

[1] はじめに

題名に掲げた「管水路」ということばは、断面形のいかんを問わず、水流が管断面全体を満たして流れ、自由水面をもたない場合を意味する。

管水路における流量、管径または損失水頭などの所要値算定のために用いられる平均流速公式あるいは摩擦損失係数算定公式には数多くのものが提唱されているが、そのうちでわが国で従来から広く用いられてきたのは *Hazen-Williams* 公式（以下 *H-W* 公式と略称する）と *Manning* 公式である。すなわち、管路延長がかなり長そうだと思う場合に対しては、摩擦損失以外の損失（以下 *minor losses* と称する）を無視して、計算上便利な指数型平均流速公式である *H-W* 公式をそのままの形で適用し、また *minor losses* が無視できないように思われる場合に対しては、摩擦損失係数（以下記号 f によって表わす）を管内壁面の粗さの程度を表わす粗度係数と管径との関数であるとし、流速には無関係であるとした *Manning* 公式によって f を求め、これと *minor losses* に対する諸損失係数を組合わせて計算を進めるのが通常のやり方であった。しかしながら、このようなやり方は、余りに計算の便利さに重きをおき過ぎており、当然のこととして、(1) *minor losses* を無視しうる限度及び(2) *H-W* 公式及び *Manning* 公式の適用範囲について十分な検討が加えられた上でなされるべきである。

よって本論文の目的は、(1) *minor losses* を無視しうる限度を検討すること、及び(2) 現在のところ最も合理的とされている *Colebrook-White* 公式（以下 *C-W* 公式と略称する）を基準にとって、*H-W* 公式と *Manning* 公式の適用範囲を明示することである。また(3) *H-W* 公式における流速係数 C 及び *Manning* 公式における粗度係数 n と *C-W* 公式における絶対粗度 e との関係を明らかにすることによって、*H-W* 及び *Manning* 両公式の信頼度を高めることを試みた。

[2] *Hazen-Williams* 公式、*Manning* 公式と *Colebrook-White* 公式の比較

H-W 公式及び *Manning* 公式は、指数型平均流速公式に属するものであって、その一般形は

$$V = c D^j I^k \quad \dots\dots\dots (1)$$

と書かれる。ここに、 V = 平均流速 [m/sec]、 c = 係数 [m^{1-j}/sec]、 D = 管径 [m]、 I = 動水勾配 [m/m]、 j 及び k = 指数 [無次元] である。(1) 式を

$$\text{Darcy-Weisbach 公式: } H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{または} \quad I = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(ここに L = 管長 [m]、 H = 摩擦損失水頭 [m]) と比較すると、摩擦損失係数 f の一般形として

$$f = 2gc^{-\frac{1}{k}} D^{1-\frac{j}{k}} V^{\frac{1}{k}-2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。ここに g = 重力加速度 [9.80 m/sec^2] である。

$$\text{H-W 公式: } V = 0.35464 C D^{0.63} I^{0.54} \quad \dots\dots\dots (4)$$

の場合には, $c = 0.35464C$, $j = 0.63$, $k = 0.54$ であって

$$f = 133.4 C^{-1.85} D^{-0.167} V^{-0.148} \quad \text{..... (5)}$$

$$\text{または } f = 133.4 C^{-1.85} (VD/\nu)^{-0.167} V^{0.0185} \nu^{-0.167} = 133.4 C^{-1.85} N_R^{-0.167} V^{0.0185} \nu^{-0.167} \quad \text{..... (6)}$$

となる。こゝに, C = 流速係数 [無次元], ν = 動粘性係数 [m^2/sec], N_R は Reynolds 数であって, $N_R = VD/\nu$ 。 $\nu = 1.141 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ (水温 15°C) とおけば, (6) 式は次のようになる。

$$f = 1311 C^{-1.85} N_R^{-0.167} V^{0.0185} \quad \text{..... (7)}$$

$$\text{Manning 公式: } V = \frac{1}{n} \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad \text{..... (8)}$$

の場合には, $c = (1/n) 4^{-\frac{2}{3}}$, $j = 2/3$, $k = 1/2$ であって

$$f = 124.5 n^2 D^{-\frac{1}{3}} = 124.5 (n D^{\frac{1}{3}})^2 \quad \text{..... (9)}$$

となる。こゝに, n = 粗度係数であって, 無次元と考えると単位の換算上都合がよい。

(6) 式から, $H-W$ 公式を用いると f はほぼ $N_R^{-0.167}$ に比例し, また (9) 式からは, Manning 公式を用いると f は V に無関係になることがわかる。 $V = 0.3 \sim 3 \text{ m/sec}$ とした (6) 式, (9) 式及び

$$\text{Colebrook-White 公式: } \frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{e}{D} + \frac{9.35}{N_R \sqrt{f}} \right) \quad \text{..... (10)}$$

を用いて f と N_R の関係を図示したのが図-1 であって, 一般的傾向として, $H-W$ 公式は相対粗度

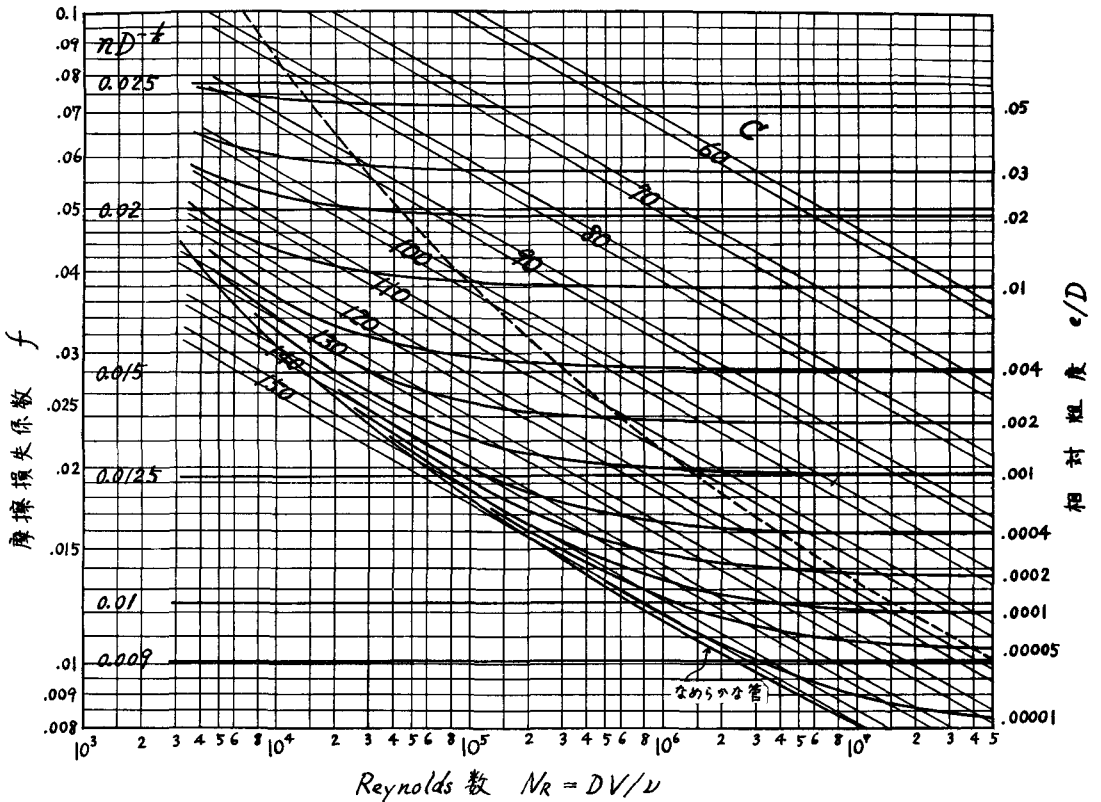


図-1 Hazen-Williams 公式, Manning 公式と Colebrook-White 公式の比較

e/D が比較的小なる大口径管に対して、また Manning 公式は N_k が大であるかまたは内壁面の粗な管に対して用いらるべきことがわかる。

今、表-1 のように管種が同一であり、内壁面状態の記述が同等と考えられるものを用いて、 $D=0.05 \sim 1.2\text{m}$, $V=0.3, 1, 3\text{ m/sec}$ の場合について以上の3公式によって求めた結果を表-2 に示す。通常の管水路水理計算においては、この程度の差異が生じていることになる。最終欄の f_{H-W}/f_{C-W} または f_M/f_{C-W} の値が1となりうるものを含む場合は $H-W$ 公式または Manning 公式を用いる限りこの程度の差異は避けられないものであり、1 となっていないものは C または n の値の選定が妥当でない

表-1 3公式比較のための C, n, e の値

管種	C, n, e の値	記述 (備考)
なめらかな管	$C=140 \sim 150$	黄銅, すい, 鉛, ガラス管
	$n=0.009 \sim 0.012$	なめらかな黄銅管及びガラス管
	$e=0 \sim 1.5 \times 10^{-6}\text{m}$	ガラス, 銅, すい, 鉛, 引抜黄銅管 工費的になめらか
コンクリート管 (極上)	$C=140$	(コンクリート管に対する最大値)
	$n=0.012$	(コンクリート管に対する最小値)
	$e=(15 \sim 8) \times 10^{-5}\text{m}$	きわめてなめらかな新しいコンクリート スチールフォーム使用, 継目平滑
鋳鉄管 (新)	$C=130$	鋳鉄管, 新
	$n=0.012 \sim 0.014$	塗布しない鋳鉄管, 新
	$e=(25 \sim 5) \times 10^{-4}\text{m}$	塗装しない鋳鉄管, 新
木 管	$C=120$	平滑な木管または木樋
	$n=0.010 \sim 0.014$	とい管, まめ板
	$e=(2 \sim 10) \times 10^{-4}\text{m}$	なめらかなかんな削り
鋳鉄管 (旧)	$C=100$	旧
	$n=0.014 \sim 0.018$	塗布しない鋳鉄管, 古
	$e=(1 \sim 1.5) \times 10^{-3}\text{m}$	古, さび発生
鋳鉄管 (きわめて古い)	$C=60 \sim 80$	きわめて古
	$n=0.018$	(鋳鉄管に対する最大値)
	$e=(2 \sim 5) \times 10^{-3}\text{m}$	はなはだしくさびコブ発生

表-2 Hazen-Williams 公式, Manning 公式と Colebrook-White 公式の比較

管種 壁面状態	管径 m	水温 ℃	$f_{H-W} \times 10^4$			$f_M \times 10^4$	$f_{C-W} \times 10^4$			f_{H-W}/f_{C-W}			f_M/f_{C-W}		
			$V =$ 0.3 m/sec	$V =$ 1 m/sec	$V =$ 3 m/sec	$V = 0.3$ ~ 3 m/sec	$V =$ 0.3 m/sec	$V =$ 1 m/sec	$V =$ 3 m/sec	$V = 0.3$	$V = 1$	$V = 3$	$V = 0.3$	$V = 1$	$V = 3$
なめらかな管	0.05	5 25	288 ~ 282	208 ~ 236	176 ~ 201	274 ~ 486	310 ~ 371 271 ~ 271	230 ~ 230 205 ~ 206	181 ~ 182 162 ~ 162	0.85 0.88	0.97 1.08	1.04 1.04	1.22 1.20	1.65 1.80	2.09 2.33
	0.1	5 25	221 ~ 251	185 ~ 210	157 ~ 199	217 ~ 386	260 ~ 260 229 ~ 229	177 ~ 177 176 ~ 177	157 ~ 158 142 ~ 143	0.91 1.03	1.00 1.12	1.07 1.18	1.16 1.32	1.53 1.71	1.91 2.12
	0.25	5 25	170 ~ 216	157 ~ 180	135 ~ 153	160 ~ 285	210 ~ 210 187 ~ 187	162 ~ 163 147 ~ 147	132 ~ 133 120 ~ 120	0.97 1.07	1.04 1.15	1.09 1.20	1.06 1.19	1.37 1.57	1.68 1.85
	0.5	5 25	169 ~ 192	141 ~ 161	120 ~ 137	127 ~ 226	181 ~ 181 162 ~ 162	142 ~ 142 130 ~ 130	110 ~ 110 110 ~ 110	1.00 1.11	1.06 1.16	1.10 1.17	0.98 1.10	1.24 1.26	1.50 1.55
	1.2	5 25	166 ~ 166	122 ~ 139	104 ~ 118	94.9 ~ 169	157 ~ 157 137 ~ 137	121 ~ 122 112 ~ 112	101 ~ 101 91.6 ~ 91.6	1.03 1.12	1.07 1.18	1.07 1.15	0.97 0.96	1.19 1.19	1.31 1.29
コンクリート管 極上	0.05	5 25	282	236	201	486	315 ~ 328 277 ~ 273	238 ~ 260 216 ~ 243	195 ~ 229 181 ~ 220	0.88 0.99	0.95 1.03	1.00 1.00	1.04 1.04	1.22 1.22	2.29 2.42
	0.1	5 25	251	210	179	386	263 ~ 272 233 ~ 245	203 ~ 219 184 ~ 204	163 ~ 193 155 ~ 186	0.94 1.05	1.00 1.08	0.99 1.03	1.04 1.05	1.22 1.22	2.14 2.26
	0.25	5 25	216	180	153	285	212 ~ 218 190 ~ 198	167 ~ 179 152 ~ 167	140 ~ 158 131 ~ 152	1.00 1.11	1.03 1.13	1.03 1.08	1.33 1.07	1.65 1.20	1.91 2.01
	0.5	5 25	192	161	137	226	182 ~ 187 162 ~ 170	146 ~ 154 134 ~ 145	123 ~ 133 113 ~ 114	1.04 1.15	1.07 1.15	1.04 1.10	1.22 1.10	1.51 1.25	1.95 1.73
	1.2	5 25	166	139	118	169	152 ~ 163 142 ~ 143	128 ~ 133 118 ~ 118	113 ~ 113 111 ~ 111	1.08 1.17	1.05 1.15	1.06 1.12	1.05 1.20	1.33 1.23	1.52 1.57
鋳鉄管 新	0.05	5 25	323	271	230	486 ~ 662	377 ~ 432 351 ~ 412	318 ~ 394 320 ~ 389	113 ~ 325 307 ~ 322	0.75 0.80	0.75 0.76	0.66 0.66	1.42 1.70	1.58 1.62	1.66 1.66
	0.1	5 25	288	241	205	386 ~ 516	307 ~ 345 297 ~ 329	270 ~ 317 262 ~ 312	254 ~ 308 253 ~ 306	0.88 0.88	0.82 0.84	0.73 0.73	1.60 1.62	1.55 1.57	1.62 1.62
	0.25	5 25	247	207	176	285 ~ 379	263 ~ 265 226 ~ 274	213 ~ 245 207 ~ 240	202 ~ 238 200 ~ 236	0.97 1.03	0.90 0.93	0.80 0.81	1.32 1.40	1.47 1.50	1.54 1.54
	0.5	5 25	220	184	157	226 ~ 307	204 ~ 222 191 ~ 213	181 ~ 205 176 ~ 202	192 ~ 199 179 ~ 193	0.97 1.07	1.03 0.97	0.85 0.87	1.25 1.32	1.38 1.41	1.44 1.44
	1.2	5 25	190	159	135	169 ~ 230	168 ~ 181 153 ~ 163	145 ~ 169 143 ~ 161	143 ~ 163 141 ~ 162	1.07 1.15	1.06 1.07	0.89 0.89	1.26 1.21	1.33 1.32	1.52 1.38
木 管	0.05	5 25	375	314	267	338 ~ 662	365 ~ 522 337 ~ 508	314 ~ 479 303 ~ 493	275 ~ 487 276 ~ 487	0.85 0.87	0.77 0.77	0.66 0.67	1.13 1.18	1.23 1.26	1.22 1.27
	0.1	5 25	334	280	238	268 ~ 526	298 ~ 407 297 ~ 376	259 ~ 388 249 ~ 384	243 ~ 382 237 ~ 330	0.95 0.99	0.87 0.88	0.76 0.77	1.13 1.18	1.23 1.25	1.27 1.28
	0.25	5 25	287	240	204	198 ~ 379	235 ~ 305 219 ~ 277	205 ~ 271 188 ~ 239	193 ~ 266 170 ~ 225	1.06 1.11	0.97 0.97	0.85 0.86	1.18 1.23	1.22 1.20	1.28 1.23
	0.5	5 25	255	214	182	157 ~ 307	219 ~ 251 186 ~ 245	175 ~ 240 157 ~ 217	165 ~ 236 162 ~ 215	1.03 1.08	0.97 0.95	0.81 0.82	1.03 1.08	1.22 1.26	1.47 1.48
	1.2	5 25	221	185	157	117 ~ 230	165 ~ 201 152 ~ 196	146 ~ 179 131 ~ 181	137 ~ 189 126 ~ 187	1.21 1.26	1.09 1.12	0.86 0.87	0.75 0.79	1.03 1.05	1.06 1.07
鋳鉄管 旧	0.05	5 25	525	440	374	662 ~ 1100	522 ~ 601 508 ~ 588	437 ~ 520 493 ~ 576	544 ~ 594 572 ~ 648	0.93 0.82	0.82 0.71	0.70 0.61	1.57 1.61	1.63 1.65	1.66 1.66
	0.1	5 25	468	392	333	526 ~ 869	407 ~ 459 376 ~ 450	388 ~ 444 384 ~ 440	439 ~ 438 438 ~ 438	1.08 1.11	0.94 0.95	0.81 0.81	1.61 1.70	1.68 1.70	1.70 1.71
	0.25	5 25	402	336	286	387 ~ 680	305 ~ 377 277 ~ 321	271 ~ 326 284 ~ 328	286 ~ 322 285 ~ 322	1.25 1.28	1.07 1.10	0.94 0.94	1.60 1.64	1.66 1.67	1.67 1.67
	0.5	5 25	358	299	255	307 ~ 508	255 ~ 275 242 ~ 265	240 ~ 266 237 ~ 263	236 ~ 263 262 ~ 313	1.18 1.17	1.02 1.03	0.85 0.87	1.57 1.61	1.63 1.63	1.63 1.64
	1.2	5 25	309	259	220	230 ~ 379	207 ~ 219 196 ~ 214	192 ~ 211 190 ~ 207	208 ~ 207 208 ~ 207	1.07 1.11	0.91 0.91	0.81 0.81	1.67 1.67	1.67 1.67	1.67 1.67
鋳鉄管 きわめて古い	0.05	5 25	774 ~ 1350	669 ~ 1130	564 ~ 941	1100	671 ~ 1030 661 ~ 1020	653 ~ 1020 651 ~ 1020	648 ~ 1020 648 ~ 1020	1.26 1.27	1.07 1.07	0.91 0.91	1.37 1.31	1.32 1.32	1.32 1.32
	0.1	5 25	707 ~ 1200	592 ~ 1010	503 ~ 856	869	505 ~ 726 497 ~ 721	491 ~ 716 488 ~ 716	715 ~ 715 715 ~ 715	1.55 1.33	1.32 1.13	1.13 1.13	1.61 1.63	1.64 1.64	1.65 1.65
	0.25	5 25	607 ~ 1030	508 ~ 865	432 ~ 735	640	315 ~ 494 360 ~ 471	356 ~ 488 354 ~ 472	353 ~ 447 352 ~ 447	1.91 1.97	1.75 1.75	1.57 1.57	1.59 1.60	1.52 1.52	1.52 1.52
	0.5	5 25	541 ~ 921	452 ~ 770	385 ~ 655	508	275 ~ 385 280 ~ 382	287 ~ 380 286 ~ 380	379 ~ 379 379 ~ 379	2.15 2.18	1.83 1.83	1.57 1.57	1.59 1.61	1.52 1.53	1.53 1.53
	1.2	5 25	467 ~ 776	371 ~ 666	332 ~ 566	379	232 ~ 256 222 ~ 256	228 ~ 256 224 ~ 256	228 ~ 256 228 ~ 256	2.41 2.41	1.65 1.65	1.57 1.57	1.64 1.64	1.64 1.64	1.64 1.64

f_{H-W}/f_{C-W} または f_M/f_{C-W}

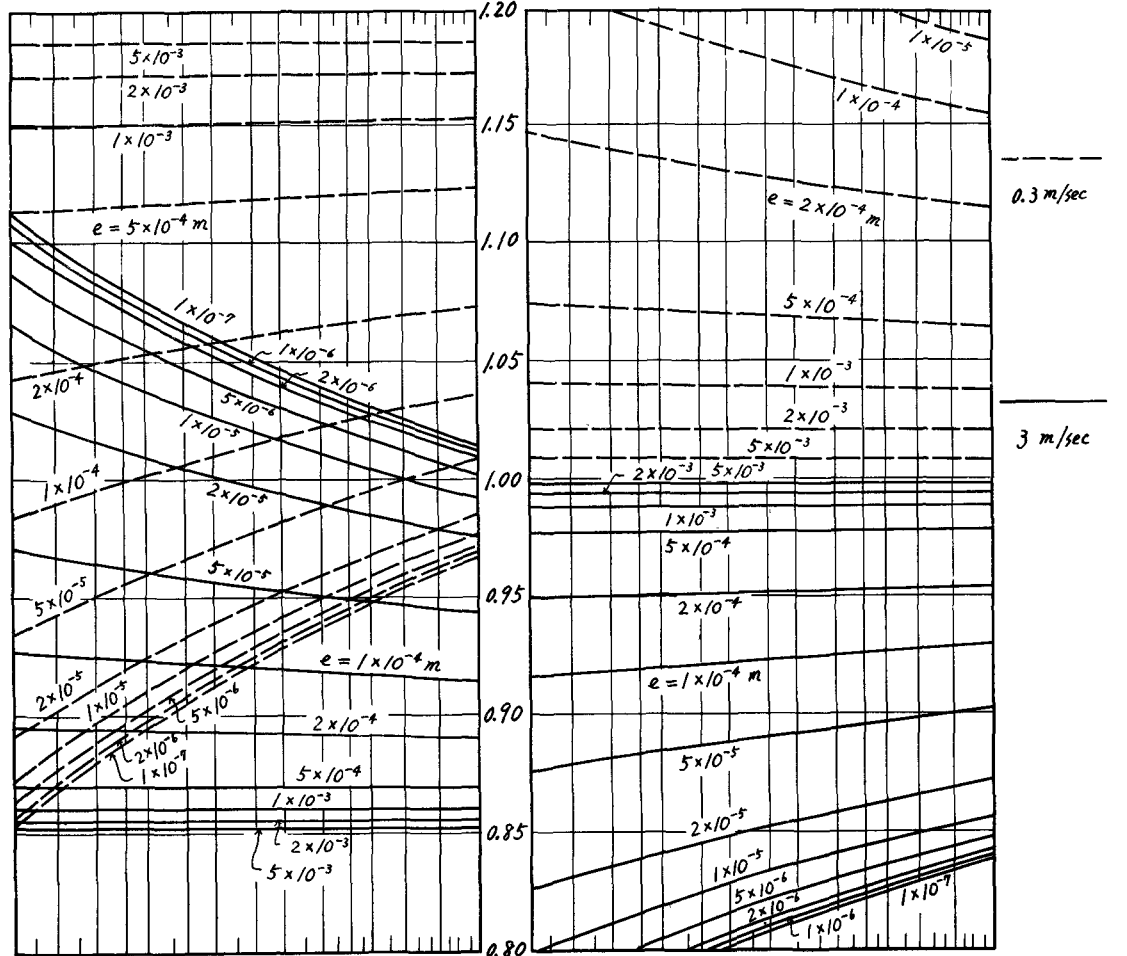


図-2 Hazen-Williams 公式, Manning 公式と Colebrook-White 公式との差異

いことを示している。また同時に、水温の影響についても知ることができる。

[3] Hazen-Williams 公式及び Manning 公式の適用範囲

摩擦損失水頭を求める問題では、 $H-W$ 公式の C または Manning 公式の n の値に固執することなく、次章で述べるように、絶対粗度 e の値に対応する C または n の値を求めれば、 $C-W$ 公式の結果と全く同じ結果を得ることができる。一方、流量や管径を求める問題では、流速が未知であるから、 $H-W$ 公式または Manning 公式と $C-W$ 公式のもたらす結果は異なるのが常である。図-1 から、 $H-W$ 及び Manning 公式の適用範囲についての一般的傾向がつかめるが、もっと詳細にその適用範囲を論じるには、管径及び水温が与えられた場合に問題となる N_R の 1 オーダー程度の変域について検討を加えなければならない。

管内流速は通常 $0.3 \sim 3 \text{ m/sec}$ の範囲にとられるから、今、基準値として $V = 1 \text{ m/sec}$ なる値を選んで、 $H-W$ 及び Manning 公式の適用範囲について検討しよう。水温を 15°C として、管径及び絶対粗度 e が与えられた場合について、 $V = 1 \text{ m/sec}$ において $H-W$ 公式または Manning 公式が $C-$

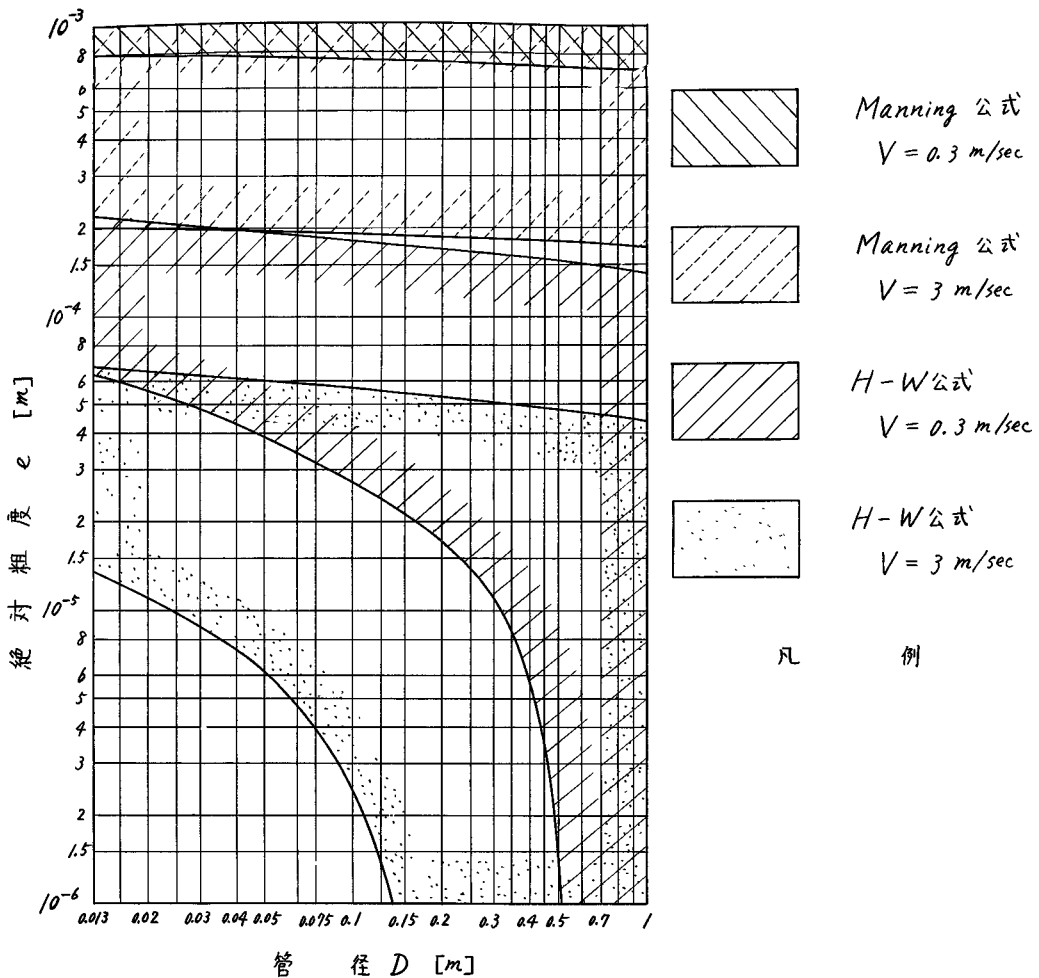


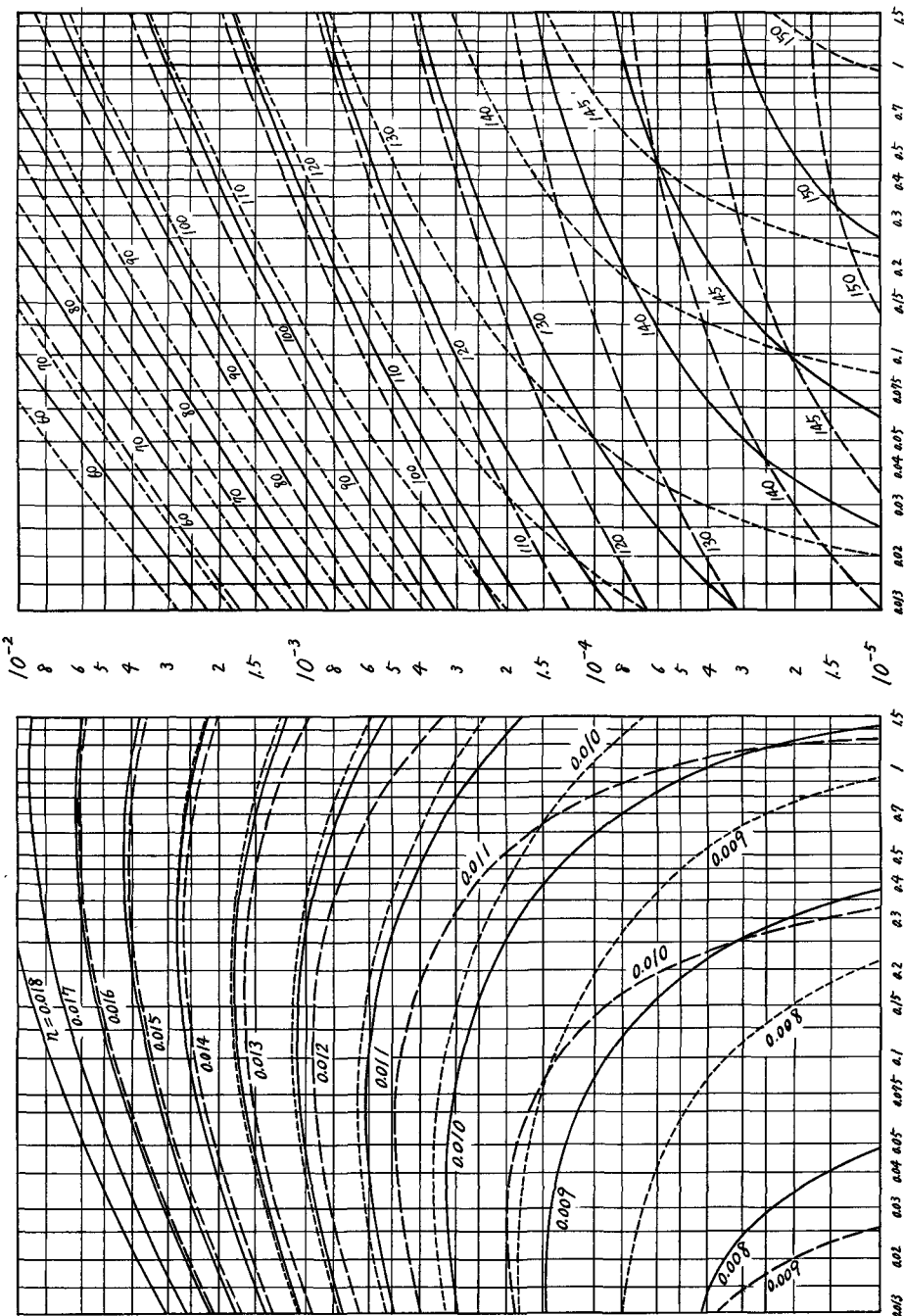
図-3 Hazen-Williams 公式及び Manning 公式の適用範囲

W 公式と同一の f 値をもたらすような C または n の値を算定し、その C または n の値を用いて $V = 3$ 及び $V = 0.3 \text{ m/sec}$ における f 値を求め、そのとき $C-W$ 公式によって得られる f 値と比較したものが、図-2 に示されている。この図から、 $H-W$ 及び $Manning$ 公式に対するおおよその適用範囲が見出されよう。 $H-W$ 公式の場合には、 C の値の選定さえ誤らなければ、全管種、全管径に対して $C-W$ 公式との差異を $\pm 20\%$ 以内におさえられることがわかる。また $Manning$ 公式の場合は、なめらかな管になるほど $C-W$ 公式との差異が大となること、管径の相違による影響は非常に小さいことが明らかである。一方、 $C-W$ 公式との差異の限界を $\pm 5\%$ にとってみると図-3 のようになり、 $e \approx 0.0001 \text{ m}$ が $H-W$ 公式と $Manning$ 公式との使用境界になることがわかる。また $H-W$ 公式は内壁面の比較的なめらかな小口径管には適さないことも明らかである。

[4] 流速係数 C 及び粗度係数 n と絶対粗度 e の関係

流速係数 C 及び粗度係数 n を絶対粗度 e に関係づけることは、(1) 3 章で示した $H-W$ 公式及び $Manning$ 公式の適用範囲の正しい把握のために、また (2) C または n の値の選定による差異をまねがれ、 $H-W$ 及び $Manning$ 両公式の信頼度を高めるために不可欠なことである。

絶対粗度 e [m]



管径 D [m]

管径 D [m]

(1) e と n の関係

(2) e と C の関係

図-4 e と C , n との関係

水温 15°C ($\nu = 1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$) として, (5) 式を (10) 式に, (6) 式を (10) 式に代入して絶対粗度 e について整理すると, 以下の式を得る

$$e = D \left(10^{0.57 - 0.0435C^{0.925926}} D^{0.083333} \nu^{0.074074} - 9.228 \times 10^{-7} C^{0.925926} D^{-0.916667} \nu^{-0.925926} \right) \quad \text{----- (11)}$$

$$e = D \left(10^{0.57 - \frac{D^{1/6}}{22.34n}} - \frac{9.466 \times 10^{-7}}{n D^{3/8} \nu} \right) \quad \text{----- (12)}$$

表-3 管路の絶対粗度 e の値

管の種類	壁面の状態	$e \times 10^3 [m]$
ガラス管	工業的になめらか	$0 \sim 0.0015$
銅管	"	"
鉛管	"	"
引板黄銅管	"	"
鉛管	"	"
塩化ビニル管	"	"
全溶接鋼管	新しい平滑な管, 遠心力塗装	$0.01 \sim 0.06$
	ペイントまたはアスファルト熱間塗装	$0.06 \sim 0.15$
	新, 塗装せぬ	0.1
	軽度のさび	$0.15 \sim 0.4$
	アスファルトやタールなどの厚いハケ塗り	$0.4 \sim 1.0$
	全面に $1 \sim 3 mm$ のさびコブ発生	$1.0 \sim 2.5$
	強度のさびコブ発生, 皮膜を生じている	$2.5 \sim 12$
横縫目 縦縫目 溶接鋼管 (縫目間隔 $5 \sim 9 m$)	新しい平滑な管, 遠心力塗装	
	横縫目ビョウ列数	1 $0.15 \sim 0.3$ 2 $0.3 \sim 0.45$ 3 $0.45 \sim 0.6$
	ペイントまたはアスファルト熱間塗装	
	横縫目ビョウ列数	1 $0.3 \sim 0.45$ 2 $0.45 \sim 0.6$ 3 $0.6 \sim 0.9$
	さびが発生しているもの	$0.6 \sim 1.4$
	アスファルトやタールの厚いハケ塗り	
	横縫目ビョウ列数	1 $0.9 \sim 1.2$ 2 $1.2 \sim 1.5$ 3 $1.5 \sim 1.8$

管の種類	壁面の状態	$e \times 10^3 [m]$
鋼鉄管	全面的に $1 \sim 3 mm$ のさびコブ発生	$1.4 \sim 4.2$
	強度のさびコブ発生, 皮膜を生じている	$4 \sim 12$
	新, アスファルト塗装	$0.1 \sim 0.15$
	新, 塗装しない	$0.25 \sim 0.5$
	古, さび発生	$1 \sim 1.5$
	ほろぼだしくさびコブ発生	$2 \sim 5$
	さびがさびれ直後	0.5
鋼鉄管	ブラッシュかけ直後	1
	新	0.15
コンクリート管	さやめてなめらかな新しいコンクリート, スチールフォーム使用, 縫目平滑	$0.015 \sim 0.06$
	なめらかで新しい(またはかなり新しい)コンクリート, スチールフォーム使用, 表面気泡あり, 縫目平滑	$0.06 \sim 0.18$
	やや粗いコンクリート, 表面はコテ仕上げまたはハケ仕上げで良好, 縫目良好	$0.18 \sim 0.4$
	遠心力コンクリート管, 縫目良好	$0.15 \sim 0.45$
	粗面, 表面は浸食を受けた, 木製型枠くうあとの明瞭であったり, レイタンスが流出しているもの	$0.4 \sim 0.6$
	さやめて粗面, 粗い木製型枠で打ったもの, または悪いコンクリートの浸食を受けたもの, 縫目の目違いやひびきもの	$0.6 \sim 3.0$
	アスベスト	
セメント管	皮膜	$0 \sim 0.0015$
	皮膜せぬ	$0.025 \sim 0.1$
木管	なめらかな管を削り	$0.2 \sim 1$

となる。 $V = 0.3, 1, 3 m/sec$ の場合について, D, e, C 及び D, e, n の関係を示したのが, 図-4 であって, この図から, 予想されるまたは与えられた D, V に対し, e に対応する C または n の値を求めることができる。なお水理公式集¹⁾, 水力機械工学便覧²⁾ 及び *Water Treatment Handbook*³⁾ に掲げられている絶対粗度 e の値と表-3 にまとめてある。

[5] 摩擦損失以外の損失の無視

“minor losses” と総称されている摩擦損失以外の諸損失が無視できるときならば, 損失水頭, 流量または管径を求める問題において, それぞれ *Moody* 線図⁴⁾, *Rouse* の線図⁵⁾ または着者の線図⁶⁾ を用いて, (2) 式における f 値を直接見出すことができ, また $H-W$ 公式または *Manning* 公式の適用範囲内にあれば, 上記3つのいずれの場合にも (4) 式または (8) 式を直接適用することになるので, 計算は非常に簡単化される。

従来言われてきたことは, 管水路水理計算の基本式:

$$H = \left(f \frac{L}{D} + \sum f_k \right) \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (13)$$

において, *minor losses* を生ずる部分間の距離が管径の 1000 倍以上の場合には, それらの損失に対する係数の和 $\sum f_k$ を, その名の示すとおり, $f \frac{L}{D}$ に比して “minor” であるとして無視してかまわない, ということがあった。この基準は, (13) 式における $\left(f \frac{L}{D} + \sum f_k \right)$ なる部分について, $f = 0.03, \sum f_k = 1.5$, よって $L/D \geq 1000$ ならば, $\frac{\sum f_k}{f \frac{L}{D} + \sum f_k} \leq \frac{1.5}{30 + 1.5} < 5\%$ であるとして導かれたものであろう。しかしながら, f の値は図-1 に見られるように, N_R と e/D に関係するものであるから, より厳密な基準を導くには, やはり $C-W$ 公式によるねばならない。

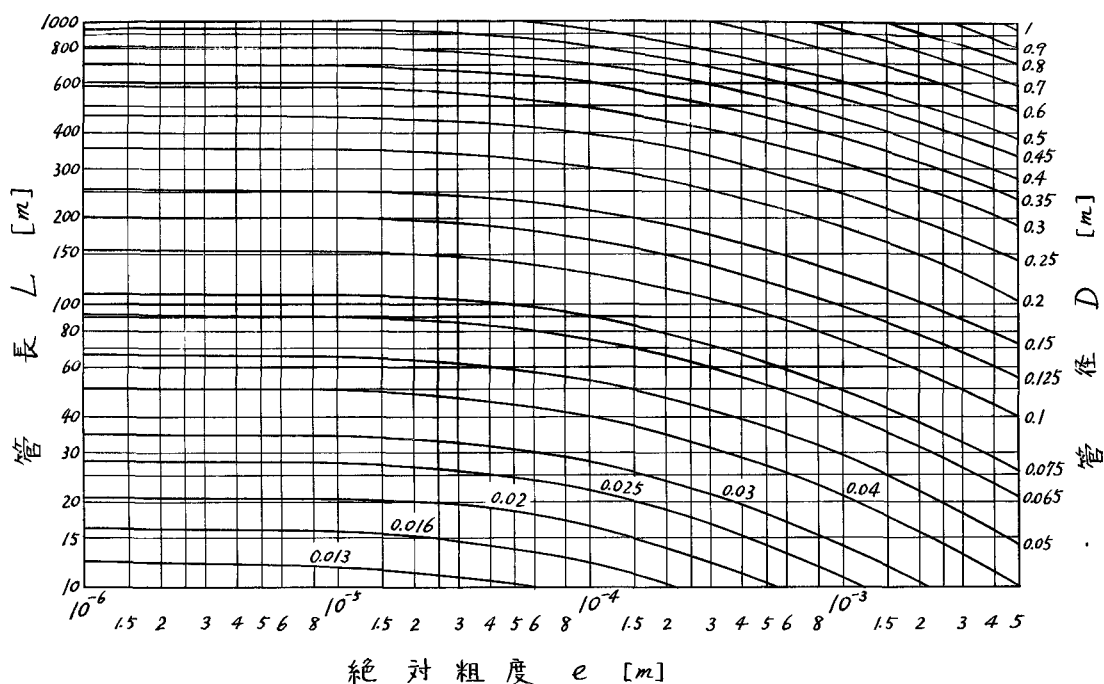


図-5 minor lossesを無視しうるかを判定するための図

今, minor lossesが無視せしめるかを判定するための一応の目安を与えるための図を作成してみよう。標準値として, (1) $\Sigma f_R = 1.5$ (流出損失係数を1~1.1, その他の損失係数の総和を0.5~0.4とする), (2) $V = 1 \text{ m/sec}$, (3) 水温 15°C , (4) minor lossesを無視したことによって生ずる誤差の限度=5%なる値を与えた場合について考える。(10)式より

$$\frac{\sqrt{\frac{L}{D}}}{\sqrt{f \frac{L}{D}}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{e}{D} + \frac{9.35 \sqrt{\frac{L}{D}}}{N_R \sqrt{f \frac{L}{D}}} \right) \quad \text{----- (14)}$$

こゝで, $\Sigma f_R / (f \frac{L}{D} + \Sigma f_R) = 0.05$ であり, $\Sigma f_R = 1.5$ なることによつて, $f \frac{L}{D} = 28.50$ となる。また $N_R = DV/\nu = D/1.14 \times 10^{-6}$ となるから, こゝらを(14)式に代入整理すると

$$\frac{\sqrt{L}}{5.385 \sqrt{D}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{e}{D} + \frac{1.981 \times 10^{-6} \sqrt{L}}{D \sqrt{D}} \right) \quad \text{----- (15)}$$

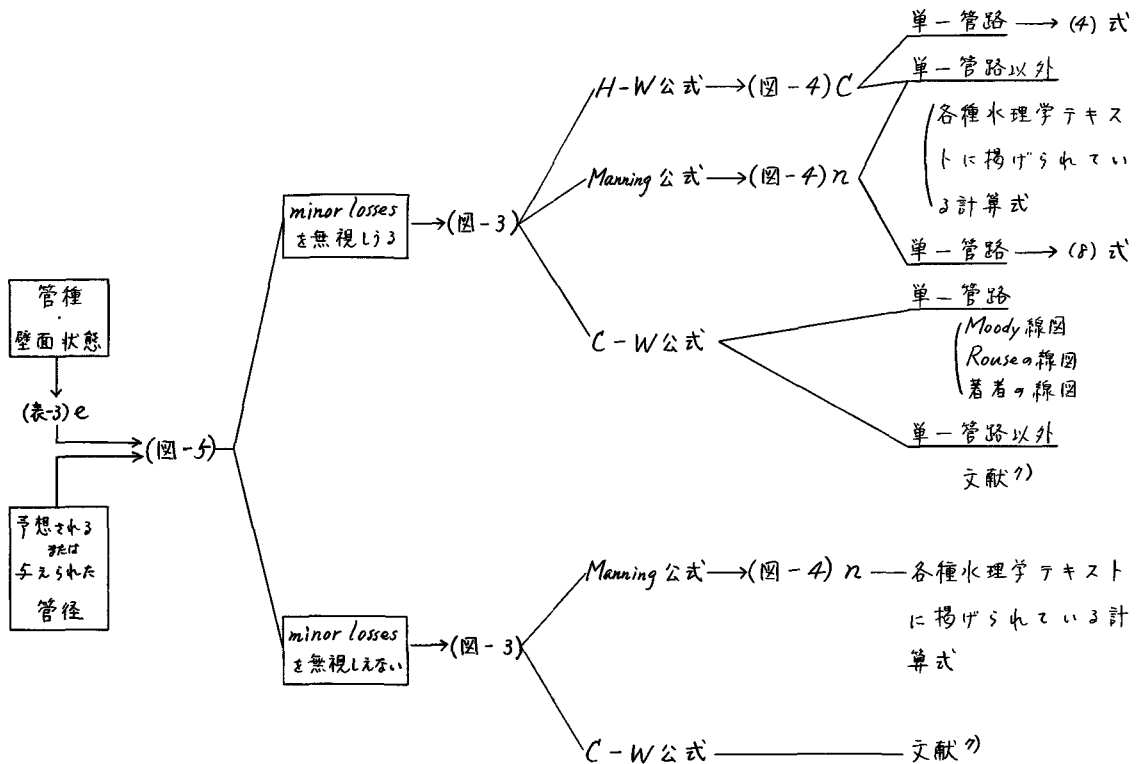
となる。(15)式を線図化したのが, 図-5であつて; 図中の曲線よりも上方に位置する点に対しては minor losses を無視しても差しつかえない。なお, 流速, minor lossesに対する係数の値及び水温が, 図作成のために与えられた標準値に比して著しく異なる場合については, C-W公式に立ちもどつて検定し直す必要はないのはもうろんである。

[6] 管水路水理計算手順——総括

以上, Colebrook-White 公式を基準にとつて, (1) Hazen-Williams 公式及び Manning 公式の適用範囲の検討, (2) 両公式の信頼度を高めるための C または n 値の絶対粗度 e へゝ関係づけ, 及び

(3) *minor losses* を無視しうるか否かの判定について述べた。

管水路水理計算において、与えられた管種と管内壁面状態及び予想されるまたは与えられた管径から出発し、個々の計算を始めるまでの手順を、以上で用いたような基準値または標準値のあてはまる場合について示せば次表のようになる。



なお *Colebrook-White* 公式によって求めた f を用いて、損失水頭、流量及び管径を求めるための計算手順及び計算図表については、文献⁷⁾に詳細に示してあるので参照されたい。

[参考文献]

- 1) 「水理公式集」 p. 145, 昭和38年増補改訂版, 土木学会 (1963)。
- 2) 「水力機械工学便覧」 p. 171, 水力機械工学便覧編集委員会, コロナ社 (1957)。
- 3) "Water Treatment Handbook" p. 448, Degremont ACFI S.A. (1960)。
- 4) Moody, L. F., "Friction Factors for Pipe Flow." Trans. Am. Soc. of Mechn. Eng., Nov. (1944)。
- 5) Rouse, Hunter, "Engineering Hydraulics." p. 405, John Wiley & Sons, Inc., New York (1950)。
- 6) 高桑哲男『*Colebrook-White* 公式による管水路の水理計算』第21回土木学会年次学術講演会講演概要集 (1966)。
- 7) 高桑哲男『管水路水理計算手順とその計算図表』昭和41年10月発行「衛生工学」第13号掲載, 北海道大学工学部衛生工学科 (1966)。