IAHR AIIH

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

ENROCADO DE PROTECCIÓN PARA GRUPOS DE PILAS: DIMENSIONADO EN PLANTA Y PROPUESTA EXPERIMENTAL ALTERNATIVA.

Christian Chreties, Gonzalo Simarro y Luis Teixeira.

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay. Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación, Universidad de Castilla-La Mancha, España. chreties@fing.edu.uy, gonzalo.simarro@uclm.es, luistei@fing.edu.uy.

RESUMEN:

En este trabajo se presentan y analizan nuevos datos experimentales sobre las dimensiones en planta de enrocados de protección para grupos de pilas, necesarios para evitar la forma de fallo de borde. La campaña experimental se basó en un análisis dimensional de las variables que intervienen en el problema. Los resultados muestran que para la configuración de grupo de pilas ensayada, en condiciones de aguas claras, la extensión mínima del enrocado de protección que evita la falla por borde, se obtiene haciendo que w=d, donde w es la extensión del manto medida desde el exterior de las pilas y d el diámetro de pila. Por otro lado, se propone y verifica una metodología alternativa para el estudio experimental del tipo de fallo por borde en grupo de pilas, mediante la cual se logran disminuir significativamente los tiempos de ensayo requeridos en relación a la metodología habitual (pasando de varios días a algunas horas), a la vez que se obtienen resultados muy similares para el dimensionado de la protección. Como línea futura de trabajo se identifica el interés de ampliar la aplicabilidad del método a otras geometrías de grupos de pilas.

ABSTRACT:

In this paper we present and analyze new experimental data on riprap mattresses plan dimensions for pile group protection against edge failure. The experimental campaign is based on a dimensional analysis background. The results show that for the pile groups tested, the minimum extent w for the riprap mattress to avoid edge failure must be obtained through the expression w = d, where d is the individual piles diameter. On the other hand, we propose and verify an alternative methodology for the experimental study of edge failure in pile groups, which significantly reduces the duration of the tests (from several days to few hours) and yielding similar results.

PALABRAS CLAVES:

Grupos de pilas de puentes, Enrocado de protección, Metodología experimental.

INTRODUCCIÓN

Debido a razones hidráulicas, geotécnicas y económicas, son cada vez más los casos donde las fundaciones de los puentes se proyectan y construyen mediante grupos de pilas (Coleman, 2005, Ataie-Ashtiani, 2006). Estos grupos de pilas sostienen mediante un cabezal ("pile cap") cada uno de los pilares ("pier column") del puente. Las características del proceso erosivo alrededor de estas estructuras varían de acuerdo a la posición relativa entre la misma (pila, cabezal y grupo de pilas) y el nivel de agua y del lecho. En la Figura 1 se presenta la clasificación de las configuraciones posibles propuesta por Coleman (2005).

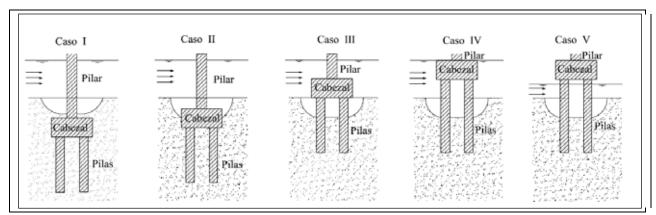


Figura 1.- Clasificación de configuraciones de acuerdo con Coleman (2005).

Los mecanismos de socavación alrededor de un grupo de pilas revisten mayor complejidad que en el caso de pilas aisladas debido a la interacción de los efectos de las pilas del grupo (efecto de grupo). De acuerdo a Sumer (2002), cuando un grupo de pilas está expuesto a la acción del flujo, se identifican dos patrones de socavación: a) el fenómeno de erosión local alrededor de cada pila individual, y b) un fenómeno de erosión global que afecta a toda el área alrededor del grupo, que se manifiesta como un descenso general del nivel del lecho alrededor del grupo. La separación entre ejes de las pilas del grupo juega un papel central a la hora de de establecer el potencial de erosión correspondiente al efecto de grupo. En tal sentido, separaciones pequeñas entre ejes de pilas provocan efectos de grupo importantes, mientras que separaciones entre los ejes superiores a 4 veces el diámetro de pila determinan efectos de grupo despreciables de acuerdo a los datos experimentales presentados por Ataie-Ashtiani (2006).

Contrariamente a lo que sucede para el caso de pilas simples, donde se ha venido investigando y publicando resultados desde los años 1950 (Melville and Coleman, 2000), el conocimiento sobre pilas complejas y grupos de pilas es comparativamente menor. En cuanto a la erosión alrededor de grupos, un trabajo pionero es el de Hannah (1978), mientras que la gran mayoría de los trabajos restantes fueron desarrollados en los últimos 15 años: p.e.: Coleman (2005); Ataie-Ashtiani (2006). Respecto a protección en grupos, es aún menor el conocimiento, pudiendo citarse los trabajos de Vittal (1994) y Zarrati (2006), aunque ninguno de ellos estudia protecciones mediante enrocado.

Asumiendo que es posible identificar, en el caso de grupos de pilas, los mismos mecanismos de fallo de enrocados de protección correspondientes a pilas individuales y estribos, se puede decir que existen cuatro mecanismos básicos de falla: 1) de corte ("shear failure"), 2) de borde ("edge failure"), 3) por formas de fondo ("bed form undermining"), y 4) por tubificación ("winnowing failure"). La falla de corte ocurre cuando los elementos del enrocado no tienen peso suficiente para resistir el inicio de movimiento provocado por el flujo. La falla de borde ocurre cuando los elementos del enrocado caen dentro del foso de erosión desarrollado alrededor de la protección; estando directamente vinculado a la extensión en planta de la propia protección (manto). El tercer modo de fallo ocurre cuando los elementos de la protección se desestabilizan y mueven debido al

pasaje de las formas de fondo a través del enrocado. Esto último ocurre solamente en algunos casos bajo lecho vivo y puede evitarse colocando la protección de enrocado por debajo de la cota mínima esperada de las formas de fondo. El cuarto modo de fallo ocurre por falta de gradación entre el diámetro del enrocado y el diámetro del material del lecho, provocando el "lavado" del material del lecho entre las piezas de enrocado. Este modo de fallo puede evitarse colocando filtros entre el sedimento del lecho y el enrocado de protección. Los ensayos relativos al mecanismo de fallo por borde requieren alcanzar las dimensiones máximas de la fosa de erosión para estudiar la ocurrencia o no del fallo. La metodología habitual de ensayo para este caso, consiste en fijar condiciones hidrodinámicas tales que la intensidad de flujo "I" sea próxima, pero inferior, a 1 (aguas claras) para el material del lecho no protegido, dejando evolucionar la erosión hasta que la fosa alcance dimensiones de equilibrio. Esto implica tiempos de ensayo muy largos (días/semanas), debido al carácter asintótico del proceso erosivo.

Los objetivos del trabajo son: 1) presentar y analizar nuevos datos experimentales sobre las dimensiones en planta de enrocados de protección para grupos de pilas. 2) proponer y verificar una metodología alternativa para el estudio experimental del modo de fallo por borde en grupo de pilas que permita disminuir significativamente los tiempos de ensayo requeridos.

ANALISIS DIMENSIONAL Y METODOLOGÍA

Fue realizado en primer término un análisis dimensional de las variables que intervienen en el fenómeno de erosión alrededor del grupo de pilas, así como en el dimensionado en planta de la protección de enrocado. En base a ello se estableció el plan de ensayos para cumplir con los dos objetivos planteados.

Tres parámetros adimensionales se agregan a los utilizados en el caso de la pila individual, para cuantificar la erosión: la separación entre pilas relativa al diámetro de pila (G = 1/d), el número de pilas en la dirección del flujo (n) y el número de pilas en la dirección perpendicular al flujo (m), asumiendo que el flujo es perpendicular a la estructura (Figura 2). Asumiendo que los efectos viscosos alrededor del grupo de pilas son despreciables, la profundidad de erosión de equilibrio puede escribirse como una función de:

$$d_{se} = f(u, h, \rho, \rho_s, d_{50}, d, b, g, G, m, n)$$
[1]

donde f debe entenderse como una función general, u y h son respectivamente la velocidad media y el calado del flujo en la zona no-perturbada, b el ancho del canal, g la aceleración de la gravedad, d_{50} el tamaño medio del sedimento del lecho, ρ y ρ_s las densidades del agua y del sedimento del lecho. Aplicando análisis dimensional sobre la Ec. [1] puede obtenerse la Ec. [2]. Realizando un desarrollo análogo para el ancho de protección, w, necesario para que no se produzca fallo de borde y considerando que esta no depende del tamaño del sedimento del enrocado, dr_{50} (Cardoso et al., 2010), se obtiene la Ec. [3].

$$\frac{d_{se}}{d} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{d}{b}, \frac{u^2}{gd_{50}}, G, m, n\right)$$
 [2]

$$\frac{w}{d} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{d}{b}, \frac{u^2}{gd_{50}}, G, m, n\right)$$
 [3]

Manteniendo las variables: d, b, d_{50} , ρ y ρ_s constantes durante los ensayos y asumiendo que el grupo adimensional representante de la velocidad (Froude sedimentométrico) puede ser sustituido por la

intensidad de flujo I (cociente entre la velocidad media en la zona no perturbada y la velocidad de inicio del movimiento), la Ec. [3] puede transformarse en:

$$\frac{w}{d} = f\left(\frac{h}{d}, I, G, m, n\right)$$
 [4]

En base a la Ec. [4], se planificará el procedimiento experimental, sobre la base de ensayos a un único grupo de pilas:

PROCEDIMEINTO EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de hidráulica fluvial de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Castilla -La Mancha, España. Específicamente, se utilizó un canal de pendiente variable de 30 m de longitud, 75 cm de ancho y 60 cm. de altura de trabajo especialmente diseñado para estudios de erosión local en estructuras fluviales. En la parte central del canal (20 m aguas abajo del comienzo del mismo), donde se ubica la estructura a estudiar, la profundidad del canal es mayor a los efectos de analizar el fenómeno de erosión local. Dicha instalación está equipada con un sistema de alimentación y recirculación de sedimento controlado por un PLC central.

Se utilizó un grupo de pilas construido en PVC y relleno de cemento a efectos de asegurar la estabilidad estructural de la pieza. El diámetro individual de las pilas es 6.3 cm., la separación G=3, el número de pilas en dirección al flujo n=2 y el número de pilas ortogonales al flujo m=3, como se presenta en la Figura 2. El nivel de agua se sitúa por debajo del cabezal y de acuerdo a la separación G=3, el efecto de grupo es no-despreciable en el proceso erosivo (Ataie-Ashtiani, 2006). El lecho del canal está constituido por una capa de sedimento de arena de cuarzo cuya densidad es ρ_s = 2.650 kg/m³, no cohesivo, de 1.60 mm. de tamaño medio y dispersión granulométrica σ_g = 1.16, por lo cual puede considerase sedimento de granulometría uniforme (σ_g < 1.3).

La protección implementada consistió en la colocación de un enrocado de grava cuyo diámetro medio dr_{50} es de 16 mm, colocado hasta una distancia w alrededor del grupo de pilas, como se indica en la Figura 2. Este tamaño medio de enrocado de protección fue determinado para evitar el modo de fallo por corte (Shear). Se utilizó un filtro sintético flexible entre el lecho de arena y el enrocado de protección, a los efectos de evitar el fallo por tubificación (Winnowing). El espesor del enrocado se fijó igual a tres veces el diámetro medio dr_{50} , coincidiendo el nivel superior del manto con el nivel del sedimento del lecho. Todas estas medidas aseguraron que el único tipo de fallo ocurrido en los ensayos (tanto para ensayos aplicando la metodología habitual como para ensayos utilizando la metodología propuesta) fue el fallo por borde (Edge).

Para cada configuración en planta (w), el volumen de enrocado fue calculado asumiendo que el manto tiene una profundidad t = 3dr₅₀ y la extensión en planta indicada en la Figura 2. La colocación de los elementos de enrocado se realizó introduciendo verticalmente en el lecho de arena una placa metálica de 1 mm de espesor, siguiendo el perímetro externo del manto de enrocado (w). Seguidamente se removió el volumen de sedimento dentro del recinto limitado por la placa, el cual fue rellenado manualmente con los elemento del enrocado. Finalmente se verifica que el volumen de enrocado calculado previamente haya completado el volumen de arena removido asegurando el mismo nivel entre el enrocado y el sedimento de los alrededores.

En todos los ensayos realizados, la fila de enrocado ubicada junto al perímetro de cada una de las seis pilas, fue pintada de otro color en relación al resto del enrocado. Esto permitió visualizar con claridad si la falla de borde alcanzaba alguna de las pilas del grupo durante cada ensayo.

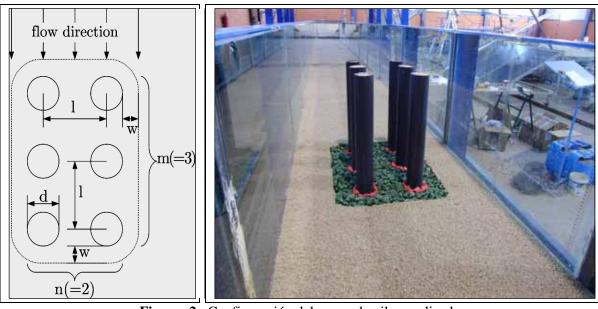


Figura 2.- Configuración del grupo de pilas analizado.

Una vez preparada la configuración a ensayar (manto de protección), se procede a llenar lentamente el canal. El caudal circulante es controlado utilizando caudalímetros electromagnéticos, cuya precisión es de 1.1 %, mientras que el calado en el canal es controlado mediante una compuerta rebatible ubicada aguas abajo. La profundidad de erosión fue medida utilizando limnímetros de precisión de 0.1 mm de resolución, luego de 1, 2, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 45, 60 minutos a partir del comienzo del ensayo y posteriormente cada 30 minutos hasta el final del ensayo. Los experimentos se extendieron (final del ensayo) hasta que: o bien ocurre falla de borde, o bien se satisface la condición de equilibrio propuesta por Melville (Melville, 1999): el incremento de la profundidad de erosión en 24 horas resulta inferior al 5% del diámetro de pila. A los efectos de definir experimentalmente en que situación ocurre la falla de borde de la protección se siguió la propuesta de Cardoso (Cardoso, 2009). Dicho criterio consiste en identificar como falla de borde cuando al menos un elemento de enrocado situado originalmente en el perímetro de pila, cae dentro del foso. En la Figura 3 (Izq.) se presenta la configuración de la protección previa al comienzo del ensayo, mientras que en la Figura 3 (Der.) se presenta una situación de falla de borde. En este caso (Figura 3 Der.), la extensión del manto (w) resulta insuficiente para prevenir la falla de borde.

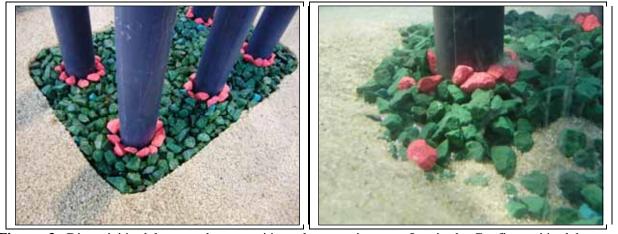


Figura 3.- Disposición del manto de protección en los experimentos. Izquierda: Configuración del manto previo al comienzo del ensayo. Derecha: Fallo de borde.

Todos los ensayos se realizaron utilizando el grupo de pilas indicado en la Figura 2, con lo cual la Ec. [4] se transforma en:

$$\frac{w}{d} = f\left(\frac{h}{d}, I\right)$$
 [5]

En base a la Ec. [5], se realizaron por un lado ensayos habituales con Intensidad de flujo igual a 1 (agua clara) y por otro, ensayos en condiciones de lecho vivo con intensidad de flujo igual a 1.3, totalizando 12 ensayos donde para cada calado relativo (h/d) se determinó la extensión del mando relativa (w/d) mínima necesario que evita el descalce del grupo de pilas (falla de borde).

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1, se presentan los resultados experimentales obtenidos para el dimensionado del ancho de la protección en los casos de aguas claras (I=1) y lecho vivo (I=1.3). Además del ancho de la protección (w/d) obtenido en cada ensayo, se presenta el tiempo total del ensayo tanto en los casos donde ocurrió falla de borde (Falla) como en los casos donde la extensión del manto fue suficiente (Estable). Como se observa, para el rango de calados estudiado, el propio calado relativo h/d no incide significativamente en los resultados del ancho de protección, tanto en al caso de I=1 como para I= 1.3. Por lo tanto la expresión [5] puede aproximarse a:

$$\frac{w}{d} = f(I) \tag{6}$$

Tabla 1 Resultados experimentales para dimensionado del ancho de la
--

I	h/d	w/d	Tiempo de ensayo (hs)	Resultado
1.3	2.5	1.27	24	Estable
1.3	2.5	1.11	24	Estable
1.3	2.5	0.95	4	Falla
1.3	2	1.11	24	Estable
1.3	2	0.95	19	Falla
1.3	1.5	1.11	24	Estable
1.3	1.5	0.95	24	Estable
1.3	1.5	0.79	5	Falla
1	2.0	0.95	120	Estable
1	2.0	0.79	24	Falla
1	2.5	0.95	117	Estable
1	2.5	0.79	68	Falla

Considerando en primera instancia los ensayos habituales (i.e: I=1), la expresión [6] se transforma en w/d=k, donde k es un valor constante, fijada la geometría del grupo. Esta formulación es similar a las correspondientes a pilas aisladas (Tabla 2).

Tabla 2.- Valores de k=w/d para pilas aisladas según referencias bibliográficas.

Referencia	k = w/d
Breusers et al. (1977)	2.0
Parola et al. (1996)	0.5
Lauchlan (1999)	1.0-1.5
Melville and Coleman (2000)	1.0-1.5

Los experimentos presentados en la Tabla 1 con intensidad de flujo I=1 (metodología habitual) implicaron duraciones de ensayos de varios días, especialmente en los casos donde no ocurre falla de borde. A efectos de disminuir este tiempo de ensayo, se propone como alternativa realizar los ensayos en condiciones de lecho vivo, manteniendo intensidades de flujo bajas, por ejemplo 1.3. De esta forma, el proceso erosivo se desarrolla con mucha mayor velocidad que para aguas claras, a la vez que se verifica la no existencia, para esa intensidad, de flujo de fallo por formas de fondo.

La Tabla 1 y la Figura 4 permiten verificar que los resultados de ancho de protección (w/d) con el método propuesto son similares a los obtenidos con el método habitual.

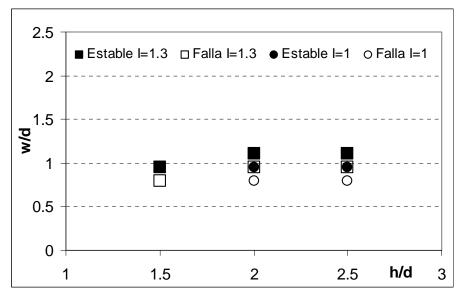


Figura 4.- Resultados experimentales para ancho de protección en grupo de pilas aplicando el método habitual (círculos) y el método propuesto (cuadrados).

A su vez, en la Figura 5, se presentan los tiempos de ensayo obtenidos con la metodología habitual y aplicando la metodología propuesta. Como puede observarse, especialmente en el caso donde no existe falla de borde, los tiempos de ensayo pueden reducirse de 120 horas a menos de 24 horas.

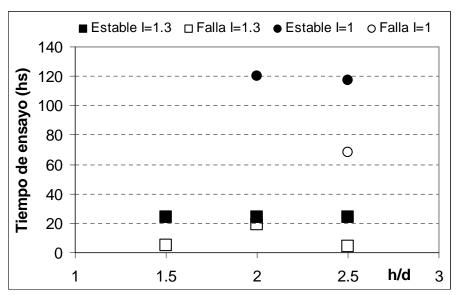


Figura 5.- Tiempos de ensayos aplicando el método habitual (círculos) y el método propuesto (cuadrados).

CONCLUSIONES

Se presentan nuevos resultados experimentales sobre el dimensionado de la extensión de la protección de enrocado para grupo de pilas frente al modo de fallo de borde. Los resultados muestran que para el grupo de pilas ensayado, en condiciones de aguas claras, el ancho mínimo que evita la falla por borde, debe ser obtenido mediante la expresión: w=d. Si bien para la configuración de grupo estudiada, el efecto de grupo no es despreciable a efectos de la erosión local, la expresión obtenida resulta similar a lo publicado en la bibliografía para pilas individuales (Tabla 2). Además, la no dependencia del calado relativo en la formulación resulta razonable, considerando que las dimensiones del grupo de pilas corresponden a pilas angostas, donde la erosión máxima depende del diámetro de pila y no del calado (Melville and Coleman, 2000).

Por otro lado, se propuso y verificó un método alternativo para el estudio experimental del modo de falla por borde del enrocado de protección en grupo de pilas. Este método permite reducir los tiempos de ensayos (que se extienden por varios días en el método habitual) a solamente algunas horas, obteniendo resultados muy similares (ligeramente ubicados del lado de la seguridad) para el dimensionado de la protección. (Figura 4).

Como línea futura de trabajo se identifica el interés de ampliar la aplicabilidad del método a otras geometrías de grupos de pilas, considerando la variación de los parámetros G, m y n, así como su extensión a las otras configuraciones de grupos presentadas en la Figura 1.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Christian Chreties fue desarrollado en el marco del programa de movilidad de investigadores de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) del Uruguay. Los autores quieren agradecer también a Eduardo Díaz por su ayuda en la preparación de los experimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A. A.(2006). "Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 10, October 2006, pp. 1100-1104.

Cardoso, A. H. and Fael, C. M. S.(2009). "Protecting vertical-wall abutments with riprap mattresses". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 6, June 2009, pp. 457-465.

Cardoso, A. H., Simarro, G., Fael, C., Le Doucen, O. and Scheleiss, A. (2010). "Toe protection for spill-through and vertical-wall abutments". *Journal of Hydraulic Research. Doi:* 10.1080/00221686.2010.492106

Chiew, Y. M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 9, September 1995, pp. 635-643.

Chiew, Y. M. and Lim, F. H. (2000). "Failure behavior of riprap layer at bridge live-bed conditions". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, January 2000, pp. 43-55.

Chiew, Y. M. (2004). "Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, March 2004, pp. 218-226.

Chreties, C., Simarro, G and Teixeira, L. (2008). "A new experimental method to find equilibrium scour at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 134, No. 10, October 2008, pp. 1491-1495.

Coleman, S (2005). "Clearwater local scour at complex piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 4, April 2005, pp. 330-334.

Hannah, C. R. (1978). "Scour at pile groups". University of Canterbury. Research Report no 78,3.

Lauchlan, C. S. and Melville, B. W. (2001). "Riprap protection at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 5, May 2001, pp. 412-418.

Melville, B.W. (1997). "Pier and abutment scour- an integrated approach". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* Vol. 123, No. 2, February 1997, pp. 125-136.

Melville, B.W. and Chiew, Y. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* Vol. 125, No. 1, January 1999, pp. 59-65.

Melville, B.W. and Coleman, E. (2000). Bridge Scour. Addison-Wesley Pub.Co., Reading, Mass.

Richardson, E, and Davis, S. (2001). Evaluating scour at bridges. Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C.

Parola, A.C. (1993). "Stability of riprap at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 10, October 1993, pp. 1080-1093.

Sheppard, D. M. and Fredsoe, J. (2002). Bridge Scour Manual. Florida Departments of Transportation.

Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (2002). The Mechanics of Scour in the Marine Environment. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 17. Word Scientific, Singapore.

Vital, N. Kothyari, U. C., and Haghghat, M. (1994). "Clear-water scour around bridge pier group". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* Vol. 120, No. 11, November 1994, pp. 1309-1318.

Zarrati, A. R., Nazariha, M., and Mashahir, M. B. (2006). "Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* Vol. 132, No. 2, February 2006, pp. 154-162.