低流速來考慮管渠之自淨能力，此乃遷就設計上便利之結果。事實上在穩定流及管渠剪應力平均分布於管渠溼周的假設下，管渠之平均剪應力較之管渠平均流速更能反映自淨能力之優劣。(2)式為根據流體力平衡所導出之管壁平均剪應力計算公式，而欲求得達特定平均剪應力要求所需之管渠流速則可依(3)式計算之。

$$\tau_o = \gamma(A/P)s = \gamma R s \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\tau_o}{\gamma R} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \left(\frac{\tau_o}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Yao(1974)彙整前人有關管渠剪應力之實驗結果，建議污水下水道之平均管壁剪應力應達 $1-2\text{N/m}^2$ 。而 White(1940)、Lysne(1969)及 Replogle and Chow(1969)之研究結果證實管渠底部之局部剪應力大於管壁之平均剪應力，更為平均剪應力準則提供了一定程度之安全因子。

3. CIRIA 之設計理論

Butler et al. (1996a, b)整合 CIRIA 對下水道自淨設計規範改善方案之系列研究，針對四種下水道沉積物傳輸狀況提出不同的設計方程式。

若考慮下水道管流對管渠底部沉積床之沖刷(erosion)能力，可依(4)式計算作用於管渠底部之剪應力，進一步依(7)式求得特定沖刷剪應力要求下所需之管渠自淨流速。

$$\tau_b = \frac{\rho \lambda_b V^2}{8} \quad (4)$$

$$\lambda_b = \frac{1}{4(\log_{10}(\frac{K_b}{3.7D} + \frac{2.51\nu}{D\sqrt{2gDs}}))^2} \approx \frac{1}{4(\log_{10}(\frac{K_b}{3.7D}))^2} \quad (5)$$

$$K_b = 2.4D^{0.61}d_{50}^{0.39} \quad (6)$$

$$V = \sqrt{\frac{8\tau_b}{\rho\lambda_b}} \quad (7)$$

根據 CIRIA 之建議，下水道中對管渠底部之沖刷剪應力 τ_b 值不應低於 2N/m^2 ，方可達到掃除凝聚性物質(cohesive sediment)之自淨效果，防止下水管線中沉積物之累積。

對於下水管渠中直徑較小的沉積粒子，該設計理論認為應以懸浮之形式傳輸(suspended sediment transport)，為達到此一要求所需之管渠平均流速可依 Macke(1982)所提出之公式評估(參考(8)式)。

$$C_v = \frac{\lambda_c^3 V^5}{30.4(G_s - 1)W_s^{1.5} A} \quad (8)$$

$$\lambda_c = \frac{\lambda_o P_o + \lambda_b W_b}{P_o + W_b} \quad (9)$$

在下水道管線中完全沒有沉積床存在(no deposition)之要求下所需達到之最小平均流速可依(10)式之半理論公式計算求得：

$$C_v = 3.03 \times 10^{-2} \left(\frac{D^2}{A}\right) \left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{0.6} \left(1 - \frac{V_i}{V}\right) \left(\frac{V^2}{g(G_s - 1)D}\right)^{1.5} \quad (10)$$

$$V_i = 0.125 \sqrt{g(G_s - 1)d_{50}} \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{0.47} \quad (11)$$

依(10)式所推估之管渠設計流速通常偏高，在大管徑之下水道中甚至可能超過現有之下水道流速上限值 3m/sec，造成對管壁之侵蝕破壞，因之，CIRIA 建議允許某一定量之沉積物之床載方式(bed-load)傳輸以降低設計流速，達成經濟設計之目的。其設計流速之決定方式如(12)式所示：

$$C_v = \eta \left(\frac{W_b}{D} \right) \left(\frac{D^2}{A} \right) \left(\frac{\theta \lambda_g V^2}{8g(G_s - 1)D} \right) \quad (12)$$

五、參數變動對管渠所需自淨流速之影響

本研究首先參考國外文獻對下水管渠中沈積物參數特性之現地調查結果(Ashley & Crabtree, 1992; Verbanck, 1992; Xanthopoulos & Augustin, 1992; Butler, 1996a, b)及國內民生污水廠進流水資料，訂出污水下水管渠沉積物特性之典型值與變動範圍(表 4)，依此討論參數變動對管渠所需自淨流速之影響，並比較各設計理論與現行規範於典型參數值時之差異。

表 4 本研究所採用之污水下水道特性參數範圍

沉積物性質	典型值	討論範圍
G_s	1.2	1.2
$d_{50}(\mu m)$	50	10-150
$d_{90}(\mu m)$	300	100-500
$X(\text{mg/L})$	400	200-600
$C_v(\text{ppm})$	350	150-500

在對各設計理論進行參數變動分析後可以發現，下水道中沉積物之比重、濃度及管渠之直徑越大，設計流量越低或允許之沉積床越高，則管渠所需設計流速也越高，以上之結果大致符合常理之推斷，但管渠粗糙度及沉積物粒徑對管渠自淨流速之影響卻與一般之預期有所不同。粗糙度越大，所需自淨流速越低之情形，可以管渠粗糙程度有助於局部剪力及邊界紊流情形解釋之；然於沉積物粒徑

之影響中，依各文獻所建議之設計方程式計算所得之自淨流速，卻存在相當分歧的結果。

如表 5 所示，除 Yao 之平均剪應力理論未考慮沉積物粒徑之影響外，各設計理論依沉積物粒徑大小與自淨流速之關係可分為兩類：在第一類設計理論中沉積物粒徑之增加可降低管渠所需之自淨流速，屬於此類的有 University of NewCastle 之 clean pipe 理論與 CIRIA 之 erosion 理論及 no-deposition 理論，此三種設計理論之共同點在於以管流對管渠底部之沖刷能力作為設計考量，當沉積物平均粒徑增加時，管渠實際之粗糙度亦隨之提昇，有助於提高管渠底部之沖刷剪應力，故可降低自淨流速。

第二類包括 Camp 理論、University of NewCastle 之 loose deposite bed 理論、CIRIA 之 suspension 理論及 bed-load transport 理論，上述四種理論以管流對沉積物之床載或懸浮型式輸送能力作為設計考量，故沉積物顆粒越大，達到輸送要求之流速也越大，此趨勢與一般之預期吻合。

表 5 各設計理論中沉積物粒徑對管渠所需自淨流速之影響

設計根據	設計理論	沉積物粒徑之影響
考慮沖刷能力	Univ. of NewCastle clean pipe condition CIRIA erosion CIRIA no-deposition	平均粒徑之增加可降低所需之設計流速
考慮對沉積物之傳輸能力	Camp(1942) Univ. of NewCastle loose deposite bed CIRIA suspension CIRIA bed-load transport	粒徑越大，所需之設計流速越高
不考慮沉積物粒徑之影響	Yao (1974)	無影響

六、各設計理論與我國現行規範之差異

本研究在進行各設計理論間之比較時，皆以表 4 中所列之污水管渠設計參數典型值為計算之依據，而管渠流況則皆限定為滿流或半滿流，圖 1 表示滿流或半滿流條件下，各文獻所建議之污水下水道設計流速對管徑之變化關係。茲將各污水下水道設計理論間之差異說明如下：

1. Yao 之平均剪應力準則若取其建議之剪力上限值 2N/m^2 ，則較所有設計理論之建議嚴格，但由於 Yao 所提出之管壁平均剪應力準則並未考慮水中含沉積物時可提高管渠底端局部剪應力之現象，因此可能有高估自淨流速之虞。若將其平均剪應力放寬至其建議之下限 1N/m^2 ，則與現行之規範較接近，但依此理論評估現行之污水下水道設計規範，在管徑大於 1000mm 者有設計不足之情形。
2. CIRIA 所建議之沖刷剪應力(erosion) 論及 Camp 之自淨流速公式計算所得之流速限制皆未超過我國現行之污水下水道對最低流速之限制，但若以 CIRIA 建議之 Macke 懸浮傳輸(suspension) 理論評估我國現行規範，則後者在小管徑下水道中有過度設計的現象，而在大管徑下水道中則有設計不足之情形。因污水下水道中之沉積物質具凝聚性，故通常希望能以懸浮的方式傳輸之，以免沉積物質累積於管渠底部經壓密行為而轉變為剪力強度較高之沉積床，如此不但難以管渠之自淨流速去除，且可能阻塞下水管渠，使污水管線之水力性質變差。
3. Camp 所建議之自淨流速在所有的設計方式中最為寬鬆，遠低於我國現行之污水下水道設計規範之規定，唯其發展之年代較為久遠，考慮之因素較簡單且理論假設有不近合理之虞（假設所有沉積物相同之單一粒徑，而非考慮經粒徑分析後所得之平均粒徑），故其適用性可能不佳。

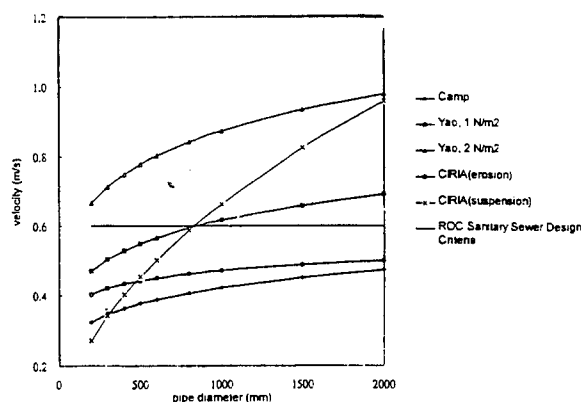


圖 1 在滿流或半滿流條件下各污水下水道設計流速之比較

七、Q-S-D 設計圖

現行之下水道管線設計方法為先預估兩人孔間下水管渠之設計下水量，再挑選管渠之管徑及坡度，依管渠之水力特性曲線關係計算管渠達設計下水量時之設計流速，若設計流速未達自淨流速下限，則調整管徑及坡度至符合要求為止。而新的設計理論考論的參數相當繁多，且計算亦複雜，又需考慮管渠中不滿流之水力性質變化如相對水深、溼周等對所需自淨流速之影響，會使設計之工作相形困難。

為使下水道設計者能避免繁雜的計算過程，直接地應用這些新設計理論進行設計工作（如圖 2 所示），特就本文中引用之所有設計理論，在所選擇之典型設計參數值之下，利用圓管之水力特性曲線關係轉換成流量—坡度—管徑設計圖表(Q-S-D Plot)，如圖 3—圖 7 所示。使用者只要挑選所欲引用之設計理論，利用已知之設計下水量及欲使用之管徑大小，即可在圖中得到所需之最小埋設坡度，中間不須要任何計算過程，唯 CIRIA 中 limit of deposition 之設計理論由於計算過程太過複雜，且實用性不佳，故其 Q-S-D Plot 亦未列於本文中。

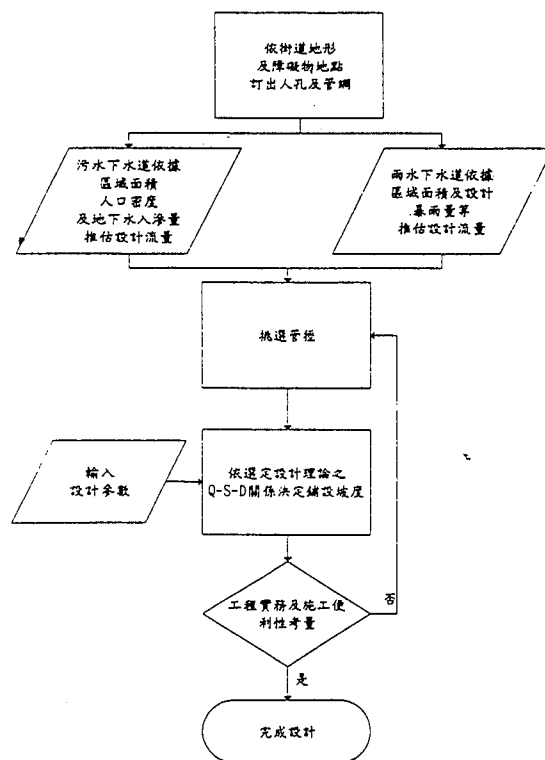


圖 2 修正設計方式後下水道設計流程

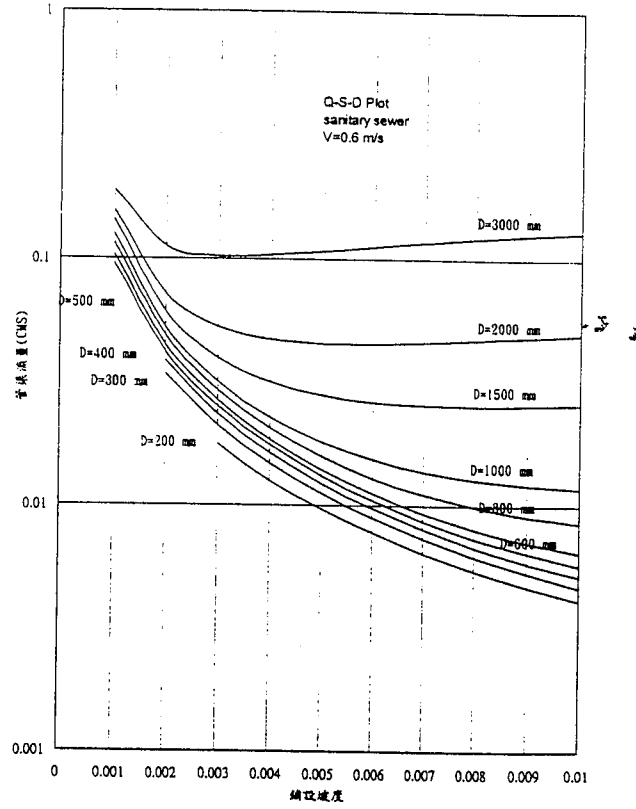


圖 3 依我國現行污水下水道設計規範所繪製之 Q-S-D-Plot

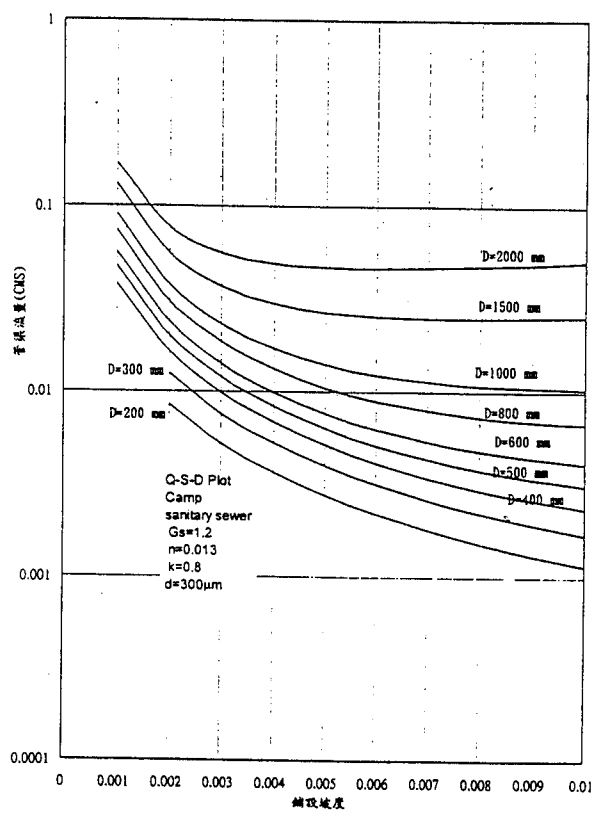


圖 4 依 Camp 氏設計理論所繪製之污水下水道 Q-S-D-Plot

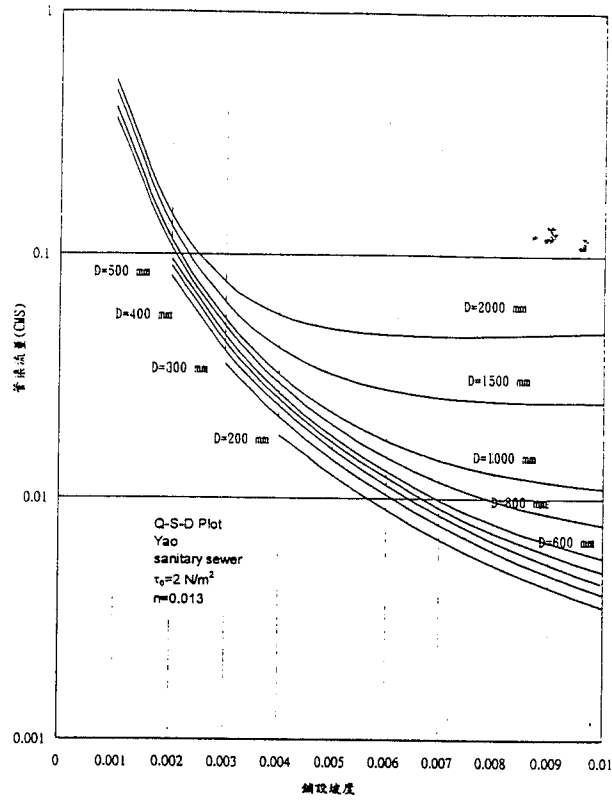


圖 5 依 Yao 氏設計理論所繪製之污水下水道 Q-S-D-Plot

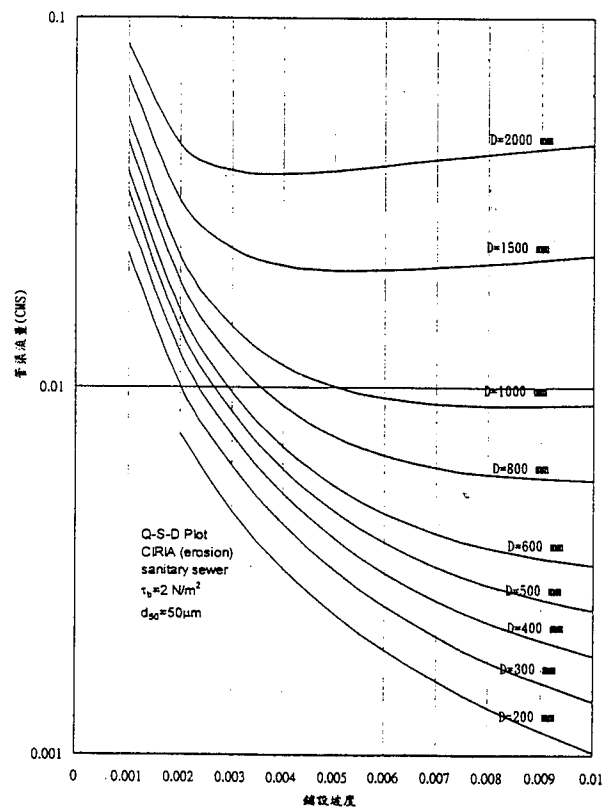


圖 6 依 CIRIA(erosion)設計理論所繪製之污水下水道 Q-S-D-Plot

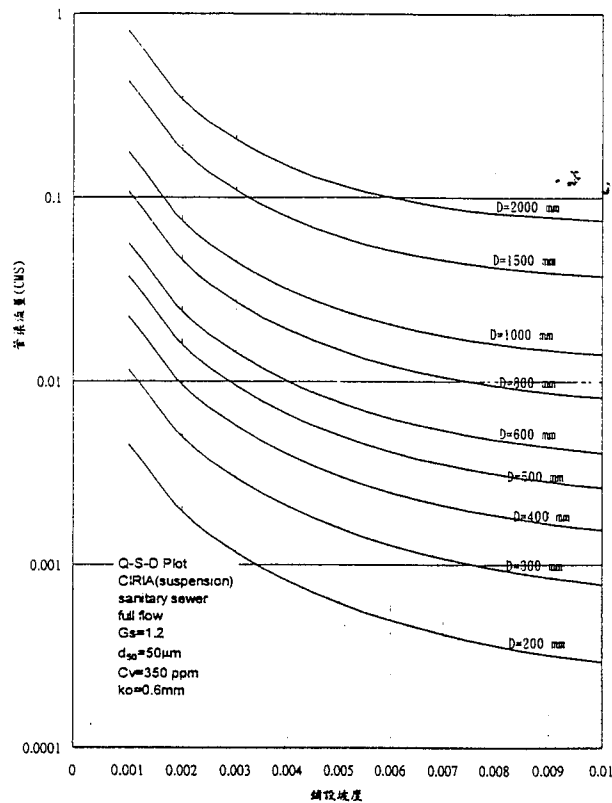


圖 7 依 CIRIA(suspension)設計理論所繪製之污水下水道 Q-S-D-Plot

八、結 論

1. 以文獻中所建議之設計理論評估我國現行污水下水道之自淨流速規範，發現其在小管徑時有過度設計之情形，在大管徑時卻有設計不足之現象。
2. 污水下水道中之沉積物具有凝聚性，若沉積於管渠底部，可能於低下水量時因壓密現象形成高剪力強度之沉積床，阻塞下水管渠，故污水下水道中之沉積物應以懸浮型式傳輸，並配合提供足夠之沖刷剪應力以達到完全自淨之效果，避免沉積情況產生。
3. 若欲於下水管渠之設計過程中，引用各種新的設計觀念，可將設計方程式建立於現行之下水道設計試算表中，另外亦可直接由下水道流量—坡度—管徑設計圖表，查得所需管徑及坡度，避免繁雜之計算過程。

符號說明

- A : cross-section area of pipe flow
 C_v : sediment volumetric concentration(non-dimensional)
D : sewer diameter
d : diameter of sediment particles
 d_{50} : mean diameter of sediment particles
 G_s : specific gravity
g : gravity acceleration
 K_o : pipe wall roughness
 K_b : roughness height of deposite bed
n : frictional coefficient of Manning equation
P : wetted perimeter
R : hydraulic radii
s : gradient of pipe
V : average velocity
 W_b : width of deposite bed
 W_s : falling velocity of sediments
X : sediment concentration in mg/L
y : depth of flow
 γ : unit weight of fluid
 η : transport efficiency parameter for a continuous bed
k : non-dimensional coefficient in Camp's formula
 λ_o : Darcy-Weisbach friction factor for clear water
 λ_b : Darcy-Weisbach friction factor for deposite bed
 λ_c : weighted friction factor in Macke equation
 λ_g : Darcy-Weisbach friction factor for grain shear
 λ_s : Darcy-Weisbach friction factor with sediments
 ν : kinematic viscosity of fluid
 θ : transition coefficient for the effect of particle Reynolds number
 ρ : density of fluid
 τ_o : average shear stress on wetted perimeter
 τ_b : local shear stress for bed erosion

參 考 文 獻

1. American Society of Civil Engineers/Water Pollution Control Federation, *Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers*, ASCE Manuals and Reprints on Engineering Practice, No. 37, (1969).
2. Ashley, R. M., and R. W. Crabtree, "Sediment Origins, Deposition and Build-up in Combined Sewer Systems," *Water Science and Technology*, Vol. 25, No. 8, pp.1-12, (1992).
3. Butler, D., R. W. P. May and J. C. Ackers, "Sediment Transport in Sewers Part 1:Background," *Proc. Instn Civ. Engrs Wat. Marit. & Energy*, Vol. 113, No. 2, pp.103-112, (1996a).
4. Butler, D., R. W. P. May and J. C. Ackers, "Sediment Transport in Sewers Part 2: Design," *Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit & Energy*, Vol. 118, pp.113-120, (1996b).
5. Lysne, D. K., "Hydraulic Design of Self-Cleansing Sewage Tunnels," *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, Vol. 95, No. SA1. Proc. Paper 6404, pp.17-36, (1969).
6. Macke, E., "About Sedimentation at Low Concentrations in Partly Filled Pipes," *Mitteilungen, Leichtwess-Institut für Wasserbau der Technischen, Universtat Braunschweig*, Helf 76, (1982).
7. Nalluri C., and W. Dabrowski, "Need for New Standard to Prevent Deposition in Wastewater Sewers," *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, No. 5, pp.1032-1042, (1994).
8. Nalluri, C. and A. Ab. Ghani, "Design Options for Self-Cleansing Storm Sewers," *Water Science and Technology*, Vol. 33, No. 9, pp.215-220, (1996).
9. Replogle, J. A. and V. T. Chow, "Tractive-Force Distribution in Open Channels," *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 92, No. HY2, Proc. Paper 4727, pp.169-191, (1969).

10. Verbanck, M., "Field Investigations on Sediment Occurrence and Behaviour in Brussels Combined Sewers," *Water Science and Technology*, Vol. 25, No. 8, pp.71-82, (1992).
11. Xanthopoulos, C. and A. Augustin, "Input and Characterization of Sediments in Urban Sewer Systems," *Water Science and Technology*, Vol. 25, No. 8, pp.21-28, (1992).
12. Yao, K. M., "Sewer Line Design Based on Critical Shear Stress," *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, Vol. 100, No. EE2, (1974).

14