

تصميم الخوازيق المحملة أفقياً

Design of Horizontally Loaded Piles

- عام • الظاهرة الطبيعية والطرق المتوافرة لجهاز مقياس الضغط • الخلفية النظرية • منهجية معامل طبقة التأسيس للخوازيق الطويلة المرنة • منهجية معامل طبقة التأسيس للخوازيق القصيرة الصلبة • منهجية منحني $P-y$: الطريقة
- دقة الطريقة • القاعدة الإهامية (قاعدة الضغط على الإهمام) لتقدير السلوك الأفقي • التحميل طويل المدى والتحميل السريع • التحميل الدوري • التحميل قرب خندق
- تصميم أعمدة الحاجز الوقائي لارتظام العربة

(١١,١) عام GENERAL

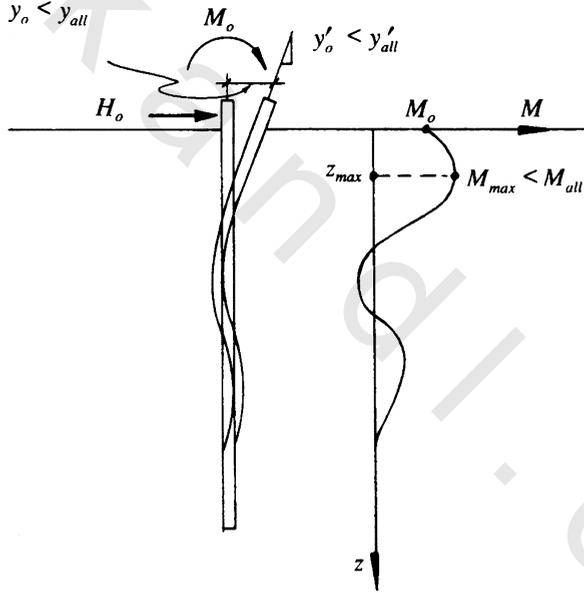
يمكن تسمية الخوازيق المحملة أفقياً بأنها الخوازيق التي تتعرض إلى حمل أفقي أو إلى عزم انقلاب أو كليهما معاً. ويتحكم في تصميم هذه الخوازيق عاملان هما: الانحراف المسموح به y_{all} أو الميل المسموح به y'_{all} لأعلى الخازوق وعزم الانحناء المسموح به M_{all} للخازوق (شكل رقم ١٠٦). فلو كان y_0 هو الانحراف عند أعلى الخازوق، y'_0 هو الميل عند أعلى الخازوق و M_{max} هو أقصى عزم انحناء على الخازوق فإن التصميم يجب أن يحقق التالي :

$$(٢٥٠) \quad y_o \leq y_{all}$$

$$(٢٥١) \quad y'_o \leq y'_{all}$$

$$(٢٥٢) \quad M_{max} \leq M_{all}$$

يجب التأكيد على أن أهم خطوة للحصول على نتائج جيدة لاختبار مقياس الضغط هي إعداد ثقب حفر ذي جودة عالية. ويؤدي ثقب الحفر الرديء عادة إلى أخطاء أكثر في التوقعات من قوانين التصميم نفسها. فلو كان ثقب الحفر مخلخلاً بحيث إن التربة أصبحت ضعيفة فإن القيم المتوقعة لكل من y_o ، y'_o و M_{max} أصغر مما لو أجري اختبار مقياس الضغط كما ينبغي.



شكل رقم (١٠٦). أنظمة تصميم الخوازيق المحملة أفقياً.

(١١, ٢) الظاهرة الطبيعية والطرق المتوافرة لجهاز مقياس الضغط

THE PHENOMENON AND PMT METHODS AVAILABLE

توجد عدة عناصر أساسية لمقاومة التربة عندما يحمل الخازوق أفقياً (شكل رقم

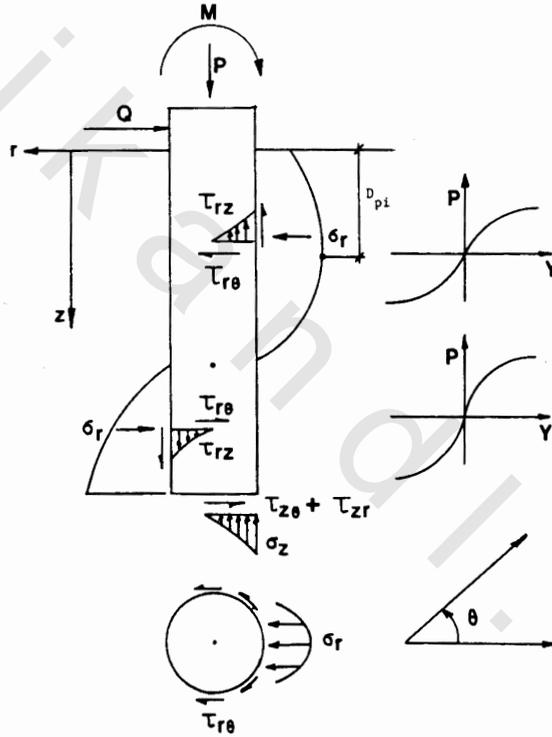
(١٠٧)، فالمقاومة الأمامية هي نتيجة الإجهادات العمودية σ_{rr} ومقاومة احتكاك الجذع هي نتيجة إجهادات القص $\tau_{r\theta}$ و τ_{rz} ومقاومة احتكاك القاعدة هي نتيجة إجهادات القص τ_{rz} و $\tau_{z\theta}$ ومقاومة عزم القاعدة هي نتيجة الإجهادات العمودية σ_{zz} . أما للخوازيق القصيرة والغليظة فإن العناصر الرئيسية لمقاومة التربة هي نتيجة σ_{rr} و $\tau_{r\theta}$. إن المقاومة الرئيسية للتربة تكون نتيجة τ_{rz} و τ_{rr} ما عدا في حالة كون الخازوق قصيراً وغليظاً ($D/B < 3$)، ومساهمة تأثير $\tau_{r\theta}$ عند أحمال التشغيل ربما تصل إلى ٥٠٪ من المقاومة الكلية (Briaud et al., 1983c).

إن محصلة مقاومة التربة فوق أي عمق z هي منحنى $P-y$ ، حيث إن P هو محصلة مقاومة التربة (قوة لكل وحدة طول للخازوق) و y هي الإزاحة الأفقية للخازوق. ويتم الحصول على الحمل الأفقي مقابل الإزاحة الأفقية عند سطح الأرض، وذلك بحل المعادلة التفاضلية المتحكممة بطريقة الفوارق المحدودة وباستخدام منحنى $P-y$ (Reese, 1977).

توجد قرب سطح الأرض منطقة ذات مقاومة منخفضة نتيجة لقصور دعم التربة الأفقي. وتؤثر هذه الظاهرة على تمدد مقياس الضغط والخازوق المحمل جانبياً إلى العمق الحرج، حيث إن D_{pm} هو العمق الحرج لمقياس الضغط و D_{pi} للخازوق (شكل رقم ١٠٧). وتحت العمق الحرج لا تتأثر عملية التشوه مباشرة بسطح الأرض. تتناقص مقاومة التربة ضمن نطاق العمق الحرج من المقاومة العميقة عند العمق الحرج إلى الحد الأدنى للمقاومة عند سطح الأرض.

طوّر في الأصل كل من مينارد، بوردن وجامبن (Menard et al., 1969; Gambin, 1979) الطريقة الأولى ثم قام جامبن عام ١٩٧٩م بتطويرها. وتستخدم هذه الطريقة نتائج اختبارات مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر. وتعتبر أن منحنى $P-y$ خط ثنائي مرونة-لدونة يتم الحصول على ميل الجزء الخطي الأول للمنحنى من معادلة مينارد لهبوط قاعدة مستمرة (Menard, 1975)، أما ميل الجزء الثاني فيساوي نصف ميل الأول. وتحدد المقاومة القصوى للتربة P_{ult} بالضغط النهائي لمقياس الضغط. ويتغير

العمق الحرج D_{pi} ما بين $3B$ ؛ إلى $8B$ حيث إن ذلك يعتمد على نوع التربة و B قطر الخازوق. يطبق معامل التقليل الذي يتغير من ١ عند D_{pi} إلى ٠.٥ عند سطح الأرض على P_{ult} ضمن العمق الحرج D_{pi} . وتميل هذه الطريقة إلى الحصول على انحرافات أكثر من الانحرافات المقاسة، وغالباً ما تكون بالضعف. وقد قدم بوجلين (Baguelin et al., 1978) حسابات يدوية لهذه الطريقة للإزاحات الصغيرة.



شكل رقم (١٠٧). مركبات مقاومة التربة (after GAI Consultants, 1982).

طوّر الاستشاريون جي أيه أي (GAI Consultants, 1982; Di Gioia et al., 1981) الطريقة الثانية عام ١٩٨٠م وذلك للأعمدة الصلبة المركبة والمستخدم كقواعد لأبراج خطوط الكهرباء. وتستخدم هذه الطريقة نتائج اختبارات مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر. وتمتاز هذه الطريقة باحتوائها جميع العناصر الموضحة في شكل رقم

(١٠٧). تتحدد المقاومتان σ_r و $\tau_{r\theta}$ لتكوين نموذج مقاومة جانبية واحدة على شكل قطع مكافئ مقطوع عند P_{ult} والذي يتم الحصول عليه من نظرية هانسن (Hansen, 1961). والنماذج الثلاثة الأخرى للمقاومة هي نماذج مرونة-لدونة. ويرتبط الجزء الابتدائي لجميع النماذج بمعامل مقياس الضغط، أما القيم القصوى فيتم الحصول عليها من التماسك وزاوية الاحتكاك للتربة. تتضمن نظرية هانسن تأثير العمق الحرج. وبالخبرة لهذه الطريقة فإنه عندما يكون الانحراف المقاس ٢,٥ سم فإن الانحراف المتوقع هو ما بين ١,٢ سم و ٣,٧ سم.

طور دوناند (Dunand, 1981) الطريقة الثالثة عام ١٩٨١م والتي تعتمد على نتائج اختبارات مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر. وتستخدم هذه الطريقة نموذج المرونة-اللدونة للمقاومة الأمامية. ويتم الحصول على ميل الجزء المرن من معامل مقياس الضغط ونظرية المرونة، بينما تعتبر القيمة القصوى الضغط النهائي لمقياس الضغط. ولقد اقترح أيضاً نموذج الاحتكاك؛ حيث إن منهجية العمق الحرج هي نفس الطريقة الأولى. وقد طورت هذه الطريقة لقواعد خطوط الكهرباء في فرنسا.

طورت أيضاً شركة أيو (Suyama et al., 1982) الطريقة الرابعة؛ حيث إنها تستخدم نتائج اختبارات مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر. وتعتمد هذه الطريقة على حل الصيغة المغلقة للمعادلة التفاضلية المتحكمة لمسألة خازوق لانهاثي الطول والحمل جانبياً ومدفون في تربة متجانسة لها معامل ثابت لضغط التماس k . ويقدم هذا الحل العلاقة بين الحمل الجانبي والإزاحة الجانبية عند سطح الأرض، ثم يعدل هذا الحل بمعاملات تجريبية ليلائم بيانات التجربة والتي تتضمن السلوك اللاخطي للتربة وتأثيرات القياس. يتم الحصول على قيمة k من قيمة معامل مقياس الضغط. وميزة هذه الطريقة أن حساباتها يدوية. أظهرت قاعدة بيانات قليلة لخوازيق نموذجية وأنبيب حديدية أن البيانات المتوقعة والمقاسة متطابقة تماماً.

اقترح كل من بوجلين، جازكويل وشيلدز عام ١٩٧٨م (Baguelin et al., 1978; Baguelin, 1982; IFP, 1983) الطريقة الخامسة وقدمت

بتفاصيل أكثر عام ١٩٨٢م ثم أخرجت في صيغة متكاملة ووضعت في دليل التصميم بواسطة معهد البترول الفرنسي عام ١٩٨٣م. وتستخدم هذه الطريقة نتائج اختبارات مقياس الضغط ذي الحفر الذاتي (SBPMT). ويتم الحصول على منحنى $P-y$ عند عمق z لخازوق بأخذ النقاط من منحنى التمدد لمقياس الضغط $(p^*-1/2\Delta V/V_0)$ عند نفس العمق Z كالتالي :

$$(٢٥٣) \quad P = \eta p^* B$$

$$(٢٥٤) \quad y = \frac{1 \Delta V}{2 V_0} R$$

حيث إن P هي مقاومة التربة على الخازوق، ويعبر عنها كقوة لكل وحدة طول للخازوق، η معامل المقاومة الجانبية ويتغير من ٠,٣٣ إلى ٣ (IFP, 1983)، p^* الضغط الصافي $(P - P_0)$ في منحنى مقياس الضغط، P الضغط على جدار تجويف التربة في اختبار مقياس الضغط، p_0 الضغط الأفقي عند بداية الاختبار، y الإزاحة الجانبية للخازوق، R نصف قطر الخازوق، V_0 الحجم الابتدائي للأنبوب الأسطواني و ΔV الحجم المحقون إلى داخل الأنبوب الأسطواني. يضم المعامل η ظواهر العمق الحرج، ويأخذ في الحسبان الاختلاف بين منحنى $P-y$ للخازوق ومنحنى تمدد مقياس الضغط. وقد وضع بوجلين وآخرون عام ١٩٧٨م المقارنات بين منحنيات تمدد SBPMT ومنحنيات $P-y$ للخازوق.

طور كل من بريود، سميث ومير (Briaud et al., 1985d ; Smith 1983) الطريقة السادسة والتي تستخدم نتائج اختبارات مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر، وتعتبر أن منحنى $P-y$ مكوّن من منحنى المقاومة الأمامية $Q-y$ ومنحنى مقاومة الاحتكاك $F-y$ (Briaud et al., 1983c). ويتم الحصول على منحنى $Q-y$ من منحنى مقياس الضغط نقطة بنقطة (منحنى التحميل الأول للإزاحات البسيطة أو بدون إزاحات للخوازيق ومنحنى إعادة التحميل للإزاحة الكاملة للخوازيق) كالتالي :

$$(٢٥٥) \quad Q = SQ \times p^* \times B$$

$$(٢٥٦) \quad y = \frac{\Delta R}{R_0} \times R$$

حيث إن Q هي المقاومة الأمامية للتربة على الخازوق (قوة / وحدة طول للخازوق)، SQ معامل الشكل من نظرية المرونة، p^* الضغط الصافي كما في الطريقة الخامسة، B أو $2R$ قطر الخازوق، y الإزاحة الأفقية للخازوق، ΔR الزيادة في نصف قطر تجويف التربة من نصف قطر التجويف الابتدائي R_0 .

يتم الحصول على منحنى $F-y$ من منحنى إعادة التحميل لمقياس الضغط نقطة بنقطة بطريقة تحت المماس (Baguelin et al., 1978) كالتالي :

$$(٢٥٧) \quad F = SF \times B \times X (1 + X) \frac{\Delta p^*}{\Delta X}$$

$$(٢٥٨) \quad y = \frac{\Delta R}{R_0} \times R$$

حيث إن F هي مقاومة التربة للاحتكاك على الخازوق (قوة / وحدة طول للخازوق)، SF هو معامل الشكل من نظرية المرونة و X هو $\Delta V/V_0$ ؛ حيث إن V_0 هو حجم الأنبوب الأسطواني عند بداية منحنى إعادة التحميل و ΔV الحجم المحقون داخل الأنبوب الأسطواني بعد تلك النقطة. وتحسب الأعماق الحرجة للخازوق ولمقياس الضغط، ومن خلال هذه الأعماق الحرجة يتم التوصية بالمقاطع الرأسية لمعامل التقليل. تم شرح خطوات عمل هذه الطريقة خطوة-خطوة في البند ٦، ١١ وتم تقييم دقتها في البند ٧، ١١. كما تم عرض نسخة مبسطة لهذه الطريقة في البندين ٤، ١١ و ٥، ١١.

طور فوجيرو عام ١٩٨٣م (Kay et al., 1983, 1986) الطريقة السابعة والتي تستخدم نتائج اختبارات مقياس الضغط المدفوع أو ذات الإزاحة الكاملة. إن المتغيرات المستنتجة من اختبار مقياس الضغط، وهي معامل القص G ، قوة القص غير المصرفة S_u ، زاوية الاحتكاك ϕ ومعامل الضغط عند السكون K_0 هي مدخلات نظام العنصر المحدود لشبه ثلاثي الأبعاد. وتنمذج التربة كمادة مرنة خطية ولدنة تماماً. وتمتاز هذه الطريقة بإمكانية نمذجة التربة كمادة متصلة مع بعضها ولها إمكانية التوسع لتشمل

مجموعة خوازيق. وبينت المقارنات بين الأداء المتوقع والمقاس لأربعة خوازيق نتائج مشجعة.

أنشئت الطريقة الثامنة من العمل الذي قام به هجز في أواخر السبعينات (Hughes et al., 1979) ثم جرى تحسينها في جامعة كولومبيا ببريطانيا (Robertson et al., 1982, 1986). وتستخدم هذه الطريقة نتائج اختبارات مقياس الضغط المغروز للخوازيق المغروزة واختبارات مقياس الضغط ذاتي الحفر أو للثقوب مسبقة الحفر للخوازيق المصبوبة في الموقع. ويتم الحصول على المنحنى $P-y$ للخوازيق عند عمق z من منحنى التمدد لمقياس الضغط نقطة بنقطة عند العمق نفسه باستخدام المعادلات ٢٥٣ و ٢٥٤. وتؤخذ قيمة η مساوية لـ ٢ للتربة المتماسكة و ١,٥ للتربة غير المتماسكة. أخذت ظاهرة العمق الحرج في الاعتبار كما في الطريقة السادسة لمقياس الضغط. وقد اقترح أن تكون القيمة الوحيدة للعمق الحرج للخازوق مساوية لأربعة أضعاف قطر الخازوق، أما معاملات التقليل فقد أوصي أن تكون ضمن العمق الحرج. وبينت المقارنات بين الأداء المتوقع والمقاس لحالة سابقة أداء جيداً لهذه الطريقة. يستخدم الاستشاريون Woodward - Clyde Consultants الطريقة التاسعة (Davidson and Bodine, 1986) للخوازيق في التربة الطينية. وتستغل هذه الطريقة طريقة ماتلك وريس (Matlock, 1970, Reese et al., 1974) ونتائج اختبار مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر. وتتطلب طريقة ماتلك وريس قوة القص غير المصرفة S_u والانفعال عند ٥٠٪ من قمة الإجهاد الأقصى ϵ_{50} من أجل رسم منحنيات مختلفة من $P-y$. ويستعمل كل من ديفيد سن وبوداين (Davidson and Bodine, 1986) و S_u والتي تم الحصول عليها من اختبارات مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر وبطريقة جيسن وأندرسن (البند ١, ٨)، و $\epsilon_{50} = S_u/E_R$ للانحرافات أقل من ١,٢ سم حيث إن E_R هو معامل إعادة التحميل لمقياس الضغط و $\epsilon_{50} = S_u/E$ للانحرافات التي تساوي ٢,٥ سم أو أكبر، حيث إن E هو أول معامل تحميل لمقياس الضغط.

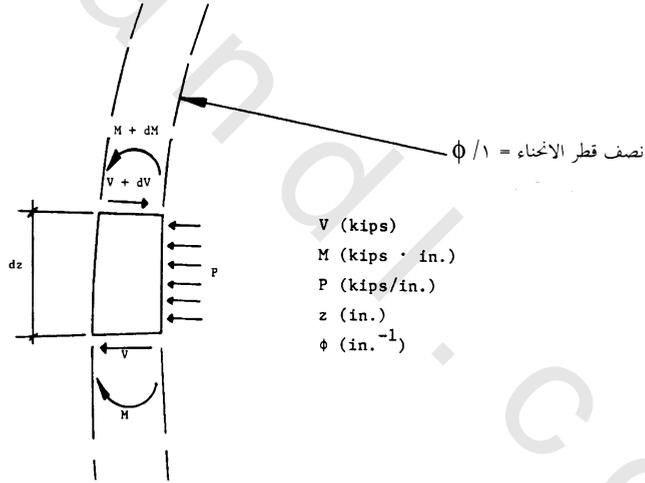
THEORETICAL BACKGROUND (١١,٣) الخلفية النظرية

يستخدم الباحثون لهذه المسألة مجموعتين من المعادلات لتكوين المعادلة التفاضلية المتحكممة وهي المعادلة التكوينية للخازوق ومعادلات الاتزان لعنصر الخازوق. ثم يتم نمذجة التربة لإنهاء العملية.

إن المعادلة التكوينية للخازوق (شكل رقم ١٠٨) هي كالتالي :

$$(٢٥٩) \quad M = EI\phi = EI \frac{d^2y}{dz^2}$$

حيث إن M هو عزم الانحناء عند العمق z ، E معامل المرونة للخازوق، I عزم القصور الذاتي للخازوق حول محور المركز المتوسط لقطاع الخازوق، ϕ تقوس الخازوق، y الإزاحة الأفقية للخازوق و z العمق.



شكل رقم (١٠٨). اتزان عنصر من خازوق.

نلاحظ أن عزم القصور الذاتي تم أخذه حول محور المركز المتوسط لقطاع الخازوق. ففي حالة الخوازيق الخرسانية والتي تتصدع فإن المقطع للخازوق سيقبل تبعاً لذلك. وعندها فمن الضروري أولاً إيجاد محور التعادل لجميع العزوم والأحمال والتي

تشمل الأحمال المحورية لتقدير المقطع غير المتصدع، وبعدها يوجد محور المركز المتوسط للمقطع غير المتصدع ثم يحسب عزم القصور الذاتي عند ذلك المحور. وتكتب معادلة الاتزان للقوى الأفقية لعنصر في الخازوق كالتالي (شكل رقم ١٠٨):

$$dV = P dz \quad (٢٦٠)$$

ومعادلة الاتزان للعزوم لعنصر في الخازوق تكتب كالتالي (شكل ١٠٨):

$$dM = V dz \quad (٢٦١)$$

ويؤدي ضم المعادلات ٢٥٩، ٢٦٠ و ٢٦١ إلى المعادلة التفاضلية المتحكممة وهي كالتالي :

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Q \frac{d^2 y}{dz^2} - P = 0 \quad (٢٦٢)$$

الحمل الموزع P (كيلونيوتن/م) هو الإحداثي الرأسي للمنحني $P-y$ (البند ١١.٢) حيث إن هذا المنحنى يمثل رد التربة. وهو غير خطي ويتغير مع العمق، و بمعنى آخر أن P دالة في y و z . ويتطلب هذا التعقيد إلى استخدام تقنية الاختلاف المحدود لحل المعادلة التفاضلية. ويعرض الملحق د مثلاً لهذه التقنية لحائط ساند. يمكن إيجاد حل افتراضي في صيغة مقفلة إذا افترضنا أن التربة متجانسة وأن المنحنى $P-y$ التابع لها خطي، وهذه هي منهجية معامل طبقة التأسيس.

(١١، ٤) منهجية معامل طبقة التأسيس للخوازيق الطويلة المرنة

SUBGRADE MODULUS APPROACH FOR LONG FLEXIBLE PILES

يفترض هنا أن التربة لها منحنى $P-y$ خطي (شكل رقم ١٠٩) :

$$P = -Ky \quad (٢٦٣)$$

حيث إن P هو رد فعل التربة ولها وحدة حمل لكل وحدة طول للخازوق (كيلونيوتن/م)، K ثابت الزنبرك الأفقي (كيلونيوتن/م^٢)، و y انحراف الخازوق (ملم). وبالإضافة إلى ذلك فقد افترض أن K ثابت ولا يعتمد على العمق (تربة متجانسة).

يعرف معامل طبقة التأسيس الأفقية k (كيلو نيوتن/م^٣) كالتالي :

$$(٢٦٤) \quad \frac{P}{B} = -ky$$

حيث إن B هو عرض الخازوق. وعلى هذا فإن العلاقة بين ثابت الزنبرك الأفقي K ومعامل طبقة التأسيس الأفقي k هي :

$$(٢٦٥) \quad K = kB$$

وقد أوصي بأن يؤخذ ثابت الزنبرك الأفقي K لأول تقريب كالتالي :

$$(٢٦٦) \quad K = E_o + E_R \quad \text{للخوازيق عديمة الإزاحة أو ذات الإزاحة المنخفضة}$$

$$(٢٦٧) \quad K = 2 E_R \quad \text{للخوازيق ذات الإزاحة الكاملة}$$

حيث إن E_o هو معامل التحميل الأولي لمقياس الضغط و E_R معامل إعادة التحميل. إن الخوازيق عديمة الإزاحة هي الخوازيق المصبوبة في الموقع، أما الخوازيق ذات الإزاحة المنخفضة فهي الخوازيق على شكل H والخوازيق الأنبوبية غير المسدودة. ونلاحظ أن الخازوق الأنبوبي الذي يتعرض للانسداد عند اختراقه أكثر من ٥ إلى ١٠ أضعاف قطر الخازوق يجب أن يعتبر غير مسدود لأغراض التحميل الأفقي. وبالفعل فإن المنطقة من ٥ إلى ١٠ أضعاف قطر الخازوق قرب سطح الأرض والتي تتحكم في السلوك الأفقي للخازوق، تتعرض إلى إزاحات منخفضة فقط. أما الخوازيق ذات الإزاحة الكاملة فهي على سبيل المثال الخوازيق الخرسانية سابقة الإجهاد والخوازيق الأنبوبية مقلدة الأطراف.

يتم اختيار ثابت الزنبرك الأفقي K بعد إعداد القطاع الرأسي لـ K مقابل العمق (المثال رقم ٢ في الملحق هـ). ويجب أن تختار قيمة K كقيمة متوسطة معتدلة ضمن المنطقة المتأثرة قرب سطح الأرض.

تشير المعادلتان ٢٦٦ و ٢٦٧ إلى أن K لا تعتمد على قطر الخازوق، نظراً لأن

هذا يتوافق مع نظرية المرونة، لقاعدة طويلة على سطح حيز نصفني، والتي تعطي :

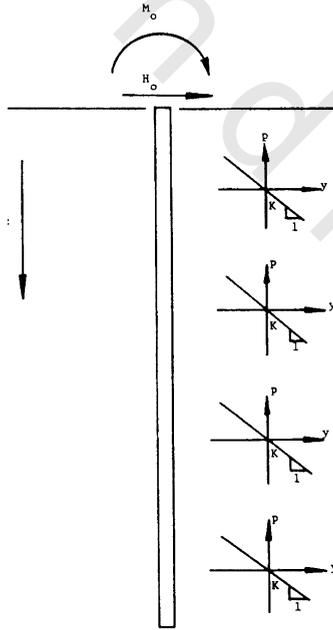
$$(٢٦٨) \quad s = I \frac{qB}{E}$$

حيث إن I هو معامل التأثير، q الضغط تحت القاعدة، B عرض القاعدة و E معامل التربة. إن حاصل الضرب qB هو حمل لكل وحدة طول (كيلونيوتن/م) وثابت الزنبرك هو :

$$K = \frac{P}{s} = \frac{E}{I} \quad (٢٦٩)$$

تشابه الخوازيق الطويلة المحملة أفقياً في الشكل مع القواعد المستمرة حيث إن المتغير I هو معامل التأثير للشكل و K يتناسب مع معامل التربة. وعلى هذا فيمكن اعتبار أن ثابت الزنبرك الأفقي K للخوازيق الطويلة المحملة أفقياً كخاصية للتربة. وهذه الحالة لا تنطبق على معامل طبقة التأسيس الأفقي k الذي يعتمد على صلابة التربة و قطر الخازوق (المعادلة ٢٦٥).

والفرضيات التي وضعت هي كالتالي :



شكل رقم (١٠٩). الافتراضيات لطريقة (منهجية) معامل طبقة التأسيس.

١- إن المنحنيات $P - y$ خطية.

٢- إن التربة متجانسة (جميع منحنيات $P - y$ متماثلة).

٣- إن الخازوق ذو طول لا نهائي.

سيناقش القصور الناتج عن هذه الفرضيات في نهاية هذا البند. وبهذا فإن المعادلة

التفاضلية المتحكمة هي كالتالي :

$$(٢٧٠) \quad EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Ky = 0$$

أو

$$(٢٧١) \quad y + \frac{l_o^4}{4} \frac{d^4 y}{dz^4} = 0$$

مع

$$(٢٧٢) \quad l_o = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}}$$

يطلق على المتغير l_o طول النقل. ويعتبر الخازوق لا نهائي الطول إذا كان :

$$(٢٧٣) \quad L \geq 3l_o$$

حيث إن L هو طول الخازوق المدفون. ويجب أن يستوفى هذا الشرط لتطبيق الحل. شروط النهايات هي :

$$(٢٧٤) \quad \text{عند } z = \infty \quad \text{فإن } y = 0$$

$$(٢٧٥) \quad \text{عند } z = 0 \quad \text{فإن } V = H_o \text{ و } M = M_o$$

حيث إن M_o و H_o هما الحمل الأفقي والعزم المطبق عند سطح الأرض على التوالي. بمعلومية شروط النهايات فإن حل المعادلة التفاضلية (Baguelin et al., 1978) كالتالي :

$$(٢٧٦) \quad y_{(z)} = \frac{2H_o}{l_o K} e^{-\frac{z}{l_o}} \cos \frac{z}{l_o} + \frac{2M_o}{l_o^2 K} e^{-\frac{z}{l_o}} \left(\cos \frac{z}{l_o} - \sin \frac{z}{l_o} \right)$$

وبهذا فإن الانحراف عند سطح الأرض هو :

$$(٢٧٧) \quad y_o = \frac{2H_o}{l_o K} + \frac{2M_o}{l_o^2 K}$$

إن الحل للميل y' هو :

$$(٢٧٨) \quad y'_{(z)} = \frac{2H_o}{l_o K} e^{-\frac{z}{l_o}} \left(\cos \frac{z}{l_o} + \sin \frac{z}{l_o} \right) - \frac{4M_o}{l_o^3 k} e^{-\frac{z}{l_o}} \cos \frac{z}{l_o}$$

والميل عند سطح الأرض هو :

$$(٢٧٩) \quad y'_o = -\frac{2H_o}{l_o^2 K} - \frac{4M_o}{l_o^3 K}$$

إن الحل لعزم الانحناء M هو :

$$(٢٨٠) \quad M_{(z)} = H_o l_o e^{-\frac{z}{l_o}} \sin \frac{z}{l_o} + M_o e^{-\frac{z}{l_o}} \left(\cos \frac{z}{l_o} + \sin \frac{z}{l_o} \right)$$

عزم الانحناء عند سطح الأرض هو M_o والأكثر أهمية هو إيجاد أقصى عزم الانحناء M_{max} على الخازوق. ويمكن عمل ذلك بإيجاد قيمة z (z_{max}) والتي تحقق $dM/dz = 0$. وبما أن dM/dz هي قوة القص V فإن الحل لـ V يقدم أولاً وهو :

$$(٢٨١) \quad V_{(z)} = H_o e^{-\frac{z}{l_o}} \left(\cos \frac{z}{l_o} - \sin \frac{z}{l_o} \right) - \frac{2M_o}{l_o} e^{-\frac{z}{l_o}} \sin \frac{z}{l_o}$$

وعلى هذا فإن z_{max} تعطى :

$$(٢٨٢) \quad H_o e^{-\frac{z_{max}}{l_o}} \left(\cos \frac{z_{max}}{l_o} - \sin \frac{z_{max}}{l_o} \right) - \frac{2M_o}{l_o} e^{-\frac{z_{max}}{l_o}} \sin \frac{z_{max}}{l_o} = 0$$

أو

$$(٢٨٣) \quad \tan \frac{z_{max}}{l_o} = \frac{1}{1 + \frac{2M_o}{l_o H_o}}$$

نلاحظ أن z_{max}/l_o يعبر عنه بالراديان وليس بالدرجات.

عند تعرض خازوق لحمل أفقي فقط ($M_o = 0$) فإن $z_{max} = 0.785 l_o$ و $M_{max} = 0.323$

$H_o l_o$. ومن ناحية أخرى لو تعرض الخازوق إلى عزم فقط ($H_o = 0$) فعندئذ $z_{max} = 0$

و $M_{max} = M_o$. وفي الحالة العامة ($H_o \neq 0, M_o \neq 0$) يتم إيجاد قيمة z_{max}/l_o من المعادلة ٢٨٣

وإستخدامها في معادلة عزم الانحناء رقم ٢٨٠ لإيجاد M_{max} .

نلاحظ أن الانحراف y_o يتأثر بـ K أكثر من تأثره من عزم الانحناء M_{max} . وبالفعل لو تعرض خازوق إلى حمل أفقي فقط ($M_o = 0$) فإن قيمة y_o تتغير مع $K^{3/4}$ بينما M_{max} تتغير مع $K^{1/4}$. وهذا يعني، في هذه الحالة أنه لو وجد خطأ في قيمة K بعامل ٢ فإن الخطأ الناتج في y_o سيكون بعامل ١,٦٨ و M_{max} بعامل ١,١٩. ومن ناحية أخرى عند تعرض الخازوق إلى عزم فقط ($H_o = 0$) فعندئذ سيتغير y_o مع $K^{1/2}$ ، بينما لا يتأثر M_{max} بـ K ($M_{max} = M_o$).

يمكن أيضاً دراسة تأثير EI ، ففي الحمل الأفقي فقط ($M_o = 0$) فإن y_o يتغير مع $EI^{1/4}$ و M_{max} مع $EI^{1/4}$ لذا فإن y_o و M_{max} لا تتأثر كثيراً بقيمة EI ، أما في حالة العزم فقط ($H_o = 0$) فإن y_o يتغير مع $EI^{1/2}$ بينما لا تتأثر M_{max} بـ EI .

عند التأكد من الثبات الحقيقي للطرف العلوي للخازوق فإن $y'_o = 0$ ، ويمكن الحصول على عزم الانحناء M_o عند نقطة اتصال الطرف الثابت من المعادلة ٢٧٩. وفي الحالة المتوسطة بين الطرف الثابت والحر، فإن اتصالية هيكله الخازوق يجب أن تميز باستخدام علاقات منفصلة بين y'_o و M_o ويصبح من الضروري استخدام التكرارية.

يمكن الحصول على الحمل لكل وحدة طول للخازوق P (رطل/بوصة) من الانحراف y (بوصة) عند أي عمق بالعلاقة :

$$P = Ky \quad (٢٨٤)$$

وعند السطح بالعلاقة :

$$P_o = Ky_o \quad (٢٨٥)$$

والضغط المتوسط p_o على الخازوق قرب سطح الأرض بالعلاقة :

$$p_o = \frac{Ky_o}{B} \quad (٢٨٦)$$

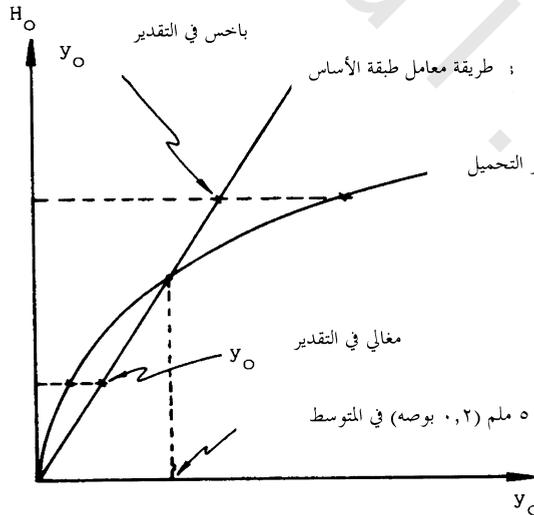
يقارن الضغط p_o بالضغط النهائي للتربة P_L للتقليل من مشكلة الزحف من الضغط p_o قرب سطح الأرض تحت ضغوط أفقية مستمرة. ويجب أن تكون النسبة P_L/P_o تساوي ٢ أو أكثر. ويعرض في الملحق هـ مثال لهذه الحسابات.

تطبق المنهجية السابقة في حالة الخوازيق المرنة الطويلة والمعرفة بالشرط التالي :

(٢٨٧)

$$L > 3l_0$$

حيث إن L هو طول الخازوق المدفون و l_0 طول النقل (المعادلة ٢٧٢). إن الحل المقدم بالمعادلة ٢٧٦ يناظر الخط المستقيم لرسمه H_0 مقابل y_0 (شكل رقم ١١٠) ولكن في الواقع هذه الرسمه توضح انحناءة، وعلى هذا فإن حل الخط المستقيم للمعادلة ٢٧٦ يتقاطع مع الرسمه الحقيقية في نقطة واحدة. وبناء على قيم K الموصى بها (المعادلتان ٢٦٦ و ٢٦٧) فإن هذه النقطة تناظر الانحراف الأفقي y_0 والذي يساوي في المتوسط ٥ ملم. ويعتمد هذا البيان على ثلاث مقارنات مع اختبارات التحميل بالحجم الطبيعي (Gan and Briaud, 1987) وسبع مقارنات مع اختبارات التحميل بالحجم الطبيعي (Hossain, 1989). ولو كان الانحراف أقل من ٥ ملم فمن المحتمل أن يكون الانحراف مبالغاً في تقديره، أما إذا كان الانحراف أكثر من ٥ ملم فمن المحتمل أن يكون الانحراف قد قدر بأقل مما يجب. تأتي التوصيات لـ K من التبسيط في التوصيات التفصيلية لإنشاء منحنيات $P-y$ باستخدام منحنيات مقياس الضغط للثقوب مسبقه الحفر.



شكل رقم (١١٠). تقويم توقع معامل طبقة التأسيس.

(١١،٥) منهجية معامل طبقة التأسيس للخوازيق القصيرة الصلبة

SUBGRADE MODULUS APPROACH FOR SHORT RIGID PILES

تم تقديم الفرضيات التالية :

١- إن منحنيات $P-y$ خطية ،٢- إن التربة متجانسة (جميع منحنيات $P-y$ متماثلة) ،

٣- إن الخازوق صلب ، وعلى هذا لا يوجد أي تقوس فيه .

وبناء على هذه الفرضيات فقد اقترح بوجلين وآخرون (Baguelin et al., 1978) حلاً

على النحو التالي. تؤدي الفرضية الأولى إلى :

$$P = -Ky \quad (٢٨٨)$$

تنص الفرضية الثانية على أن K هو ثابت لا يعتمد على العمق. أما الفرضية الثالثة والتي توضح حقيقة صلابة الخازوق تدل على أن تغير y مقابل العمق هو تغير خطي .

$$y = Rz + S \quad (٢٨٩)$$

ويعتبر الخازوق صلباً إذا كان الطول المدفون L أصغر أو يساوي طول النقل .

$$L \leq l_o \quad (٢٩٠)$$

حيث إن :

$$l_o = 4\sqrt{\frac{EI}{K}} \quad (٢٩١)$$

 E هو معامل الخازوق ، I عزم القصور الذاتي (انظر البند ٣، ١١) و K ثابت الزنبرك الأفقي للتربة. وكما هو للخوازيق المرنة الطويلة فإن :

$$K = E_o + E_R \quad (٢٩٢)$$

$$K = 2E_R \quad (٢٩٣)$$

حيث إن E_o و E_R هما معاملتا التحميل الأولي وإعادة التحميل لمقياس الضغط للثقوب مسبقاً الحفر على التوالي. يتم اختيار القيمة المناسبة لـ K كقيمة معتدلة قرب السطح من القطاع الرأسي لـ K مقابل العمق.

يحسب القص في الخازوق (Baguelin et al., 1978) بهذه الفرضيات كالتالي :

$$(٢٩٤) \quad V = H_o - \int_o^z P dt$$

أو

$$(٢٩٥) \quad V = H_o + KR \frac{z^2}{2} + KSz$$

ويعطي أيضاً عزم الانحناء كالتالي :

$$(٢٩٦) \quad M = M_o + H_o z - \int_o^z P(z-t) dt$$

أو

$$(٢٩٧) \quad M = M_o + H_o z + KR \frac{z^3}{6} + KS \frac{z^2}{2}$$

وشروط النهايات هي :

$$(٢٩٨) \quad \text{عند } z=L \text{ فإن } V=0 \text{ و } M=0$$

يؤدي هذا إلى القيم التالية لـ R و S (Baguelin et al., 1978):

$$(٢٩٩) \quad R = + \frac{6(H_o L + 2M_o)}{KL^3}$$

$$(٣٠٠) \quad S = - \frac{2(2H_o L + 3M_o)}{KL^2}$$

إن الإزاحة عند سطح الأرض هي :

$$(٣٠١) \quad y_o = S = \frac{-2(2H_o L + 3M_o)}{KL^2}$$

والميل عند سطح الأرض هو :

$$(٣٠٢) \quad y'_o = \left(\frac{dy}{dz} \right)_o = R = + \frac{6(H_o L + 2M_o)}{KL^3}$$

نلاحظ أن الميل y' هو ثابت ولا يعتمد على z نظراً لعدم وجود تقوس في الخازوق.يمكن إيجاد أقصى عزم انحناء M_{max} وذلك أولاً بتحديد العمق z_{max} والذي يتواجد عندها M_{max} . توجد قيمة z_{max} بوضع $V_{(z)} = 0$.

$$(٣٠٣) \quad V = H_o + KR \frac{z_{max}^2}{2} + KSz_{max} = 0$$

والتي تؤدي إلى :

$$(٣٠٤) \quad z_{\max} = -\frac{2S}{R} - L = -\frac{2y_o}{y'_o} - L$$

وعندئذ يحسب أقصى عزم انحناء كالتالي (المعادلة ٢٩٧) :

$$(٣٠٥) \quad M_{\max} = M_o + H_o z_{\max} + KR \frac{z_{\max}^3}{6} + KS \frac{z_{\max}^2}{2}$$

يمكن إبداء العديد من الملاحظات على المتغيرات المحسوبة. يتغير كل من الانحراف y_o والميل y'_o خطياً مع M_o, H_o, K . وعلى هذا فمن المهم جداً الحصول على قيمة دقيقة لـ K للخوازيق القصيرة الصلبة وأكثر أهمية للخوازيق الطويلة المرنة.

يمكن الحصول على الحمل لكل وحدة طول من خازوق P (كيلونيوتن/م) من الانحراف y (ملم) عند أي عمق كالتالي :

$$(٣٠٦) \quad P = -Ky = -KRz - KS$$

وعند السطح كالتالي :

$$(٣٠٧) \quad p_o = -Ky_o$$

ومتوسط الضغط على الخازوق قرب سطح الأرض كالتالي :

$$(٣٠٨) \quad p_o = \frac{-Ky_o}{B}$$

للتقليل من مشكلة الزحف تحت الحمل الأفقي المستمر يقارن الضغط P_o مع الضغط النهائي للتربة قرب سطح الأرض. والمعامل F هو كالتالي :

$$(٣٠٩) \quad F = \frac{P_L}{P_o}$$

يجب أن يكون معامل الأمان هذا مساوياً ٢ أو أكبر. ويعرض الملحق ه مثالاً للحسابات السابق ذكرها.

(١١, ٦) منهجية منحني $P-y$: الطريقة

$P-y$ CURVE APPROACH: THE PROCEDURE

توجد أمثلة معروضة في الملحق (و). كما يوجد برنامج حاسب آلي يدعى

PYPMT يؤدي الحسابات ألياً (Little et al. , 1986).

افتراض في البندين السابقين بأن المنحنى $P-y$ كان خطياً ويطبق نفس المنحنى لجميع الأعماق، ولكن في الحالة العامة فإن المنحنى $P-y$ ليس خطياً كما توجد عدة منحنيات مختلفة من $P-y$ عند أعماق مختلفة. وهذه هي الحالة التي سنتطرق إليها فيما يلي.

(١١, ٦, ١) آلية $F-y/Q-y$ mechanism

يستمد الخازوق المحمل جانبياً معظم مقاومته من المقاومة الأمامية Q ومن مقاومة الاحتكاك F عند سطح التماس بين الخازوق والتربة (شكل رقم ١١١)، ولكليهما وحدة قوة لكل وحدة طول. وعلى أي جزء من منطقة التماس بين الخازوق والتربة يوجد إجهاد قصي $\tau_{r\theta}$ وإجهاد متعامد σ_{rr} (شكل رقم ١١١). إن القوة الجزئية لكل وحدة طول للخازوق dF ناتجة من المركبة $\tau_{r\theta}$ في اتجاه قوة القص P (شكل رقم ١١١) هي:

$$dF = \tau_{r\theta} \sin\theta \, d\theta \quad (٣١٠)$$

وبالمثل فإن القوى الجزئية الناتجة عن σ_{rr} هي:

$$dQ = \sigma_{rr} r_o \cos\theta \, d\theta \quad (٣١١)$$

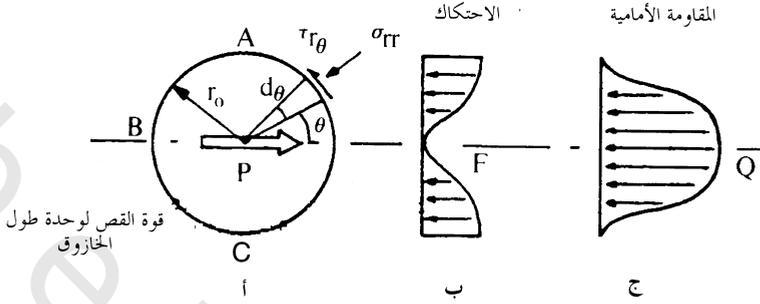
وكذلك

$$Q = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \sigma_{rr} r_o \cos\theta \, d\theta \quad (٣١٢)$$

لم يؤخذ في الاعتبار وجود المقاومة الأمامية أو مقاومة الاحتكاك خلف الخازوق (الخط ABC في شكل رقم ١١١). وقد قدم بوجلين وآخرون (Baguelin et al., 1977) التعبيرات التالية لكل من $\tau_{r\theta}$ و σ_{rr} للتربة المرنة الخطية:

$$\sigma_{rr(\max)} = \frac{P}{2r_o} \text{ و } \sigma_{rr} = \sigma_{rr(\max)} \cos\theta \quad (٣١٣)$$

$$\tau_{r\theta(\max)} = \frac{P}{2r_o} \text{ و } \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta(\max)} \sin\theta \quad (٣١٤)$$



شكل رقم (١١١). توزيع الاحتكاك والمقاومة الأمامية.

ويؤدي استخدام المعادلات ٣١٠ إلى ٣١٤ إلى :

$$(٣١٥) \quad Q = \sigma_{rr(\max)} \times 2r_o \times \frac{\pi}{4}$$

وكذلك

$$(٣١٦) \quad F = \tau_{r\theta(\max)} \times 2r_o \times \frac{\pi}{4}$$

مقاومة التربة الكلية P للحركة الجانبية y لعنصر الخازوق هي جمع المقاومة الأمامية Q ومقاومة الاحتكاك F ، ونتيجة لذلك فإن المنحنى $P-y$ هو ناتج جمع المنحنى $Q-y$ والمنحنى $F-y$.

(١١، ٦، ٢) الدليل التجريبي Experimental evidence

يوضح شكل رقم (١١٢) مثلاً لوجود المركبتين. حمل جانبياً خازوق مصبوب في الموقع بقطر ٠.٩ م في تربة طينية صلبة لها قوة قص غير مصرفة أخذت من تجارب الضغط غير المحصور بقيمة متوسطة تساوي ١٠٠ كيلو باسكال (Kasch et al., 1977). تم تركيب خلايا قياس الضغط على عمود الخازوق لتسجيل الضغط الأمامي كما هو موضح في شكل رقم (١١٢) ثم حمل الخازوق. يوضح شكل رقم (١١٢) منحنى الحمل-الانحراف الناتج. عند حمل أفقي مقداره ٤٢١ كيلو نيوتن على ارتفاع ٠.٧٥ م من سطح الأرض تم حساب مقاومة التربة الناتجة من رد الفعل الأمامي وذلك من

القراءات المأخوذة من خلية قياس الضغط واستخدام المعادلة ٣١٥، وحساب المساحة تحت الرسم البياني لـ $\sigma_{rr(max)}$ مقابل العمق. ولا يمكن استيفاء اتزان العزم والاتزان الأفقي إذا أخذ في الاعتبار المقاومة الأمامية فقط. وتحسب مقاومة التربة نتيجة الاحتكاك باستخدام المعادلة التالية :

$$F = \tau_{r\theta(max)} \times 2r_o \times 1 \quad (317)$$

تسمح المعادلة ٣١٧ بوجود احتكاك كافٍ خلف الخازوق (الخط المنقط في شكل رقم ١١٢) لرفع معامل الشكل من $\pi/4$ في المعادلة ٣١٦ إلى ١ في المعادلة ٣١٧. وقد افترض أيضاً أن $\tau_{r\theta(max)}$ كان مساوياً نصف مقاومة الضغط غير المحصور. وبمعنى آخر فقد افترض أنه عند تلك النقطة في اختبار التحميل الجانبي تكون المقاومة الكاملة للاحتكاك قد استهلكت. وبعد ضم قوى الاحتكاك (شكل رقم ١١٢) التابعة لمقاومة القص الكلية للتربة الطينية الصلبة يمكن الوفاء التقريبي لكل من اتزان العزم والاتزان الأفقي. وهناك حالات تاريخية أخرى مشابهة حللت وأثبت وجود الاحتكاك والمقاومة الأمامية (Briaud et al., 1983c). ويدل هذا المثال على نقطتين :

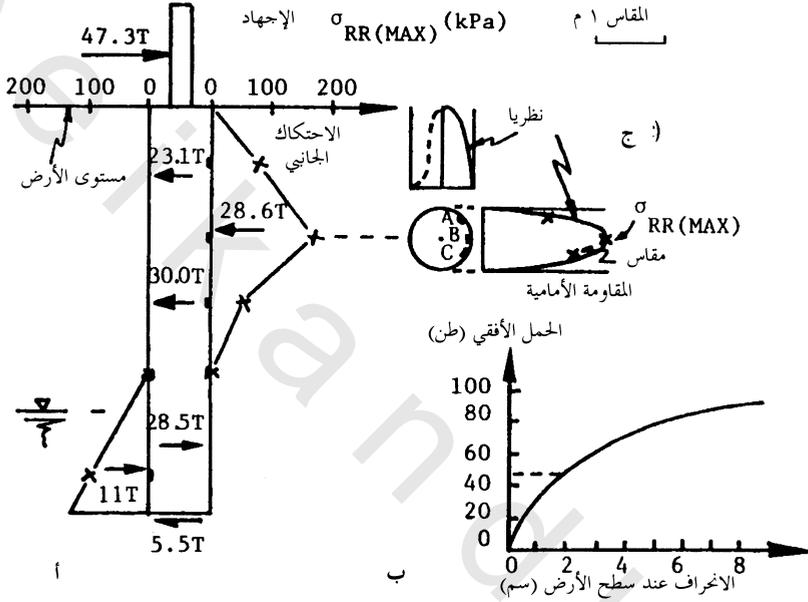
- ١ - مقاومة الاحتكاك أهم جزء في المقاومة الكلية.
 - ٢ - مقاومة الاحتكاك تستهلك كلياً قبل المقاومة الأمامية وذلك لأنها تحتاج إلى إزاحة أقل حتى تستهلك مقاومة الاحتكاك من المقاومة النقطية.
- وعلى هذا فإن النموذج المناسب للتربة هو الذي يميز بين الاحتكاك والمقاومة الأمامية.

(١١, ٦, ٣) منحنى Q-y ومنحنى مقياس الضغط

The Q-y curve and the pressuremeter curve

وجد الباحثون أن التوزيع النظري للقوى الجزئية dQ تطابق القوى المقاسة والمسجلة عند خلايا قياس الضغط الثلاث (A, B, C) في شكل رقم ١١٢) على العمود الأسطواني للخازوق خلال تجربة التحميل. ويؤيد هذا إمكانية استخدام المعادلة ٣١٥ عند الحصول على $\sigma_{rr(max)}$. وقد أجريت تجارب مقياس الضغط على ثقب مسبق

الحفر وقورنت منحنيات مقياس الضغط مع أداء خلايا قياس الضغط التي قامت بقياس $\sigma_{rr(max)}$ على العمود الأسطواني.



شكل رقم (١١٢). اختبار تحميل الخازوق المصبوب في الموقع لجامعة تكساس A & M.

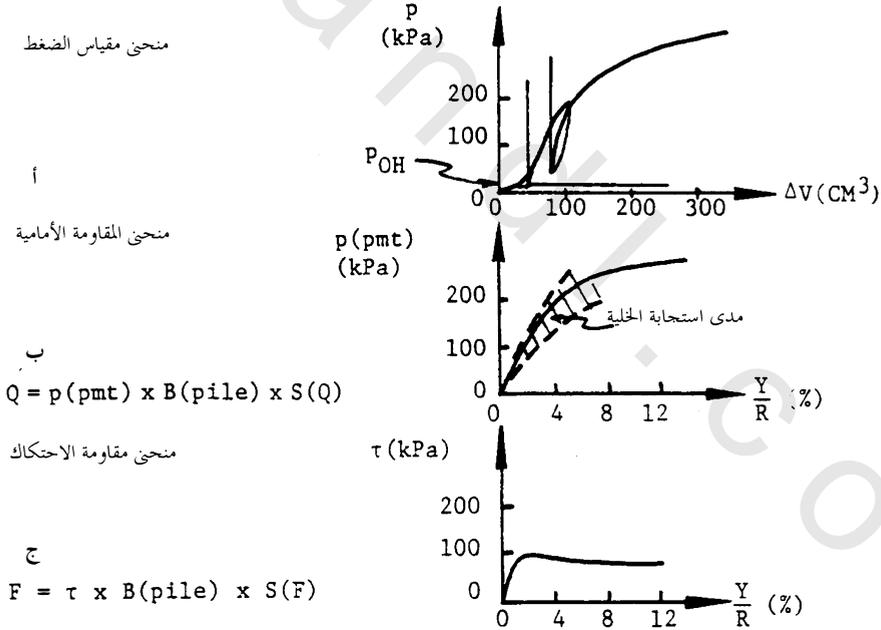
يبين شكل رقم (١١٣) المقارنة بين قياس خلية الضغط عند الجهة الأمامية للخازوق وقياس مقياس الضغط. وبالنسبة لخلايا التحميل فإن الضغط P هو ضغط الخلية $[\sigma_{rr(max)}]$ و y/R هي الحركة الجانبية للخلية y مقسومة على نصف قطر الخازوق R . يبين شكل رقم (١١٣) التوافق الجيد بين خلايا الضغط وتجاوب مقياس الضغط (Smith, 1983). يثبت هذا أن منحنى تجربة مقياس الضغط والتي أجريت في ثقب مسبق الحفر يتشابه كثيراً مع رد فعل خلية الضغط الأمامية للخازوق المصبوب في الموقع. ويتم الحصول على نموذج المقاومة الأمامية للطريقة المقترحة على النحو التالي :

$$(٣١٨) \quad Q_{(front)} = p_{(pmt)} \times B_{(pile)} \times S_{(Q)}$$

حيث إن $Q_{(front)}$ هي مقاومة التربة نتيجة رد الفعل الأمامية (قوة/وحدة طول الخازوق)، $p_{(pmt)}$ الضغط الصافي لمقياس الضغط، $B_{(pile)}$ قطر الخازوق و $S_{(Q)}$ معامل الشكل والذي يساوي ١ للخوازيق المربعة و $\pi/4$ للخوازيق الدائرية.

$$(٣١٩) \quad y_{(pile)} = y_{(pmt)} \times \frac{R_{(pile)}}{R_{(pmt)}}$$

حيث إن $y_{(pile)}$ هي الانحناء الجانبية للخازوق، $R_{(pile)}$ نصف قطر الخازوق، $y_{(pmt)}$ الزيادة في نصف قطر تجويف التربة في اختبار مقياس الضغط، $R_{(pmt)}$ نصف القطر الابتدائي لتجويف التربة في اختبار مقياس الضغط.



شكل رقم (١١٣). الحصول على المنحنيات $Q-y$ و $F-y$ من منحنى مقياس الضغط.

نتوقع أن يكون منحنى $Q-y$ الناتج مختلفاً عن الخازوق المصبوب في الموقع في نفس التربة لو كان الخازوق مدفوعاً داخل التربة. ويبدو أنه في حالة الخازوق المصبوب في الموقع فإن الثقب مسبق الحفر لمقياس الضغط مناسب، أما في حالة الخازوق مغلق النهاية والمدفوع فإنه من المناسب دفع مقياس الضغط في التربة. أو يمكن أن يحفر الثقب ثم يمدد مقياس الضغط للمرة الأولى ليشابه دفع الخازوق ويمددها مقياس الضغط للمرة الثانية. ويمكن أن يستتج المنحنى $Q-y$ للخازوق المدفوع من جزء إعادة التحميل لمنحنى مقياس الضغط.

(٤, ٦, ١١) منحنى $F-y$ ومنحنى مقياس الضغط

The $F-y$ curve and the pressuremeter curve

يعطى الاحتكاك على جوانب الخازوق بناء على الاعتبارات النظرية والمعملية السابقة تبعاً للطريقة المقترحة :

$$(٣٢٠) \quad F_{(side)} = \tau_{(soil)} \times B_{(pile)} \times S_{(F)}$$

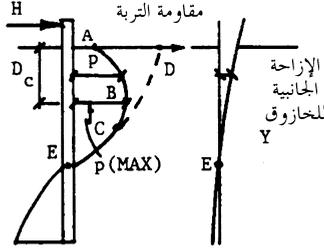
حيث إن $F_{(side)}$ هو مقاومة التربة نتيجة مقاومة الاحتكاك، $B_{(pile)}$ قطر الخازوق، $S_{(F)}$ معامل الشكل ويساوي ٢ للخوازيق المربعة و ١ للخوازيق الدائرية و $\tau_{(soil)}$ أقصى إجهاد قص للتربة عند سطح تماس الخازوق مع التربة.

سبق الإشارة إلى أنه يمكن الحصول على منحنى الإجهاد-الانفعال من منحنى مقياس الضغط ذاتي الحفر بالطريقة النظرية والتي تدعى بطريقة تحت المماس (Baguelin et al., 1978). ويؤدي تطبيق طريقة تحت المماس لمنحنى اختبار مقياس الضغط أجري في ثقب مسبق الحفر (اختبار مقياس الضغط للثقوب مسبق الحفر) إلى قيم لمعاملات القص أقل كثيراً مما يجب وإلى قيم للحد الأعلى لمقاومة القص أعلى كثيراً مما يجب. يؤدي تطبيق هذه النظرية على منحنى إعادة التحميل لاختبار مقياس

الضغط للثقوب مسبقه الحفر (شكل رقم ١١٣) إلى قيم لمعاملات القص مماثلة لقيم اختبار مقياس الضغط للثقوب مسبقه الحفر. وكنتيجه للمنهجية المقترحة فإن جزء إعادة التحميل لمنحنى مقياس الضغط للثقوب مسبقه الحفر يستخدم للحصول على منحنى $\tau_{(soil)}$ مقابل $y_{(pmt)}/R_{(pmt)}$ (شكل رقم ١١٣).

(١١,٦,٥) العمق الحرج : الظاهرة الطبيعية Critical depth : the phenomenon

تتكون منطقة تحت سطح الأرض مباشرة تقل فيها مقاومة التربة الجانبية عندما يحمل الخازوق جانبياً حتى الانهيار، وتمتد هذه المنطقة إلى العمق الحرج D_c ، ينعدم فوق هذا العمق الحرج وجود حاجز؛ وذلك لخلو سطح الأرض من الإجهاد الذي يؤثر على مقاومة التربة الجانبية، أما أسفل هذا العمق فيمكن إهمال هذا التأثير، وتدعى مقاومة التربة الجانبية بمقاومة التربة العميقة. يشير النموذج الأساسي والذي تم وصفه في الفقرات السابقة إلى مقاومة التربة العميقة، ويتم الحصول على المقاومة السطحية للتربة فوق العمق الحرج بضرب المقاومة العميقة بمعامل الخفض. وسيتم شرح تقدير العمق الحرج ومعامل الخفض في الفقرتين اللاحقتين. ويمكن تقريب التغيير في مقاومة التربة على طول الخازوق المحمل جانبياً، بالخط المستمر CBA كما هو موضح في شكل رقم (١١٤). وتتزايد الإزاحة الأفقية للخازوق y من النقطة E إلى سطح الأرض وإذا لم يوجد أثر للضعف نتيجة التقارب المحكم للإجهاد الحر عند سطح الأرض، فإن تغير المقاومة في التربة ذات مقاومة ثابتة مع العمق، سيكون كما هو موضح بالخط المنقط CD . وبدلاً من ذلك يتبع توزيع مقاومة التربة الخط CBA مع أقصى $p_{(max)}$ عند العمق الحرج D_c . إن مقاومة التربة p ضمن العمق الحرج أقل من $p_{(max)}$ والنسبة $p/p_{(max)}$ هي معامل الخفض α .



شكل رقم (١١٤). تعريف العمق الحرج للخازوق.

(٦، ٦، ١١) العمق الحرج للخازوق ومعامل الخفض

Pile critical depth and reduction factor

يتم تعريف العمق الحرج D_c بأنه ظاهرة التداخل بين التربة والمنشأة. يستغل الحل ذو الصيغة المغلقة مسألة التداخل للمرونة الخطية معامل التداخل الرئيسي كالتالي:

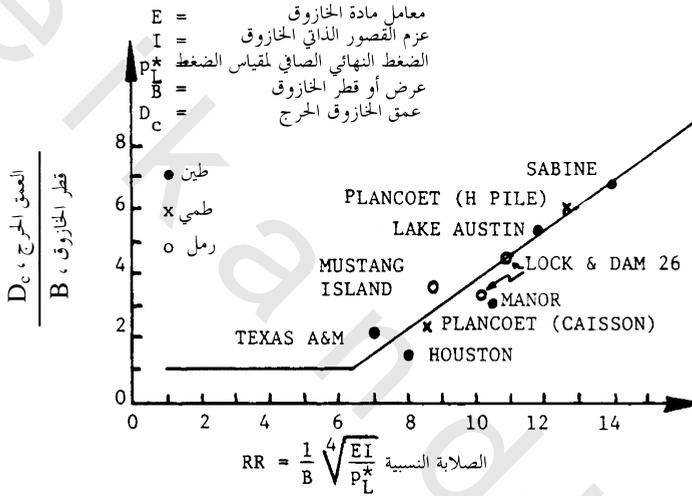
$$(٣٢١) \quad l_o = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}}$$

حيث إن l_o هو طول الخازوق المثقول، E هو معامل مادة الخازوق، I عزم القصور الذاتي للمقطع العرضي للخازوق العمودي على مستوى العزم و K معامل الزنبرك الأفقي للتربة. يعرف معامل التفاعل والذي يسمى بالصلابة النسبية كالتالي:

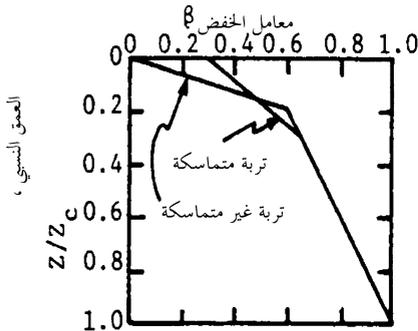
$$(٣٢٢) \quad RR = \frac{1}{B} \sqrt[4]{\frac{EI}{p_L^*}}$$

حيث إن B هو قطر الخازوق و p_L^* الضغط النهائي الصافي لمقياس الضغط ضمن العمق الحرج. إن العلاقة الموجودة في شكل رقم (١١٥) هي لرسم العمق الحرج النسبي D_c/B مقابل الصلابة النسبية بين التربة والخازوق RR لعشرة خوازيق. وتوضح البيانات أن الخوازيق ذات صلابة مختلفة. تكون أعماق في نفس التربة حرجة نسبية مختلفة (الدعامات وخازوق ذو شكل H في طمي بلن كويت)، و يكون نفس الخازوق أعماق حرجة نسبية مختلفة في ترب مختلفة (نفس الخازوق الأنبوبي في سابين

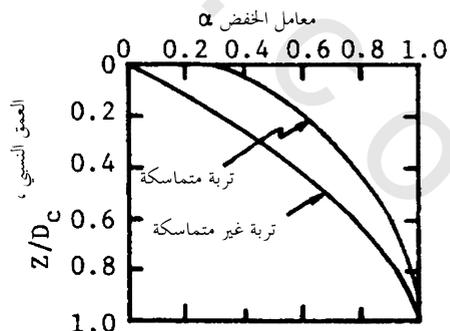
وبحيرة أوستن). ويعرف معامل الخفض ضمن العمق الحرج بـ $p/p_{(max)}$. يوضح شكل رقم (١١٦) القيم الموصي بها لتغير α ضمن العمق الحرج. وقد أخذ في الاعتبار تطبيق معامل الخفض للعمق الحرج للمنحني $Q-y$ فقط وليس للمنحني $F-y$ لأن هذا المنحني $F-y$ يعتبر ظاهرة محصورة جداً. وتستند هذه التوصيات على البيانات العملية المجمعة لأربعة خوازيق في تربة طينية وخازوقين في تربة رملية.



شكل رقم (١١٥). العمق الحرج لخازوق مقابل الصلاية النسبية للتربة - الخازوق.



شكل رقم (١١٧). معامل الخفض لمقياس الضغط.



شكل رقم (١١٦). معامل الخفض للخازوق.

(١١,٦,٧) العمق الحرج ومعامل الخفض لمقياس الضغط

Pressuremeter critical depth and reduction factor

توجد ظاهرة العمق الحرج أيضاً في مقياس الضغط ، حيث ذكر بوجلين وآخرون (Baguelin et al., 1978) أن مقياس الضغط يكون أسفل عمقه الحرج Z_c إذا كان مغموراً على الأقل متراً واحداً في التربة الطينية ومترين في التربة الرملية. يناظر هذا العمق الحرج والمساوي لـ ٣٠ و ٦٠ نصف قطر مقياس الضغط في التربة الطينية والرملية على التوالي ، للأنايب الأسطوانية ذات نصف القطر المألوف والمساوي لـ ٣٥ ملم ويبدو أن البيان الذي صرّح به بوجلين وآخرون عام ١٩٧٨ م يشير إلى الضغط النهائي. وقد أجريت دراسة بطريقة العناصر المحدودة للتحري عن مسألة العمق الحرج لمقياس الضغط عند مستويات صغيرة للانفعال (Smith, 1983). ويؤدي دمج نتائج هذه الدراسة مع ما ذكر آنفاً إلى التوصيات الموضحة في شكل رقم (١١٧) للعمق الحرج ومعامل الخفض لمقياس الضغط.

(١١,٦,٨) خطوات العمل The procedure

- ١- يجرى اختبار مقياس الضغط في ثقب مسبق الحفر في الموقع وعلى مسافات متقاربة وأن يكون العمق يساوي تقريباً ٢٠ قطر الخازوق أو إلى النهاية الطرفية للخازوق ، أيهما أصغر.
- ٢- تصحح منحنيات مقياس الضغط لكل من مقاومة الغشاء المطاطي ، انضغاطية النظام وتأثير العمق الحرج على مقياس الضغط باستخدام المعامل B .
- ٣- يتم الحصول على منحنيات المقاومة الأمامية (Q - γ) باستخدام المعادلتين ٣١٨ و ٣١٩ ومنحنيات مقياس الضغط ، التي تم الحصول عليها في الخطوة الثانية ، كما هو موضح في شكل رقم (١١٣) للخوازيق المصبوبة في الموقع والخوازيق

- المدقوقة ذات الإزاحة الصغيرة. في حالة الخوازيق المدقوقة ذات الإزاحة الكاملة تستخدم منحنيات إعادة التحميل لمقياس الضغط.
- ٤- يطبق معامل الخفض المناسب لأي اختبار ضمن العمق الحرج للخازوق للحصول على المنحنيات $Q-y$ الحقيقية.
- ٥- يتم الحصول على منحنى مقاومة الاحتكاك ($F-y$) وذلك بتطبيق طريقة تحت المماس لمنحنيات إعادة التحميل لمقياس الضغط، وبعد ذلك باستخدام المعادلتين ٣١٩ و ٣٢٠.
- ٦- يتم الحصول على منحنيات $P-y$ وذلك بإضافة المنحنى $Q-y$ والمنحنى $F-y$ عند كل عمق.
- ٧- يضاف منحنى $P-y$ عند النهاية السفلية، لو كان الخازوق قصيراً ($L/B < 3$)، لأخذ الاحتكاك في الاعتبار.
- ٨- ينفذ برنامج الفروق المحدود للحصول على رد فعل الخازوق.
- ويوضح الملحق F مثلاً لإعداد منحنى $P-y$ بهذه الطريقة. ويوجد برنامج حاسب آلي يدعى PYPMT لإعداد منحنى $P-y$ أتوماتيكياً.

(١١,٧) دقة الطريقة PRECISION OF THE METHOD

تستخدم قاعدة بيانات اختبار تحميل خازوق لتحديد دقة الطريقة. يحتوي جدول رقم (٢٣) على قاعدة بيانات تشمل نطاقاً واسعاً من أنواع الخوازيق، تقنيات إدخال الخازوق ومن ضمنها الخوازيق المصبوبة في الموقع، والخوازيق الأنبوبية، والخوازيق على شكل H ، والخوازيق الخرسانية. تتغير أطوال الخوازيق من ٣ متر إلى ٢٥ متراً والأقطار من ٢٧ سم إلى ١٣٧ سم. أما التربة فإنها تشمل التربة الرملية، والطميية، والطينية وتلك التي تتكون من طبقات أفقية.

جدول رقم (٢٣): قاعدة البيانات للخوازيق ذات الحجم الطبيعي والتي عرضت للتحميل الأفقي المستمر.

رقم الخازوق	الموقع	نوع الخازوق	الطول المدفون للخازوق (متر)	قطر الخازوق (متر)	نوع التربة
١	ساين	أنبوب	١٢,٢	٠,٣٢	طيني
٢	جزيرة مستانج	أنبوب	٢١,٠	٠,٦١	رمل
٣	بحيرة أوستن	أنبوب	١٢,٢	٠,٣٢	طيني
٤	هيوستن	مصبوب في الموقع	١٣,٠	٠,٧٦	طيني
٥	تكساس A&M (١٩٧٧ م)	مصبوب في الموقع	٦,١	٠,٩١	طيني
٦	تكساس A&M (١٩٧٨ م)	مصبوب في الموقع	٤,٦	٠,٧٦	طيني
٧	تكساس A&M (١٩٧٩ م)	مصبوب في الموقع	٤,٦	٠,٧٦	طيني
٨	جامعة هيوستن*	H	١١,٨	٠,٢٧	طيني
٩	جامعة هيوستن*	أنبوب	١١,٤	١,٢٢	طيني
١٠	L&D 26 (١٩٨٣ م)	HP 14 x 73	٢٠,٤	٠,٣٦	رمل
١١	L&D 26 (١٩٨٣ م)	HP 14 x 73	٢٠,٤	٠,٣٦	رمل
١٢	L&D 26 (١٩٧٨ م)	H	١٥,٢	٠,٣٦	رمل
١٣	L&D 26 (١٩٧٨ م)	أنبوب	١٥,٢	٠,٣٦	رمل
١٤	فرجينيا	مصبوب في الموقع	٣,٥	١,٣٧	طيني
١٥	كارولاينا	مصبوب في الموقع	٤,٥	١,٣٧	رمل
١٦	ايوا	مصبوب في الموقع	٤,٦	١,٣٧	طيني
١٧	LADWP Delta*	مصبوب في الموقع	٣,٠	٠,٦١	طيني
١٨	LADWP Caliente*	مصبوب في الموقع	٣,٠	٠,٧٤	رمل
١٩	LADWP Alamo*	مصبوب في الموقع	٣,٠	٠,٦٥	طيني
٢٠	بيتن	مصبوب في الموقع	١١,٩	٠,٦١	طيني
٢١	ليكلاند*	مصبوب في الموقع	١٠,٥	٠,٤٦	طيني
٢٢	لابولي ١	خرسانة	٦,٠	٠,٦١	رمل/طيني
٢٣	لابولي ٢	خرسانة	٦,٠	٠,٦١	رمل/طيني
٢٤	بلانكويت	قيسون	٤,٤	٠,٩٥	طمي
٢٥	بلانكويت	H	٦,١	٠,٣٦	طمي

تابع جدول رقم (٢٣).

رقم الخازوق	الموقع	نوع الخازوق	الطول المدفون للخازوق (متر)	قطر الخازوق (متر)	نوع التربة
٢٦	كوبزك	أنبوب	٢٤,٧	٠,٩١	طيني
٢٧	بروفتر	أنبوب	٢٣,٠	٠,٩٣	طيني/عضوي

*نتائج اختبار التحميل غير معروف عند عمل التوقعات

ملاحظة : ٣,٢٨ قدم = ١ متر

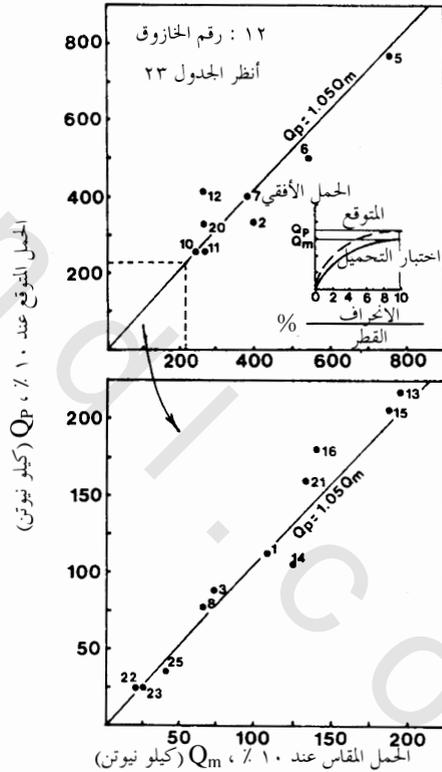
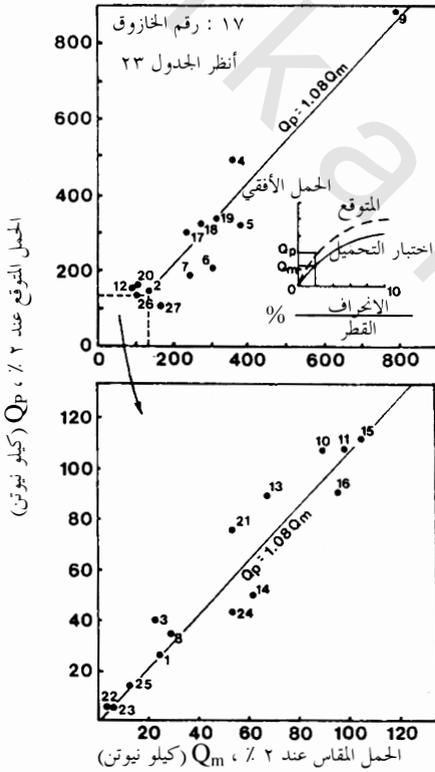
تابع جدول رقم (٢٣).

رقم الخازوق	المرجع
١	Matlock & Tucker, 1961 and Smith, 1983
٢	Reese et al., 1967a and b and Smith, 1983
٣	Matlock et al., 1956 and Smith, 1983
٤	Welch & Reese, 1972 and Smith, 1983
٥	Kasch et al., 1977 and Smith, 1983
٦	Holloway et al., 1978 and Smith, 1983
٧	Bierchwale et al., 1981 and Smith, 1983
٩-٨	O'Neill & Dunnavant, 1984 and Briaud et al., 1985b
١١-١٠	Corps of Engineers, St. Louis District and Briaud et al., 1984a
١٣-١٢	Woodward-Clyde Consultanta, 1979 and Smith, 1983
١٤ إلى ١٦	GAI consultanta, 1982 and Smith, 1983
١٧ إلى ١٩	Los Angeles Department of Water and Power and Briaud et al., 1984c
٢٠	Soil Mechanics, Inc., 1982 and Smith 1983
٢١	Corps of Engineers, Fort Worth District and Briaud Engineers., 1982
٢٣-٢٢	Le Mauff & Peignaud, 1973 and LPC*, 1982
٢٥-٢٤	Baguelin & Jezequel, 1972, LPC*, 1982 and Smith, 1983
٢٦	Ambrosino et al., 1973 and LCPC, 1982
٢٧	Bigot et al., 1982 and LCPC, 1982

LPC = Laboratoire des Ponts et Chaussées

تم إجراء اختبارات مقياس الضغط للثقوب مسبقاً الحفر قرب كل خازوق والحصول على منحنى الحمل الأفقي-الإزاحة الأفقية - المتوقع عند أعلى الخازوق، ورسم على نفس الرسم البياني المنحنى المقاس والذي تم الحصول عليه خلال اختبار

التحميل (شكل رقم ١١٨). تدل أسماء المواقع الملحقة بالنجمة، كما هو في جدول رقم (٢٣) على الحالات التي أرسلت فيها التوقعات إلى المالك قبل استلام نتائج اختبار التحميل. تم مقارنة الأحمال عند الانحراف الأفقي الذي يساوي ١٠٪ (الأقصى) و ٢٪ (حركات بسيطة) من قطر الخازوق للمقارنة بين السلوك المتوقع والسلوك المقاس. يوضح الشكلان رقماً (١١٨ و ١١٩) أن الطريقة المستخدمة لتوقع السلوك المقاس مرضية جداً، مع ملاحظة أن الخوازيق من ١ إلى ٧ قد استخدمت فقط للتطوير الأولى للطريقة.



شكل رقم (١١٩). الأحمال الأفقية المقاسة مقابل الأحمال الأفقية المتوقعة عند انحراف خط الأرض يساوي ٢٪ من قطر الخازوق.

شكل رقم (١١٨). الأحمال الأفقية المقاسة مقابل الأحمال الأفقية المتوقعة عند انحراف خط الأرض يساوي ١٠٪ من قطر الخازوق.

هناك اتجاه متزايد لاستخدام أنواع متعددة من تقنيات إدخال الأنبوب الأسطواني لمقياس الضغط مثل: مقياس الضغط للثقوب مسبقة الحفر، ومقياس الضغط ذو الحفر الذاتي، ومقياس الضغط المخروطي ومقياس ضغط أنبوب شلبي. وعلى هذا يمكن طرح التوصيات التالية: تستخدم طرق القاطع السفلي أكبر من المعتاد للخوازيق المصبوبة في الموقع بالنسبة للطريقة التي تعتمد على نتائج مقياس الضغط ذي الحفر الذاتي لتحقيق الإجهاد الأفقي على الأنبوب الأسطواني الخاص بإنشاء الخازوق المصبوب في الموقع. أما للخوازيق المدقوقة فمن المنطقي نفخ الأنبوب الأسطواني إلى مستوى الإزاحة المقدرة التي يحدثها الخازوق ثم ننتظر فترة للاسترخاء. والطريقة التي تعتمد على نتائج مقياس الضغط المخروطي تطبق مباشرة للخوازيق المدقوقة ذات الإزاحة الكاملة، أما الطريقة التي تعتمد على نتائج مقياس الضغط ذات الثقوب مسبقة الحفر فتطبق مباشرة للخوازيق المصبوبة في الموقع، ولكنه ضروري للخوازيق المدقوقة، وأن يتم نفخه مسبقاً لمستوى الإزاحة الأفقية التي أحدثها الخازوق ثم يتم بعدها الاسترخاء.

يمثل العمل الذي قام به كل من ماتلك وريس (Matlock and Tucker, 1961; Reese et al., 1967a and b; Matlock et al., 1956; Welch and Reese, 1972) من عام ١٩٥٥ إلى ١٩٧٠م خطوة متقدمة رئيسية في حل مشكلة الخوازيق المحملة أفقياً. ويعتقد أنه بإمكان مقياس الضغط أن يقدم خطوة إضافية للأمام؛ وذلك بالسماح لتحسين الجودة والمدى لتطبيق طريقة المنحنى $P-y$ ، حيث إن هذه الطريقة لها عيب ضرورة إجراء اختبارات مقياس الضغط، وهي اختبارات غير روتينية. إن مميزات المنحنيات الحالية $P-y$ هي:

- ١- يتم الحصول على المنحنى من مقياس الضغط والذي أجري في الموقع نقطة بنقطة.
- ٢- يمكن إجراء التجربة لمعظم أنواع التربة والصخور والتي تتضمن: التربة الجيرية، والمتجمدة، والعضوية، والصخور.

٣- يمكن محاكاة طريقة إنشاء الخازوق بطريقة مقياس الضغط ؛ فمثلاً الثقوب مسبقة الحفر للخوازيق التي تصب في الموقع والأنابيب الأسطوانية المدقوقة للخوازيق المدقوقة.

٤- يمكن تمثيل نوعية التحميل بسهولة خلال اختبار مقياس الضغط والتي تشمل : الأحمال المستمرة طويلة المدى ، والأحمال الدورية ، وتأثيرات معدل التحميل.

(١١,٨) القاعدة الإبهامية (قاعدة الضغط على الإبهام) لتقدير السلوك الأفقي

RULE OF THUMB TO ESTIMATE THE HORIZONTAL BEHAVIOR

يتم تعريف الحمل الأفقي الأقصى Q_u بأنه الحمل الذي يصل عندما يساوي الانحراف الأفقي للخازوق عُشر قطره على أن لا يكون الخازوق مجهداً زيادة عن اللزوم عند الوصول إلى تلك النقطة. وبمعنى آخر فإن الحمل الأقصى هو الأقصى للتربة لخازوق ما وليس الحمل الأقصى للخازوق. ويمكن تقدير الحمل الأقصى تقريباً كالتالي :

$$(٣٢٣) \quad Q_u = P_L B D_c$$

حيث إن B هو قطر الخازوق ، P_L متوسط الضغط النهائي الصافي ضمن العمق الحرج للخازوق D_c . وتحسب قيمة D_c من المعادلات التالية (أو من الشكل رقم ١١٥) :

$$(٣٢٤) \quad \frac{1}{B} \sqrt[4]{\frac{EI}{P_L}} \leq 6.33 \quad \text{لو كان} \quad D_c = B$$

$$(٣٢٥) \quad \frac{1}{B} \sqrt[4]{\frac{EI}{P_L}} > 6.33 \quad \text{لو كان} \quad D_c = \frac{3B}{4} \left(\frac{1}{B} \sqrt[4]{\frac{EI}{P_L}} - 5 \right)$$

حيث إن E معامل مادة الخازوق ، I عزم القصور الذاتي لمقطع الخازوق حول المحور المركزي. ولا تأخذ الأساليب العملية في الحسبان قوة الخازوق ، ولكنها تساعد في تقدير الحمل الأقصى للتربة.

يؤدي استخدام معامل أمان يساوي ٣ لهذا الحمل الأقصى عادة إلى حمل يكون عنده الانحراف يساوي تقريباً ١,٥ ٪ من قطر الخازوق.
يمكن استخدام طريقة معامل طبقة التأسيس عند أحمال التشغيل لحساب الانحراف وعزم الانحناء الأقصى (البند ٤ , ١١ للخوازيق الطويلة المرنة والبند ٥ , ١١ للخوازيق القصيرة الصلبة).

(١١,٩) التحميل طويل المدى والتحميل السريع

LONG TERM LOADING AND RAPID LOADING

تحمل التربة في اختبار مقياس الضغط إلى الانهيار في عشر دقائق، والمنحنيات التابعة هي منحنيات $P-y$ ذات العشر دقائق وبناء عليه يؤدي إلى توقعات الحمل الأفقي ذي العشر دقائق. تدعى هذه المنحنيات بمنحنيات $P-y$ المرجعية. وعندما تكون مدة التحميل مختلفة تماماً عن المدة التي تعرضت إليها التربة خلال اختبار مقياس الضغط فعندئذ هناك حاجة إلى التصحيح. وقد اقترح (Briaud and Terry, 1986) التصحيح التالي:

$$y_t = y_{t_0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{n_t} \quad (326)$$

حيث إن y_t و y_{t_0} هما الانحرافان لمقدمة الخازوق عند فترتي التحميل t و t_0 على التوالي، و n_t أس اللزوجة والذي تم الحصول عليه من اختبار مقياس الضغط (البند ١٥ , ٧) ويقترن الوقت t_0 باختبار مقياس الضغط والذي يمكن أن يأخذ كدقيقة واحدة. أما الوقت t فهو مدة التحميل للخازوق، حيث يمكن أن يكون ٥٠ سنة للحائط الاستنادي على الخوازيق أو جزء من الثانية لعاصفة ريحية على إشارة الطريق. والمتغير n_t هو أس اللزوجة للتربة ويتم قياسها بالخطوات التالية والمشروحة في البنود ٥,٣ و ٧,١٥ وتتراوح عادة قيم n_t ما بين ٠,٢ و ٠,٢ للتربة الطينية الصلبة والتربة الرملية و ٠,٠٨ للتربة الطينية الرخوة، ويمكن أن تكون هذه القيمة سالبة.

لو كان الانحراف المتوقع للخازوق عند الحمل التشغيلي y_{10} يساوي - على سبيل المثال - ٥ ملم كان العمر التصميمي للحائط الاستنادي ٥٠ سنة و كانت التربة حول الخازوق لها أس اللزوجة n_i يساوي ٠.٠٤ والذي تم قياسه من اختبارات مقياس الضغط ، فان الانحراف عند ٥٠ سنة يمكن تقديره كالتالي :

$$(٣٢٧) \quad y_{50} = 5 \times \left(\frac{50 \times 365 \times 24 \times 60}{1} \right)^{0.04}$$

$$(٣٢٨) \quad y_{50} = 10 \text{ mm}$$

جدول رقم (٢٤): قاعدة البيانات للخوازيق ذات الحجم الطبيعي والتي عرضت لمعدلين مختلفين من التحميل الأفقي.

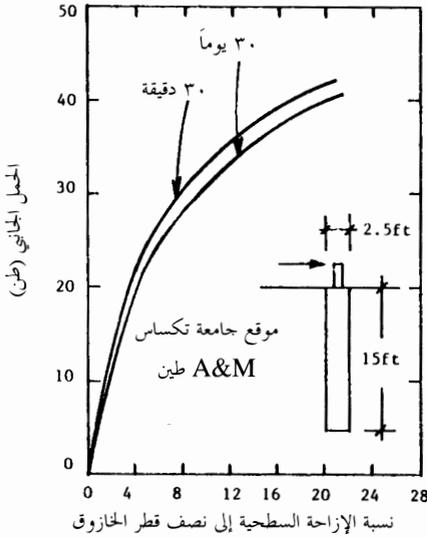
رقم الخازوق	المرجع	نوع التربة	نوع الخازوق	قطر الخازوق (متر)	طول الخازوق (متر)	قيمة n
١	Holloway et al. (1978)	طين صلب	مصبوب في الموقع	٠,٩١	٤,٥٧	٠,٠٢٤-٠,٠٢١
٢	Bierschwale et al. (1981)	طين صلب	مصبوب في الموقع	٠,٧٦	٤,٥٧	٠,٠٢٧-٠,٠٢٣
٣	Tassios & Levendis (1974)	طين متوسط	فرانكي Franki	٠,٥٢	١٠,١	٠,٠٨٨
٤	Baguelin & Jezequel (1972)	طين رخو	مغلف بقيسونة	٠,٩٥	٤,٣٩	٠,١٥-٠,٠٨٨
٥	Ambrosino et al. (1973)	طين متوسط	أنبوبي مدفوع	٠,٩٢	٢٦,٨	٠,٢٩-٠,١٢
٦	Price & Wardle (1981)	طين متوسط إلى صلب	أنبوبي مدفوع	٠,٤١	١٦,٥	٠,٠١٥-٠,٠١١
٧	Price & Wardle (1981)	طين متوسط إلى صلب	H مدفوع	٠,٣٦	٢١,٠	٠,٠١٣-٠,٠١

ملاحظة : ٣,٢٨ قدم = ١ متر

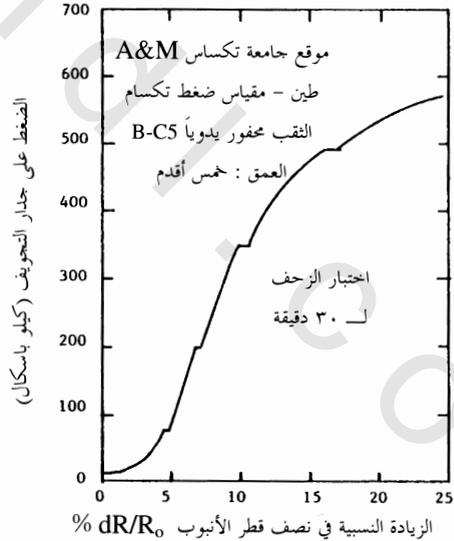
يعتبر هذا الحل تقريبياً فقط ، حيث إنه لو بالفعل تم الحصول على n_t من اختبارات مقياس الضغط وكما تم شرحه في البند ١٥ ، ٧ ، فإن n_t تطبق لنموذج معدل التأثير لمعامل مقياس الضغط وليس لانحراف مقدمة الخازوق. وسيؤدي الحل السابق لو كان $t > t_0$ إلى انحرافات للخازوق أكبر نوعاً ما من القيم الصحيحة النظرية ، ولو كان $t < t_0$ ستكون انحرافات الخازوق أصغر نوعاً ما من القيم الصحيحة النظرية. تتكون المنهجية الأكثر صحة استخدام منهجية معامل طبقة التأسيس ؛ وذلك لأن معامل الزنبرك الأفقي K يتعلق مباشرة بمعامل مقياس الضغط (المعادلتان ٢٦٦ و ٢٦٧) وفي هذه الحالة :

$$(329) \quad K_t = K_{t_0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-n_t}$$

حيث إن K_t و K_{t_0} هما معاملا الزنبرك الأفقي لمدة التحميل t و t_0 على التوالي. وتسمح منهجية الاعتماد على الوقت بتوقع أقصى عزم انحناء على الوقت.



شكل رقم (١٢١). تأثير الوقت على اختبار تحميل الخازوق.



شكل رقم (١٢٠). تأثير الوقت على اختبار مقياس الضغط.

لم يتم تقييم دقة هذه الطريقة كما لم تقيّم أيضاً دقة الطريقة التي تعتمد على منحنيات $P-\gamma$ ، ومع ذلك فإن التوقعات كانت ناجحة جداً في اختبار اصطدام عمود إشارة قطار (t يساوي ٠.٠١ ثانية) وفي اختبار التحميل الأفقي طويل الأجل للخازوق (t يساوي ٦ أشهر، الشكلان رقما ١٢٠، ١٢١) وبين جدول رقم (٢٤) قاعدة البيانات لاختبارات التحميل الأفقي مع قيم n_i المعاد حسابها لزيادة التوثيق.

(١١, ١٠) التحميل الدوري CYCLIC LOADING

يمكن أن يحدث التحميل الدوري نتيجة التحميل الناتج عن الرياح على سبيل المثال، حيث يتطلب هذا النوع من التحميل تصحيح الطريقة المرجعية. يضعف التحميل الدوري الأفقي التربة عموماً وفي بعض الأحيان يؤدي إلى فقدان القوة الكلية للتربة (تميع التربة الرملية المفككة). ويستثنى من هذه الحالة تصلب التربة الرملية الجافة متوسطة الكثافة عند التحميل الدوري ثنائي الاتجاه.

يعرّف التحميل الدوري ثنائي الاتجاه بأنه التحميل الذي يدفع فيه الخازوق إلى الخلف في الاتجاه المعاكس ويتخطى نقطة الصفر للانحراف أو الحمل لكل دورة. ويدفع الخازوق عند التحميل الدوري المتماثل في الاتجاهين إلى نفس الانحراف أو الحمل لكل جانب من الخازوق في وضع السكون. ويعرّف التحميل الدوري وحيد الاتجاه بأنه التحميل الذي يدفع فيه الخازوق إلى انحراف أو حمل في اتجاه واحد، ثم يعاد دفعه إلى الخلف إلى الحمل الصفري على الأكثر لكل دورة.

إن قاعدة البيانات لاختبارات التحميل الدوري الأفقي قليلة نسبياً. يبين جدول رقم (٢٥) قاعدة البيانات للخوازيق في التربة الطينية (Makarim and Briaud, 1986)، كما يبين جدول رقم (٢٦) قاعدة البيانات للخوازيق في التربة الرملية (Little and Briaud, 1986) وتؤدي الدراسة المفصلة لقاعدتي البيانات إلى الاستنتاجات التالية.

يوجد اختلاف بسيط في تجاوب الخازوق بين التحميل الدوري وحيد الاتجاه وثنائي الاتجاه في التربة الطينية. أما في التربة الرملية فإن الاختلاف واضح بين التحميلين، حيث إن التحميل الدوري وحيد الاتجاه يضعف التربة أكثر من التحميل الدوري ثنائي الاتجاه والذي يحدث في التربة الرملية انحلالاً بسيطاً في الصلابة، ومن الممكن أيضاً أن يؤدي إلى تقوية التربة، ويعزى ذلك إلى حقيقة أن الرمل يسقط في الفجوة الموجودة خلف الخازوق.

تعد اختبارات مقياس الضغط اختبارات دورية وحيدة الاتجاه، وهي تستخدم لتوقع أداء التربة الطينية الدوري ثنائي الاتجاه ووحيد الاتجاه؛ وذلك لأن الاختلاف بسيط بينهما. وكذلك فقط لتوقع التجاوب الدوري وحيد الاتجاه في التربة الرملية، ولا يمكن توقع التجاوب الدوري ثنائي الاتجاه للرمال. ونلاحظ أن التحميل الدوري ثنائي الاتجاه في التربة الرملية لم يؤد إلى ضعف ملحوظ للخوازيق كما هو مبين في قاعدة البيانات، ولهذا فإن الاهتمام به قليل مقارنةً بالتحميل الدوري وحيد الاتجاه. نلاحظ أيضاً أن تردد التحميل كان بصفة عامة منخفضاً ولم يصل إلى مستوى الزلزال. ولقد أجريت اختبارات مقياس الضغط الدورية بفترات ٣٠ ثانية تقريباً، ومن ثم يعد التحميل الدوري بطيئاً نسبياً.

يمكن استخدام النموذج التالي بالأخذ في الاعتبار الملاحظات والقيود السابقة. فلو كان استخدام الطريقة الإرشادية يؤدي إلى الانحراف y_1 عند أعلى الخازوق فعندئذ يمكن الحصول على الانحراف y_N عند أعلى الخازوق بعد N دورة كتقريب أولي كالتالي:

(٣٣٠)

$$y_N = y_1 N^a$$

حيث إن a هو الأس الدوري ويقاس من اختبارات مقياس الضغط بالطريقة المشروحة في البندين ٥، ٣، ١٤، ٧. ويتغير الأس a لقواعد بيانات الجدولين رقمي (٢٥ و ٢٦) من ٠،١ إلى ٠،٣٥ للتربة الطينية ومن ٠،١٤ إلى ٠،٠٦ للاختبارات ثنائية الاتجاه للتربة

الرملية ومن ٠,٠٠٥ إلى ٠,٢٦ لاختبارات وحيدة الاتجاه للتربة الرملية. وقد كان متوسط القيم ٠,٠٩٤ للتربة الطينية و ٠,٠٧٦ للاختبارات وحيدة الاتجاه و ٠,٠٠٢ للاختبارات ثنائية الاتجاه للتربة الرملية.

لو كان الانحراف المتوقع للخازوق y_1 عند أحمال التشغيل يساوي مثلاً ٥ ملم والتحميل المتوقع ١٠٠٠ دورة والتربة حول الخازوق لها أس دوري يساوي ٠,٠٧٥ والمقاس من اختبارات مقياس الضغط بتردد يساوي تردد التحميل المتوقع فإن الانحراف بعد ١٠٠٠ دورة يحسب كالتالي :

$$(٣٣١) \quad y_{1000} = 5 x (1000)^{0.075} = 8.39 \text{ mm}$$

وسوف يكون الانحراف بعد مليون دورة

$$(٣٣٢) \quad y_{1,000,000} = 5x(1,000,000)^{0.075} = 14.09 \text{ mm}$$

تعتبر هذه الطريقة تقريبية مثل حالة تأثير السرعة. ولو تم الحصول بالفعل على a من اختبارات مقياس الضغط، كما هو مشروح في البند ٧ و ١٤، فعندئذ يطبق a في النموذج الدوري لمعامل مقياس الضغط وليس للنموذج الدوري للانحراف الجزء الأعلى للخازوق. ويؤدي الحل السابق إلى انحرافات أكبر من الحل النظري الصحيح.

تشتمل الطريقة الأكثر ملاءمة استخدام طريقة معامل طبقة التأسيس؛ وذلك لارتباط ثابت الزنبرك الأفقي K المباشر مع معامل مقياس الضغط (المعادلتان ٢٦٦ و ٢٦٧)، وفي هذه الحالة :

$$(٣٣٣) \quad K_N = K_I N^a$$

حيث إن K_I و K_N هما ثوابت الزنبرك الأفقي التابع للتحميل الأولي وبعد N دورة على التوالي. وتسمح أيضاً هذه الطريقة الحصول على أقصى عزم للانحناء كدالة في عدد الدورات.

لم تقيم دقة هذه الطريقة وكذلك الطريقة التي تعتمد على منحنيات $P-y$ المرجعية ومع ذلك فإن هناك ست مقارنات بين التجاوب الدوري المتوقع والمقاس للخوازيق الحقيقية المحملة أفقياً والتي بينت نتائج مشجعة.

جدول رقم (٢٥). قاعدة البيانات للخوازيق ذات الحجم الطبيعي والتي عرّضت لتحميل أفقي دوري في تربة طينية.

رقم اختبار التحميل	الموقع	الخازوق	التربة	بيانات دورية	المراجع
١,١	بحيرة أوستن	٠,٣ م أنبوب فولاذي	طين رخو	٥٠٠ x ٧ دورة	Matlock et al. ١٩٥٦م
١,٢	بحيرة أوستن	٠,٣ م أنبوب فولاذي	طين رخو	٥٠٠ x ٧ دورة	Matlock et al. ١٩٥٦م
٢,١	سايبين	٠,٣ م أنبوب فولاذي	طين رخو	٢٥٠ x ١٠ دورة	Matlock & Tucker ١٩٦١م
٢,٢	سايبين	٠,٣ م أنبوب فولاذي	طين رخو	٢٥٠ x ١٠ دورة	Matlock & Tucker ١٩٦١م
٢,٣	سايبين	٠,٣ م أنبوب فولاذي	طين رخو	٢٥٠ x ١٠ دورة	Matlock & Tucker ١٩٦١م
٢,٤	سايبين	٠,٣ م أنبوب فولاذي	طين رخو	٢٥٠ x ١٠ دورة	Matlock & Tucker ١٩٦١م
٣,١	مانر	٠,٦ م أنبوب فولاذي	طين صلب جداً	١٠٠ x ٢٠ دورة	Reese et al. ١٩٦٨م
٣,٢	مانر	٠,٦ م أنبوب فولاذي	طين صلب جداً	١٠٠ x ٢٠ دورة	Reese et al. ١٩٦٨م
٤,١	بلانكويث	٠,٩ م قايسون	طيني رخو	٣٠٠ دورة	Baguelin & Jezequel ١٩٧٢م
٤,٢	بلانكويث	٠,٢٨ م خازوق H	طيني رخو	٣٠٠ دورة	Baguelin & Jezequel ١٩٧٢م
٥,١	هيوستن	٠,٧٦ م عمود	طيني صلب جداً	٢٠ x ٤ دورة	Welch & Reese ١٩٧٢م
٥,٢	هيوستن	٠,٧٦ م عمود	طيني صلب جداً	٢٠ x ٤ دورة	Welch & Reese ١٩٧٢م
٦,١	كوبزك	٠,٩ م أنبوب فولاذي	طين متوسط	١٠٠ دورة	Ambrosino et al. ١٩٧٣م
٦,٢	كوبزك	٠,٩ م أنبوب فولاذي	طين متوسط	١٠٠ دورة	Ambrosino et al. ١٩٧٣م
٧,١	فرنسا	٠,٥٣ م خرسانة مسلحة	طين متوسط	١٥ x ٣ دورة	Tassios & Levendis ١٩٧٤م

تابع جدول رقم (٢٥).

المرجع		بيانات دورية	التربة	الخوازوق	الموقع	رقم اختبار التخميل
١٩٧٤م	Tassios & Levendis	دورة ١٥ x ٣	طين متوسط	٠,٥٢ م فرانكي	فرنسا	٧,٢
١٩٧٤م	Tassios & Levendis	دورة ١٥ x ٣	طين متوسط	٠,٥٢ م فرانكي	فرنسا	٧,٣
١٩٧٩م	Lee & Gilbert	دورة ٢٥	طين رخو جداً	أنبوب فولاذي مثنى الشكل ٠,٨٤ م من أعلى و ٠,٥٦ م من أسفل	شالمبيي، لوس أنجلس	٨,١
١٩٨١م	Price & Wardle	٣٠٠ x ١٢ دورة	طين متوسط	٠,٤ م أنبوب فولاذي	المملكة المتحدة	٩,١
١٩٨١م	Price & Wardle	٣٠٠ x ١٢ دورة	طين متوسط	٠,٣٤ م حازوق H	المملكة المتحدة	٩,٢
١٩٨٣م	Karlsrud & Haugen	دورة ٥٠	طين متوسط	٠,١٥ م أنبوب فولاذي	هيچ- الترويچ	١٠,١
١٩٨٣م	Karlsrud & Haugen	دورة ٢٥٠	طين متوسط	٠,١٥ م أنبوب فولاذي	هيچ- الترويچ	١٠,٢
١٩٨٤م	Dunnivant	دورة ٢٠٠	طين صلب جداً	٠,٣ م أنبوب فولاذي	جامعة هيوستن	١١,١
١٩٨٤م	Dunnivant	دورة ٢٠٠	طين صلب جداً	٠,٣ م أنبوب فولاذي	جامعة هيوستن	١١,٢
١٩٨٤م	Dunnivant	دورة ١٠٠	طين صلب جداً	١,٢ م أنبوب فولاذي	جامعة هيوستن	١١,٣
١٩٨٤م	Dunnivant	دورة ١٠٠	طين صلب جداً	١,٢ م أنبوب فولاذي	جامعة هيوستن	١١,٤
١٩٨٢م	Robertson et al.	دورة ١٠٠	تربة عضوية رخوة وطين	٠,٣ م خرسانة مسلحة مربعة	برناباي- كندا	١٢,١
١٩٨٢م	Robertson et al.	دورة ١٠٠	تربة عضوية رخوة وطين	٠,٣ م خرسانة مسلحة مربعة	برناباي- كندا	١٢,٢

ملاحظة: ٣,٢٨ قدم = ١ متر

جدول رقم (٢٦). قاعدة البيانات للخوازيق ذات الحجم الطبيعي والتي عرضت لتحميل أفقي دوري في تربة رملية.

المرجع	بيانات دورية	التربة	نوع الخازوق	الموقع	التاريخ	رقم اختبار الخازوق	
Reese et al., 1967a	١٠٠ x ٢٠ اتجاهان	رمل كثيف	٠,٦ م أنبوب فولاذي	جزيرة مستانج	١٩٦٧	١,١	
	١٠٠ x ٢٠ اتجاهان		٠,٣ م أنبوب فولاذي	جزيرة مستانج	١٩٦٧	١,٢	
Fayans et al., 1978	١٠٠ x ٥٥,٢ x ١ اتجاه ١-١٠٠	تربة طينية	٠,٣ م خرسانة مسلحة مربعة	الاتحاد السوفيتي	١٩٧٨	٢,١	
	٣٠ x ٥ اتجاه ١-١٠٠	رملية	٠,٣ م خرسانة مسلحة مربعة	الاتحاد السوفيتي	١٩٧٨	٢,٢	
	١٠٣,٠ x ١-اتجاه	رمل كثيف وحصي	٠,٣ م خشب	L&D 26	١٩٧٨	٣,١	
Perez & Holloway, 1979	١٠٣,٠ x ١-اتجاه		٠,٣ م خشب	L&D 26	١٩٧٨	٣,٢	
	١٠٣,٠ x ١-اتجاه		٠,٣٣ م خازوق H	L&D 26	١٩٧٨	٣,٣	
	١٠٣,٠ x ١-اتجاه		٠,٣٧ م أنبوب فولاذي	L&D 26	١٩٧٨	٣,٤	
	١٠٣,٠ x ١-اتجاه		٠,٣٣ م خازوق H	L&D 26	١٩٧٨	٣,٥	
	١٠٣,٠ x ١-اتجاه		٠,٣٧ م أنبوب فولاذي	L&D 26	١٩٧٨	٣,٦	
	١٠٣,٠ x ١-اتجاه		٠,٣٣ م خازوق H	L&D 26	١٩٧٨	٣,٧	
	١٠٣,٠ x ١-اتجاه		٠,٣٧ م أنبوب فولاذي	L&D 26	١٩٧٨	٣,٨	
	Briaud et al., 1984a		١٠٢,٥ x ١-اتجاه	رمل كثيف	٠,٣٧ م خازوق H	L&D 26	١٩٨٤
١٠٢,٥ x ١-اتجاه			وحصي	٠,٣٧ م خازوق H	L&D 26	١٩٨٤	٤,٢
Long & Reese 1984	١٠٤,٠ x ٧-اتجاه	رمل كثيف	خرسانة مسلحة بقطر ١,٢ م	خليج تامبا	١٩٨٤	٥,١	
	١٠٤,٠ x ٧-اتجاه		خرسانة مسلحة بقطر ١,٢ م	خليج تامبا	١٩٨٤	٥,٢	

تابع جدول رقم (٢٦).

المرجع	بيانات دورية	التربة	نوع الخازوق	الموقع	التاريخ	رقم اختبار الخازوق
Little & Briaud 1986	١،٢٠×٢ - اتجاه	رمل متوسط الكثافة	٠،٦ م أنبوب فولاذي	بيتاون / هيوستن	١٩٨٦	٦،١
	١،٢٠×٢ - اتجاه		٠،٥ م خرسانة مربعة		١٩٨٦	٦،٢
	١،٢٠×٢ - اتجاه		٠،٩ م عمود محفور		١٩٨٦	٦،٣
	١،٢٠×٢ - اتجاه		١،١ م عمود محفور		١٩٨٦	٦،٤
	١،٢٠×٢ - اتجاه		١،١ م عمود محفور		١٩٨٦	٦،٥
	١،٢٠×٢ - اتجاه		١،١ م عمود محفور		١٩٨٦	٦،٦
Morrison & Reese, 1986	١٠٠×٧ اتجاهان	رمل متوسط الكثافة	٠،٢٧ م أنبوب فولاذي	جامعة هيوستن	١٩٨٦	٧،١

ملاحظة : ٣،٢٨ قدم = ١ متر

(١١، ١١) التحميل قرب خندق LOADING NEXT TO A TRENCH

يكون هناك احتمال بوجود خندق مفتوح قرب خازوق محمل أفقياً، وفي هذه الحالة فإن أول خطوة هي التأكد من أن هذا الخندق في حالة اتزان أم لا. يجب استبعاد الكتلة المنهارة بأكملها لو كان الخندق غير مستقر إلا إذا دعم الخندق كما ينبغي. يضعف وجود الخندق أداء الخازوق ويصبح من الضروري تصحيح الطرق الأساسية. وقد اقترح بريود وتكر (Briaud and Tucker, 1987) طريقة تعتمد على اختبارات مقياس الضغط والتي أجريت قرب خندق وعلى المحاكاة باستخدام الحاسب الآلي بطريقة العناصر المحددة. اقترحت هناك طريقة أكثر بساطة وتحفظاً وهي مطورة من الطريقة السابقة؛ وذلك لتقليل الحمل H عند أعلى الخازوق (عند أحمال التشغيل):

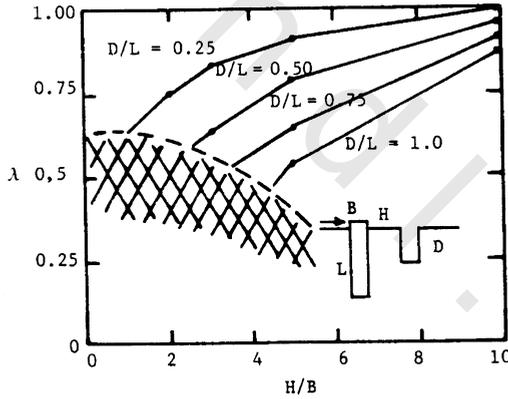
(٣٣٤)

$$H_{trench} = \lambda H_{no\ trench}$$

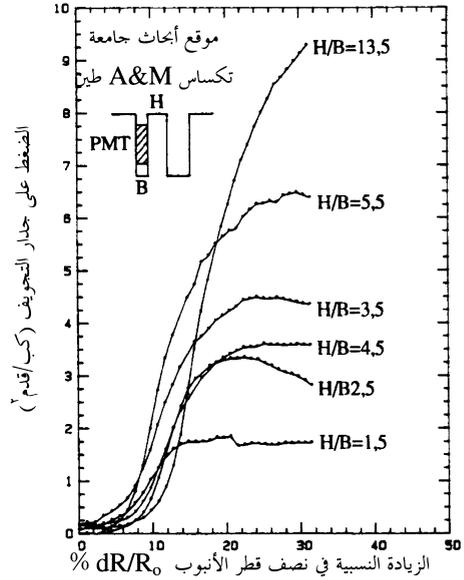
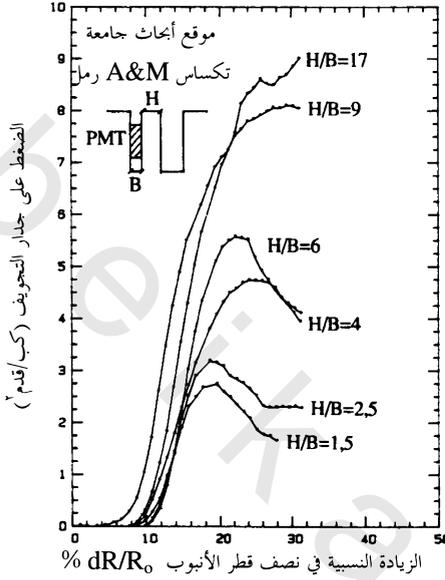
حيث إن λ هو معامل التقليل ومعطى في شكل رقم (١٢٢) ويأخذ في الحسبان وجود الخندق.

تم تصميم خازوق مثقوب قطره متر واحد وطوله ستة أمتار مثلاً ليتحمل قوة أفقية قدرها ١٠٠ كيلو نيوتن لانحراف قدره ٥ ملم بدون أي خندق، وتم حفر خندق مستقر (يدعم عند الضرورة) بعمق ثلاثة أمتار، حيث إن أقرب حافة للخندق تبعد ثلاثة أمتار، من الجهة الأمامية للخازوق. وقد وجد أن قيمة $\lambda = 0.625$ من شكل رقم (١٢٢) عندما $H/B = 3/1 = 3$ و $D/L = 3/6 = 0.5$ وعلى هذا فإن الحمل المسموح به للخازوق عند نفس الانحراف ٥ ملم هو كالتالي : $H_{trench} = 0.625 \times 100 = 62.5 \text{ KN}$

لعدم توفر اختبارات التحميل للخازوق الحقيقي ذات المعلومات الضرورية، لم يتم التأكد من هذه الطريقة. وقد أجري العديد من اختبارات مقياس الضغط قرب الخندق كما هو موضح بالشكلين رقمي (١٢٣ و ١٢٤) واللذين يبينان فقدان التدريجي لمقاومة الحمل كلما قرب اختبار مقياس الضغط أكثر فأكثر من الخندق.



شكل رقم (١٢٢). معامل خفض الحمل λ لخازوق محمل أفقياً قرب خندق.



شكل رقم (١٢٣). منحنيات مقياس الضغط - شكل رقم (١٢٤). منحنيات مقياس الضغط
 لاختبارات أجريت أقرب فأقرب من خندق في تربة طينية. لاختبارات أجريت أقرب فأقرب من خندق في تربة رملية.

(١١, ١٢) تصميم أعمدة الحاجز الوقائي لارتطام العربات

DESIGN OF GUARDRAIL POSTS FOR VEHICLE IMPACT

يتراوح قطر هذه الأعمدة عادة من ٧٥ ملم إلى ١٠٠ ملم ويدفن ما بين ٠,٦ و ١,٥ م داخل التربة. ويربط الحاجز الوقائي إلى الأعمدة ويصمم لإعادة اتجاه العربات عند الارتطام. ومن الممكن أن يكون انحراف العمود خلال الارتطام ما بين ٢٥ و ٧٥ ملم والتي تؤدي إلى انهيار التربة من وجهة نظر الهندسة الجيوتكنيكية. وعلى هذا فإن المشكلة هي توقع الحمل الأقصى لهذا العمود.

خطوات العمل التالية والمبسطة هي لحساب هذا الحمل، حيث يبين شكل رقم (١٢٥) عمود حاجز وقائي قطره ٩١ ملم ومدفون ١,١ م داخل تربة رملية. وقد أجريت اختبارات مقياس الضغط باستخدام أنبوب أسطواني صغير لمقياس الضغط (طول

الجزء الممتد ٢٢٩ ملم والقطر ٣,٤ ملم) وقد أجريت هذه الاختبارات وتم الوصول إلى الضغط النهائي في دقيقتين. ويوضح شكل رقم (١٢٥) القطاعات الرأسية للضغط النهائي والمعامل.

تؤخذ أقصى مقاومة على العمود عند الطرف السفلي للعمود على أنه الضغط النهائي للتربة P_{L2} . ويتطابق أيضاً المقطع الرأسي للمقاومة القصوى قرب السطح مع المقطع الرأسي للضغط النهائي لمقياس الضغط. وعلى هذا فإن القطاع الرأسي للمقاومة على العمود كما هو مبين في شكل رقم (١٢٥) ويؤدي الاتزان الأفقي إلى :

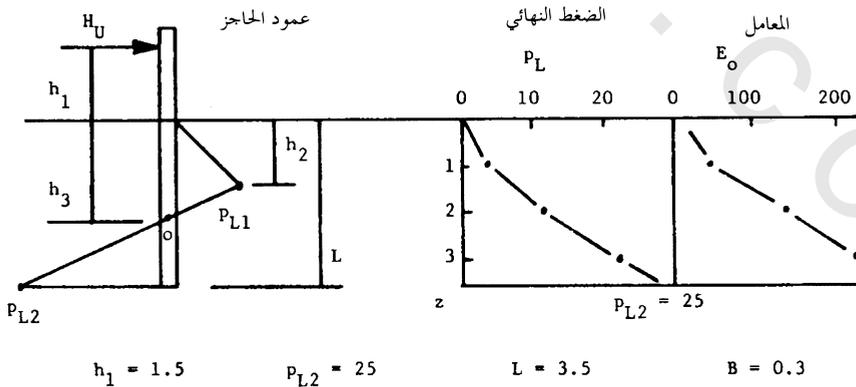
$$(٣٣٥) \quad H_U = \frac{1}{2} p_{L1} B h_3 - \frac{1}{2} p_{L2} B (L - h_3)$$

حيث إن جميع المتغيرات معروفة في شكل (١٢٥). ويؤدي اتزان العزم حول النقطة o في شكل رقم (١٢٥) إلى :

(٣٣٦)

يكون لدينا بهذا معادلتان بأربعة مجاهيل وهي H_U, h_2, h_3, p_{L1} ولكن إذا كانت h_3 معلومة فيمكن تحديد كل من h_2, p_{L1} من المقطع الرأسي لـ p_L ، كما توجد المجاهيل المستقلة وهي H_U, h_3 عن طريق المحاولة والخطأ. لم تستخدم وحدات في المثال الموضح في شكل رقم (١٢٥) وذلك لإعطاء القارئ حرية اختيار مجموعة الوحدات الخاصة به.

نتائج مقياس الضغط



شكل رقم (١٢٥). تصميم عمود حاجز وقائي باستخدام بيانات مقياس الضغط.

حاول $h_3 = 2.5$ ، وحيث إن $P_{L2} = 25$ ، عندئذ $h_2 = 2$ و $P_{L1} = 11$ ، وعلى هذا فإن
المعادلة ٣٣٥ تكون :

$$(٣٣٧) \quad H_u = 0.5 \times 11 \times 0.3 \times 2.5 - 0.5 \times 25 \times 0.3 (3.5 - 2.5) = 0.375$$

وبمراجعة العزم :

$$0.375 (1.5 + 2.5) = 0.5 \times 11 \times 0.3 \times 2 (2.5 - 0.67 \times 2) + 0.5 \times 11 \times 0.3 \times 0.67$$

$$(٣٣٨) \quad \times 0.5^2 + 0.5 \times 25 \times 0.3 \times 0.67 \times 1^2$$

$$11.5 = 3.86 + 0.28 + 2.51$$

ولنحاول $h_3 = 2.65$ ، وبما أن $P_{L2} = 25$ عندئذ $h_2 = 2.2$ و $P_{L1} = 13$ ، وعلى هذا فإن
المعادلة ٣٣٥ تكون :

$$(٣٣٩) \quad H_u = 0.5 \times 13 \times 0.3 \times 2.65 - 0.5 \times 25 \times 0.3 (3.5 - 2.65) = 2.77$$

وبمراجعة العزم :

$$2.77 (1.5 + 2.65) = 0.5 \times 13 \times 0.3 \times 2.2 (2.65 - 0.67 \times 2.2)$$

$$+ 0.5 \times 13 \times 0.3 \times 0.67 \times 0.45^2 + 0.5 \times 25 \times 0.3 \times 0.67 \times 0.85^2$$

$$(٣٤٠) \quad 11.5 = 5.05 + 0.26 + 1.82$$

ولنحاول $h_3 = 2.6$ ، وبما أن $P_{L2} = 25$ عندئذ $h_2 = 2.15$ ، و $P_{L1} = 12.5$ ، وعلى هذا فإن
المعادلة ٣٣٥ تصبح كالتالي :

$$(٣٤١) \quad H_u = 0.5 \times 12.5 \times 0.3 \times 2.6 - 0.5 \times 25 \times 0.3 (3.5 - 2.6) = 1.5$$

وبمراجعة العزم :

$$1.5 (1.5 + 2.6) = 0.5 \times 12.5 \times 0.3 \times 2.15 (2.6 - 2.15 \times 0.67)$$

$$+ 0.5 \times 12.5 \times 0.3 \times 0.67 \times 0.45^2$$

$$(٣٤٢) \quad + 0.5 \times 25 \times 0.3 \times 0.67 \times 0.9^2$$

$$6.15 \cong 6.95$$

ينتج من ذلك أن الحمل الأقصى للعمود هو ١,٥ فيما لو تعرّض العمود إلى الانهيار
خلال دقيقتين. وفي ارتطام العربة فإن العمود يصل إلى إزاحة كبيرة في عشرة أجزاء من

الألف من الثانية تقريباً. وقد تم الحصول على معدل التأثير الأسي من تجارب مقياس الضغط وكان المتوسط ٠,٠٢٤. وعلى هذا فإن العمود يستطيع المقاومة في ٠,٠١ ثانية (وبتطبيق المعادلة ٣٢٦ على الأحمال القصوى) :

$$(٣٤٣) \quad \frac{H_u \text{ in } 0.01 \text{ seconds}}{H_u \text{ in } 120 \text{ seconds}} = \left(\frac{120}{0.01} \right)^{0.024} = 1.25$$

$$(٣٤٤) \quad H_u \text{ in } 0.01 \text{ seconds} = 1.25 \times 1.5 = 1.87$$

لقد تم اختبار العمود، وذلك بارتطام بندول يزن ١,١٥، وانكسر العمود عندما كان الانحراف عند سطح الأرض ٢٦٪ من قطره (انهيار التربة). وعند تلك اللحظة كان تباطؤ حركة البندول الأفقية $2g$ ، وعلى هذا فإن القوة هي :

$$(٣٤٥) \quad H_u = 2g \times \frac{1.15}{g} = 2.3$$

التوقع لـ ١,٨٧ متحفظاً نوعاً ما ومن الممكن أن يكون السبب هو أخذ المقاومة الأمامية فقط في التحليل (فقط p_L) وأهملت مركبات الاحتكاك. وعادة ما يمثل الاحتكاك - عند انهيار التربة - ٢٠٪ تقريباً من الحمل الكلي، حيث إن هذه النسبة تشكل الفرق بين القيمة المقاسة ٢,٣ والقيمة المتوقعة ١,٨٧. ومن الممكن بعدها تصميم قطاع العمود على أساس مخطط الحمل، حيث يمكن بالفعل استخدام هذا المخطط لحساب أقصى عزم للانحناء.