

CHẾ ĐỘ THUY LỰC CỦA DÒNG CHẢY TRONG CỐNG

(HYDRAULICS OF HIGHWAY CULVERT FLOW)

Th.S. NGUYỄN ĐĂNG PHÓNG

Bộ môn Thủy lực Thủy văn – khoa Công trình

Trường Đại học Giao thông Vận tải

Tóm tắt: Bài báo đề cập đến vấn đề chế độ thủy lực của dòng chảy trong cống thoát nước ngang đường giao thông. Đồng thời, đưa ra trình tự tính toán thủy lực cống.

Summary: The article reports provided a comprehensive analysis of highway culvert hydraulics under various flow conditions and the step of the culvert design.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ.

Cống là công trình nhân tạo trên đường được sử dụng rộng rãi nhất để vượt qua dòng nước nhỏ. Để giảm giá thành xây dựng cống thì một trong các biện pháp quan trọng nhất đó là thiết kế đúng điều kiện làm việc của cống. Việc thiết kế thủy lực cống ở các đơn vị tư vấn giao thông hiện nay nói chung thường sử dụng hệ thống bảng tra (theo cách tính toán của Liên Xô cũ) hoặc các đồ thị thiết kế thủy lực cống (theo chỉ dẫn kỹ thuật thiết kế đường ô tô 22TCN – 273 – 2005). Các bảng tra hay đồ thị thiết kế là các công cụ giúp công tác thiết kế đơn giản đi rất nhiều, nhưng các công cụ đó chỉ thỏa mãn trong một số trường hợp nhất định; và cách thiết lập cũng như sơ đồ thủy lực của nó thường không được giới thiệu rõ ràng làm cho hiểu biết của người thiết kế thủy lực cống không được tường tận, có thể dẫn đến các sai lầm trong việc thiết kế. Trong bài báo này tác giả trình bày các sơ đồ dòng chảy trong cống, công thức tính toán là cơ sở của việc thiết lập các đồ thị thiết kế và trình tự cụ thể để tính thủy lực cống.

II. DÒNG CHẢY TRONG CỐNG.

2.1. Đặc tính của dòng chảy trong cống:

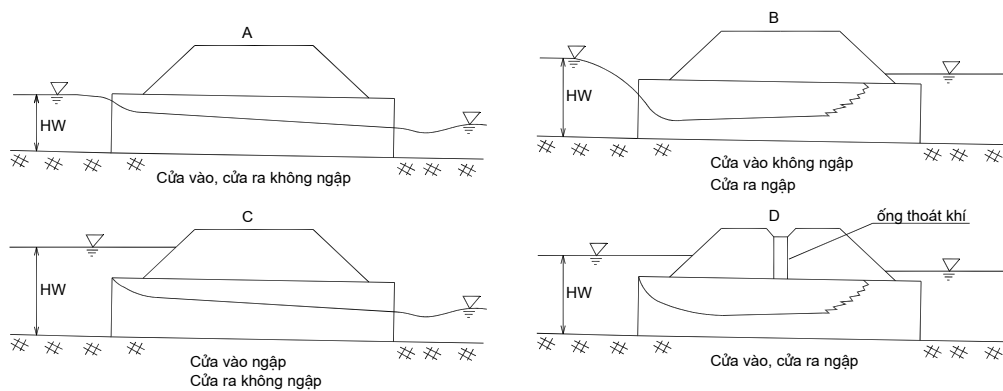
Cống là công trình tháo nước, được sử dụng rộng rãi trong các công trình thủy lợi, thủy nông, cũng như thoát nước ngang đường giao thông. Dòng chảy trong cống có các đặc điểm khác với các dòng chảy trong sông, suối tự nhiên, cũng như các lòng dẫn nhân tạo như:

- Sự tập trung của lưu lượng.
- Mạch động của dòng nước.
- Hàm khí trong dòng nước.
- Dòng nước chảy lệch khỏi phương chính của dòng chảy.

2.2. Các chế độ kiểm soát dòng chảy trong cống:

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến dòng chảy trong cống theo thời gian, nhưng tại một thời điểm cụ thể dòng chảy trong cống có thể bị chi phối bởi dòng chảy ở trước cống, cấu tạo của cửa vào cống (kiểm soát thượng lưu) hay bởi đặc tính của cống, dòng chảy hạ lưu (kiểm soát hạ lưu). Ở mỗi chế độ kiểm soát đặc tính dòng chảy cũng khác nhau, nhưng trước khi thiết kế ta không thể biết trước được chế độ kiểm soát. Vì vậy cần phải xem xét thiết kế với các chế độ sau đó lựa chọn chế độ có giá trị lớn làm chế độ tính toán tiếp.

2.2.1. Kiểm soát thượng lưu.



Hình 1: Chế độ kiểm soát thượng lưu.

Hình 1 mô tả một số dạng khác nhau về dòng chảy ở chế độ kiểm soát thượng lưu: - Hình 1-A mô tả trường hợp cửa vào và cửa ra của cống đều không ngập. Dòng chảy trong cống là dòng chảy xiết và cuối cống có độ sâu dòng chảy tiến đến độ sâu chảy đều. - Hình 1-B là trường hợp cửa vào không ngập nhưng cửa ra bị ngập; dòng chảy trong cống là dòng chảy xiết và cuối cống xuất hiện nước nhảy. - Hình 1-C là trường hợp điển hình của kiểm soát thượng lưu; cửa vào của cống bị ngập, cửa ra có dòng chảy tự do và dòng chảy trong cống vẫn là dòng chảy xiết, có độ sâu phân giới ở gần cửa vào và độ sâu chảy đều ở gần cửa ra. - Hình 1-D là một trường hợp đặc biệt, cả cửa vào và cửa ra của cống đều ngập, nhưng dòng chảy trong cống vẫn không đầy; trong trường hợp này, có nước nhảy ở cuối cống. ở giữa cống có dòng chảy không đầy và có lỗ thông hơi (Nếu không có lỗ thông hơi, áp suất trong cống sẽ giảm xuống dưới áp suất khí trời và dòng chảy trong cống sẽ không ổn định).

Yếu tố ảnh hưởng đến chế độ kiểm soát thượng lưu: là dòng chảy thượng lưu và cấu tạo cửa vào của cống. Độ dốc thân cống cũng ảnh hưởng đến chế độ kiểm soát thượng lưu nhưng không nhiều nên trong tính toán thường bỏ qua.

Chế độ thủy lực của kiểm soát thượng lưu: tùy vào mức độ ngập ở cửa vào của cống chế độ thủy lực cống được chia thành 3 khu vực: không ngập, ngập và khu vực quá độ. Trong trường hợp độ sâu thượng lưu nhỏ (hình 1-A, B) cống được coi như làm việc theo sơ đồ của đập tràn. Mối quan hệ giữa lưu lượng và độ sâu thượng lưu được tính toán theo mô hình của đập tràn. Trong trường hợp cửa vào bị ngập (hình 1-C, D) dòng chảy qua cống làm việc theo sơ đồ dòng chảy qua lỗ. Mối quan hệ giữa lưu lượng và độ sâu thượng lưu được xác định dựa vào kết quả thí nghiệm trên các mô hình tương ứng. Theo kết quả nghiên cứu của Cục Tiêu chuẩn Quốc gia (NBS) dưới sự đỡ đầu của Cục Đường bộ Liên bang Hoa kỳ (FHWA) đó đưa ra các công thức cho các trường hợp cửa vào không ngập và ngập như sau:

+ *Cửa vào không ngập:*

$$\text{Dạng 1:} \quad \frac{HW_i}{D} = \frac{H_C}{D} + K \left[\frac{1,811Q}{AD^{0,5}} \right]^M - 0,5S \quad (1)$$

$$\text{Dạng 2:} \quad \frac{HW_i}{D} = K \left[\frac{1,811Q}{AD^{0,5}} \right]^M \quad (2)$$

$$+ \text{ Cửa vào ngập: } \frac{HW_i}{D} = c \left[\frac{1,811Q}{AD^{0,5}} \right]^2 + Y - 0,5S \quad (3)$$

HW_i - độ sâu thượng lưu cống.

D - chiều cao cống.

$$H_C = d_C + \frac{V_C^2}{2g}$$

Q - lưu lượng.

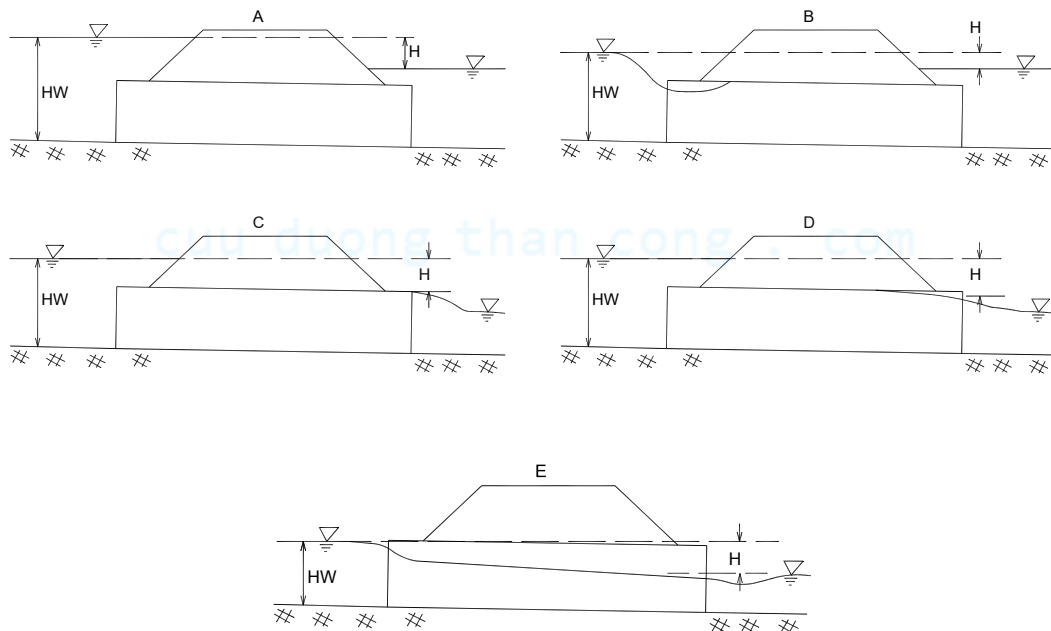
A - diện tích mặt cắt ngang toàn bộ cống.

S - độ dốc đáy cống.

K, M, c, Y - các hằng số phụ thuộc loại cống, vật liệu làm cống và cấu tạo cửa vào của cống.

Với cửa vào không ngập có hai dạng phương trình. Dạng 1 theo độ sâu phân giới toàn bộ với 2 hệ số điều chỉnh, dạng này phù hợp với quan điểm lý thuyết. Dạng 2 công thức dạng số mũ như công thức của đập tràn, dạng 2 dễ áp dụng trong tính toán, đây cũng là dạng phương trình được áp dụng để lập các toán đồ thiết kế.

2.2.2. Kiểm soát hạ lưu.



Hình 2: Chế độ kiểm soát hạ lưu.

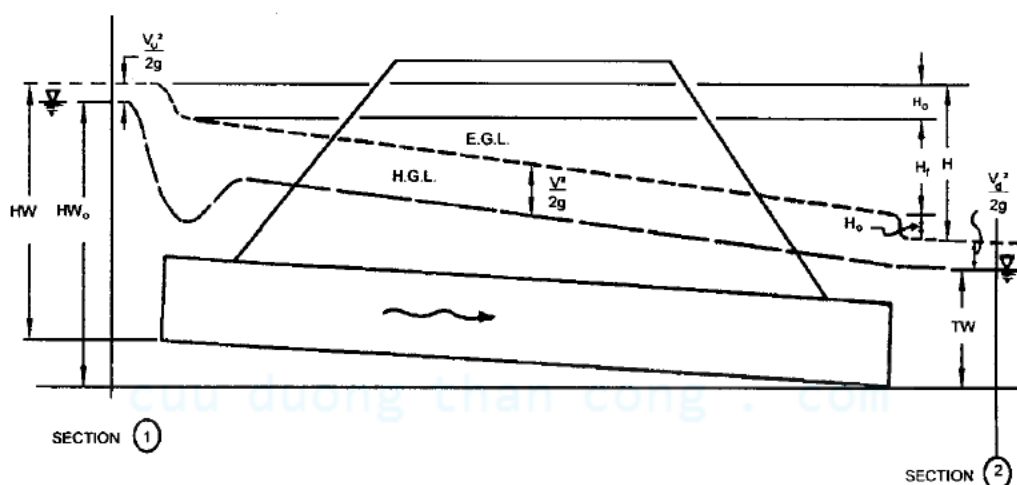
Hình 2 mô tả một số dạng khác nhau về dòng chảy ở chế độ kiểm soát hạ lưu. Trong tất cả các trường hợp mặt cắt kiểm soát ở cửa ra của cống hoặc ở hạ lưu cống. Với trường hợp dòng chảy không đầy cống, dòng chảy trong ống cống là dòng chảy êm. - Hình 2-A miêu tả dòng chảy đầy điển hình, với cửa vào và ra đều ngập; dòng chảy đầy ống trên suốt chiều dài cống. - Hình 2-B là trường hợp cửa ra ngập nhưng cửa vào không ngập. Với trường hợp này, dòng chảy thượng lưu nhỏ đến mức đỉnh cửa vào bị lộ ra làm hạ thấp dòng chảy vào trong cống. - Hình 2-C đưa ra trường hợp cửa vào ngập đến mức độ có dòng chảy đầy trên suốt chiều dài cống nhưng ở cửa ra dòng chảy không đầy. Trường hợp này xảy ra khi không có dòng chảy ở hạ lưu và cột nước thượng lưu rất lớn. - Hình 2-D là một trường hợp điển hình. Cửa vào của cống bị ngập và cửa ra có dòng chảy tự do với cột nước hạ lưu thấp. Với điều kiện này, dòng chảy không đầy ở một phần của cống (là dòng chảy êm) và

dòng chảy ở cửa ra là dòng chảy êm. - Hình 2-E cũng là một trường hợp điển hình, không ngập cả ở cửa vào và ra. Dòng chảy trong cống là dòng chảy không đầy và là dòng chảy êm.

Yếu tố ảnh hưởng đến chế độ kiểm soát hạ lưu: có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng đến kiểm soát hạ lưu như: - Độ sâu thượng lưu, - Hình dạng kích thước cửa vào và cửa ra, - Đặc tính của ống cống (mức độ gồ ghề, diện tích cống, hình dạng, chiều dài, độ dốc đặt cống), - Mức nước hạ lưu cống, - Cửa ra của cống.

Chế độ thủy lực của kiểm soát hạ lưu: Dòng chảy đầy trong cống (như hình 2-A) là mẫu tốt nhất của dòng chảy để mô tả chế độ thủy lực của kiểm soát hạ lưu. Dòng chảy ở chế độ kiểm soát hạ lưu được tính toán trên cơ sở của phương trình cân bằng năng lượng.

Hình 3 biểu diễn đường năng lượng và đường đo áp của dòng chảy qua cống trong trường hợp cống đầy.



Hình 3: Đường năng lượng và đường đo áp của dòng chảy qua cống khi cống đầy.

Cân bằng năng lượng (viết phương trình Bernoulli) giữa mặt cắt 1 và 2:

$$HW_0 + \frac{V_u^2}{2g} = TW + \frac{V_d^2}{2g} + H_L \quad (4)$$

HW_0 , TW - mực nước thượng lưu và hạ lưu cống.

V_u , V_d - lưu tốc dòng chảy thượng lưu và hạ lưu cống

H_L - Năng lượng cần thiết để dòng chảy vượt qua cống

Trường hợp bỏ qua cột nước lưu tốc:

$$HW_0 = TW + H_L \quad (5)$$

Trong trường hợp này H_L cũng chính là độ chênh lệch mực nước ở thượng lưu cống và cửa ra của cống. Năng lượng cần thiết (H_L) để dòng chảy vượt qua cống bao gồm: tổn thất ở cửa vào (H_e), tổn thất do ma sát trong ống cống (H_f), tổn thất ở cửa ra (H_o). Và ngoài ra còn có tổn thất ở chỗ uốn cong, tổn thất ở mỗi nối và tổn thất ở lưới chắn rác (nếu có). Khi đó ta có:

$$H_L = H_e + H_f + H_o \quad (6)$$

- Lưu tốc trong ống cống:
$$V = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

Q – lưu lượng qua cống. A – diện tích mặt cắt ngang của dòng chảy đầy cống.

- Tổn thất tại cửa vào: tùy theo cấu tạo của cửa vào, vật liệu làm cống tổn thất cửa vào được tính theo

công thức:
$$H_e = k_e \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (8a)$$

k_e – hệ số tổn thất cửa vào, phụ thuộc vào vật liệu làm cống và cấu tạo cửa vào của cống.

- Tổn thất do ma sát trong ống cống: hay tổn thất dọc đường trong cống, phụ thuộc tình trạng bề mặt ống cống (hệ số nhám n), kích thước và hình dạng cống (bán kính thủy lực R), chiều dài cống, ... được xác định dựa vào công thức tính tổn thất dọc đường và công thức Sêdy, công thức sau khi biến đổi có dạng như 8b:

$$H_f = \left[\frac{19,63n^2 L}{R^{1,33}} \right] \frac{V^2}{2g} \quad (8b)$$

n – hệ số nhám, phụ thuộc vào vật liệu làm ống.

L – chiều dài ống cống. R – bán kính thủy lực của dòng chảy trong cống.

- Tổn thất tại cửa ra: phụ thuộc cấu tạo cửa ra của cống, có thể tính theo công thức 8c:

$$H_o = \frac{V^2}{2g} \quad (8c)$$

Kết hợp các công thức (6), (7), (8) được:

$$H = \left[1 + k_e + \frac{19,63n^2 L}{R^{1,33}} \right] \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

Các công thức từ (4) đến (9) đúng cho dòng chảy đầy như hình 2-A, xong vẫn đúng cho dòng chảy ở hình 2-B, C. Với dòng chảy không đầy hay đầy một phần như hình 2-D, E có thể dùng phương pháp gần đúng như sau:

- Tính độ dốc ma sát của dòng chảy đầy:
$$S_n = \frac{H_f}{L} = \frac{19,63n^2}{R^{1,33}} \frac{V^2}{2g}$$
- Lấy độ sâu tại cửa ra là giá trị lớn trong hoặc độ sâu hạ lưu (TW) hoặc $(d_c + D)/2$.
- Từ độ sâu tại cửa ra kẻ một đường thẳng đi lên cửa vào với độ dốc ma sát của dòng chảy đầy S_n sẽ được đường đo áp (HGL).
- Từ đường đo áp cộng thêm cột nước lưu tốc và tổn thất cửa vào được mực nước thượng lưu và đường năng lượng (EGL).

Phương pháp gần đúng này phù hợp với dòng chảy đầy một phần. Với dòng chảy không đầy nó thỏa mãn trong trường hợp $HW \geq 0,75.D$.

2.3. Lưu tốc cửa ra.

Lưu tốc cửa ra cần được tính toán để tìm biện pháp phòng xói ở cửa ra cống và hạ lưu cống. Lưu tốc cửa ra cũng dùng để điều chỉnh dòng chảy hay đưa ra biện pháp tiêu năng ở hạ lưu cống. Lưu tốc cửa ra được xác định dựa vào độ sâu dòng chảy ở cửa ra của cống và hình dạng kích thước ống cống.

Đối với chế độ kiểm soát thượng lưu: độ sâu tại cửa ra xấp xỉ độ sâu chảy đều trong cống: $d = d_n < d_c$.

Đối với chế độ kiểm soát hạ lưu:

+ Khi $TW > D$: $d = D$

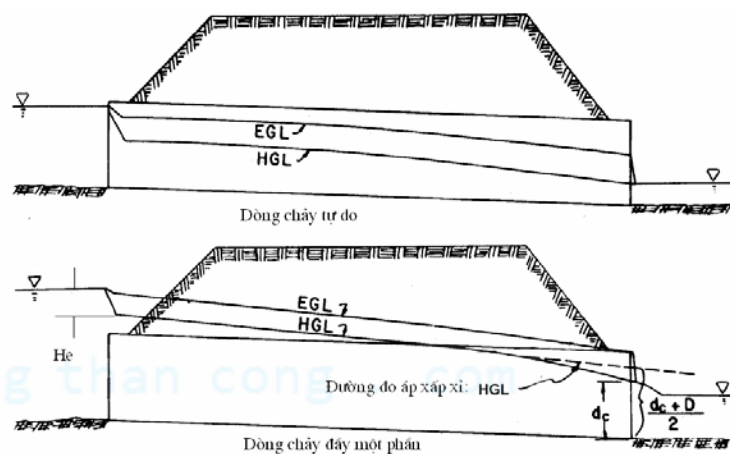
+ Khi $D > TW > d_c$: $d = TW$

+ Khi $TW \leq d_c$: $d = d_c$.

Khi đó có lưu tốc cửa ra: $V_o = Q/A_p$.

A_p – diện tích dòng chảy tại cửa ra.

Hình 4:
Đường năng lượng và đường đo áp của dòng chảy qua cống trong trường hợp cống không đầy và đầy một phần.



2.4. Đồ thị thiết kế thủy lực cống.

Để xây dựng được đường cong biểu diễn đặc tính làm việc của cống cần xây dựng đồ thị thiết kế thủy lực là đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa các giá trị lưu lượng, các kích thước cống khác nhau với cột nước thượng lưu. Để xây dựng người ta sử dụng các công thức từ (1) đến (9) tùy theo chế độ kiểm soát.

- Kiểm soát thượng lưu: Sử dụng các công thức (1), (2) và (3), ví dụ ở hình 5.
- Kiểm soát hạ lưu: Sử dụng các công thức từ (4) đến (9), ví dụ ở hình 6.

III. TRÌNH TỰ THIẾT KẾ THỦY LỰC CỐNG.

Khi thiết kế thủy lực cống cần có sự hiểu biết về chế độ thủy lực trong cống, nếu không hiểu thấu đáo chế độ thủy lực cống có thể dẫn đến các thiết kế sai lầm, kết quả thiết kế có thể không thoả mãn hay không an toàn.

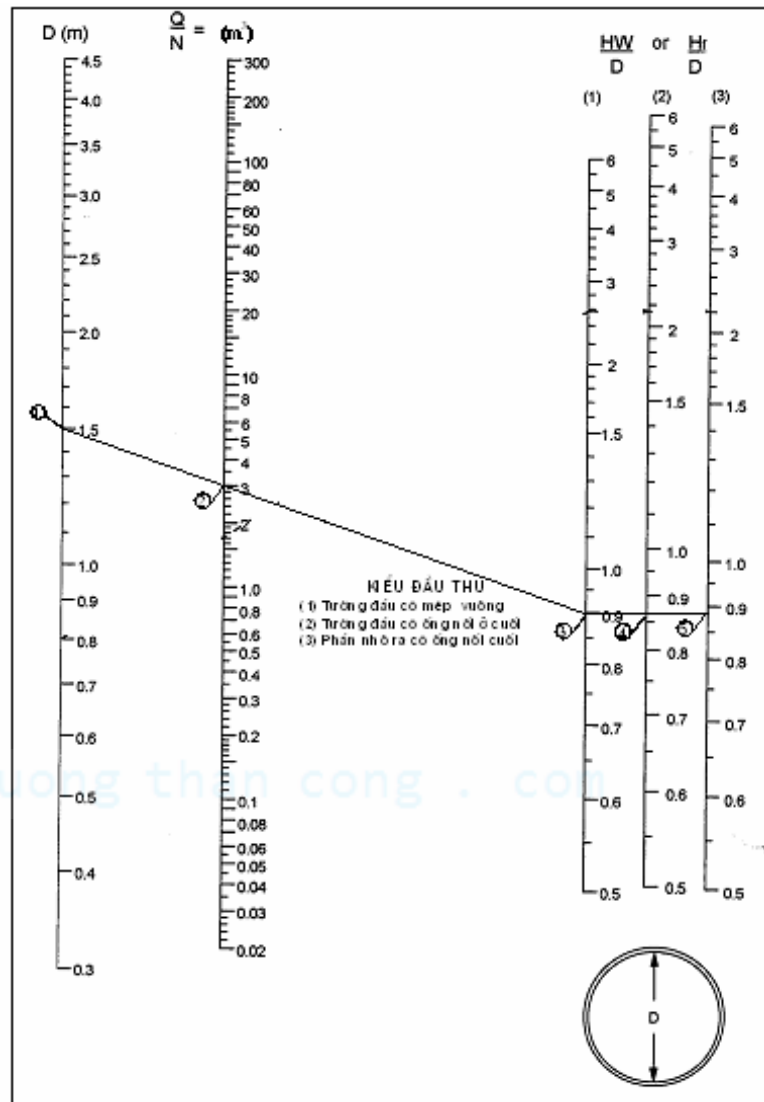
3.1. Chế độ kiểm soát thượng lưu.

- Từ lưu lượng đã biết, tùy thuộc vào điều kiện địa hình, địa chất cụ thể, sơ bộ lựa chọn loại cống, kích thước cống, cấu tạo cửa vào, cửa ra của cống.
- Từ kích thước của cống, lưu lượng qua cống xác định được tỷ số HW/D (xem hình 5).
- Nhân chiều cao cống D với tỷ số HW/D được nước dâng trước cống HW .
- Tính cao độ mực nước thượng lưu: $EL_{hd} = EL_{sf} + HW$.

EL_{hd} – mực nước thiết kế ở thượng lưu.

EL_{sf} – cao độ đáy lòng dẫn tại cửa vào.

Hình 5:
Ví dụ về đồ thị thiết kế cống với chế độ kiểm soát thượng lưu.



3.2. Chế độ kiểm soát hạ lưu.

- Tính độ sâu hạ lưu TW trên đáy cống theo lưu lượng thiết kế.
- Tính độ sâu phân giới theo lưu lượng và kích thước, hình dạng cống.
- Tính độ sâu tại cửa ra của cống h_0 là trị số lớn trong hai trị số hoặc TW hoặc $(D+d_c)/2$.
- Tính tổn thất qua cống H (hay H_L) theo biểu đồ hay theo công thức nếu các giá trị vượt quá biểu đồ.

(1) Nếu hệ số nhám của cống khác hệ số nhám khác hệ số nhám của biểu đồ thì điều chỉnh chiều dài

cống theo công thức:

$$L_1 = L \left(\frac{n_1}{n} \right)^2$$

L, L_1 – chiều dài thực tế và chiều dài cống điều chỉnh của cống.

n, n_1 – hệ số nhám của biểu đồ và hệ số nhám thực tế.

Sau đó sử dụng L_1 như chiều dài thực tế của cống khi sử dụng biểu đồ thiết kế.

(2) Sử dụng một đường thẳng nối kích thước cống (điểm 1) với chiều dài cống theo hệ số k_c (điểm 2) được điểm đổi hướng (điểm 3). Lại dùng một đường thẳng nối từ lưu lượng (điểm 4) với điểm đổi hướng (điểm 3) được tổn thất H (xem hình 6).

- Tính cao độ mực nước tại cửa ra: $EL_{ho} = EL_o + H + h_o$.

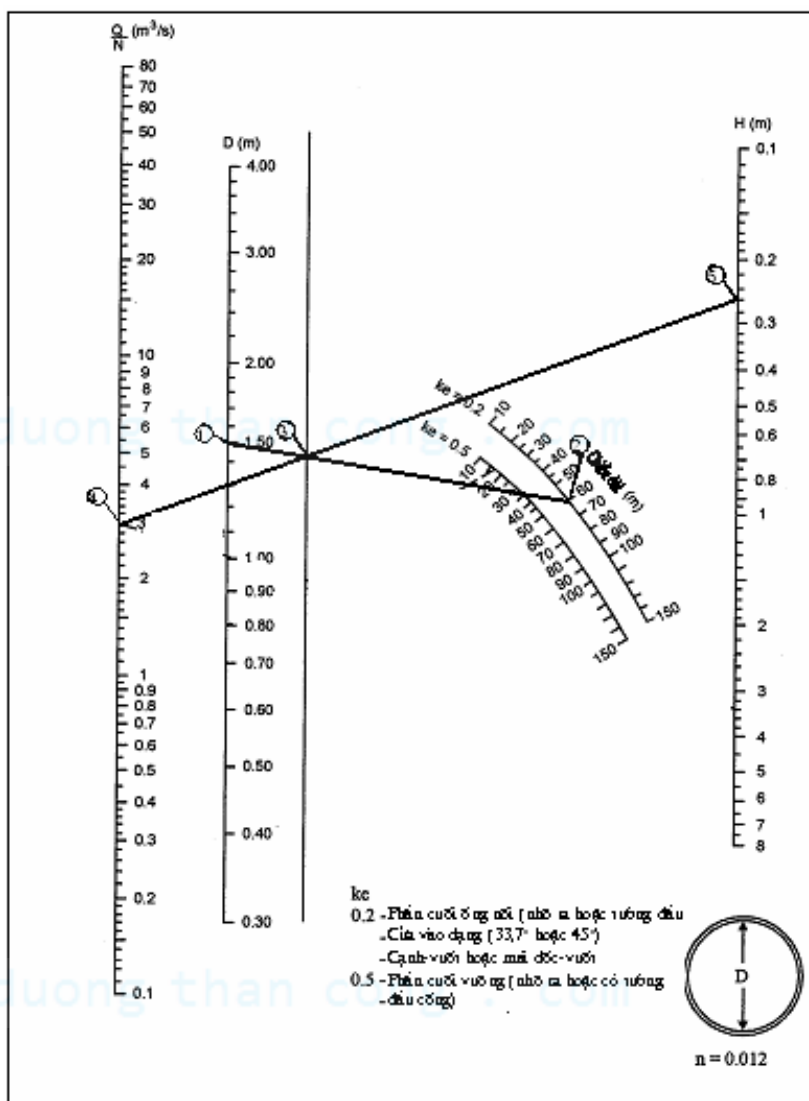
EL_o – cao độ đáy cửa ra.

- Tính cột nước dâng ở thượng lưu: $HW = H + h_o - L.S$.

Và tính cao độ mực nước thượng lưu: $EL_{hd} = EL_{sf} + HW$.

- Nếu cao độ mực nước tại cửa ra lớn hơn cao độ mực nước thượng lưu ($EL_{ho} > EL_{hd}$) thì tiến hành thiết kế lại (chọn lại cống khác hoặc kết cấu cống khác).

Hình 6: Ví dụ về đồ thị thiết kế cống với chế độ kiểm soát hạ lưu.



* Tính lưu tốc tại cửa ra: Từ chế độ kiểm soát của cống, tính độ sâu dòng chảy tại cửa ra theo mục 2.3
(d). Từ độ sâu cửa ra (d) và hình dạng kích thước cống tính lưu tốc cửa ra.

3.4. Ví dụ áp dụng.

Tính thủy lực cống thoát nước ngang đường ô tô với:

- Lưu lượng thiết kế : $Q_{4\%} = 3 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Chiều dài cống dự kiến : $L = 60 \text{ m}$.
- Độ dốc đáy tự nhiên : $S = 0,005$.
- Độ sâu hạ lưu : $TW = 1,0 \text{ m}$.
- Cao độ mặt đường : $33,53 \text{ m}$.
- Cao độ cửa vào : $30,48 \text{ m}$.

Thiết kế cống tròn bê tông cốt thép ($n = 0,012$) với đường kính khác nhau, đầu cống dạng tường cánh ($k_c = 0,2$), độ dốc đặt cống theo độ dốc tự nhiên ($S = 0,005$).

Kết quả tính toán xem trên hình 5, 6 và bảng 1.

Bảng 1: Ví dụ tính thủy lực cống

Loại cống	Q/N	Tính độ sâu mực nước thượng lưu								Chế độ K/s	EL _{hd}	d	V _o
		K/s thượng lưu		Kiểm soát hạ lưu									
		HW/D	HW _i	d _c	(d _c +D)/2	TW	h _o	H	HW ₂				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
D=1,5m	3,0	0,90	1,35	0,90	1,20	1,0	1,20	0,26	1,16	T/L	31,83	0,80	3,13
D=1,75m	3,0	0,69	1,21	0,88	1,31	1,0	1,31	0,13	1,14	T/L	31,69	0,73	3,16

KẾT LUẬN

Trên đây trình bày các đặc tính của dòng chảy qua cống, các dạng dòng chảy qua cống ứng với chế độ kiểm soát thượng lưu và cửa ra của cống. Bài viết cũng giới thiệu các công thức, phương trình ứng với các chế độ kiểm soát dòng chảy qua cống; các công thức, phương trình này là cơ sở để thiết lập các biểu đồ, đồ thị thiết kế thủy lực cống đã được giới thiệu trong các tiêu chuẩn thiết kế thủy lực cống (ví dụ trong “Chỉ dẫn thiết kế Thiết kế kỹ thuật đường ô tô trong 22TCN – 273 – 2001, 2005”).

Đồng thời cũng trình bày trình tự thiết kế thủy lực cống dựa vào biểu đồ thiết kế, cách đánh giá lựa chọn kết quả tính toán; điều này là cần thiết cho người thiết kế trong quá trình ứng dụng phương pháp thiết kế này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Trần Đình Nghiên "Thiết kế thủy lực cho dự án cầu đường" Nhà xuất bản Giao thông Vận tải - Hà Nội 2003.
- [2] Bộ Giao thông Vận tải "Tiêu chuẩn thiết kế đường ô tô 22 TCN 273 - 05" Nhà xuất bản Giao thông Vận tải - Hà Nội 2005.
- [3] Jerome M. Normann, Robert J. Houghtalen, and William J. Johnston “Hydraulic Design of Highway Culverts, Second Edition” Publication No. FHWA-NHI-01-020 September 2001 (Revised May 2005)

cuu duong than cong . com