

تصميم طبقات الرصف

Design of Pavements

- مفاهيم تصميم طبقات الرصف • مقياس ضغط طبقات الرصف • العامل والضغط النهائي • معدّل التحميل
- لطبقات الرصف • طريقة الرسم البياني • طريقة نظام الطبقات المتعددة • العامل كدالة في الاجهاد والانفعال
- المعدّل والدورات • اختبار مقياس الضغط لطبقات الرصف
- الحصول على معاملات من منحني اختبار مقياس الضغط لطبقات الرصف • التجارب الحقلية

درس كل من Briaud and Shields في عام ١٩٧٦م بكندا إمكانية تطبيق تجربة مقياس الضغط في تصميم طبقات الرصف للمطارات. وقد أجريت التجارب وطورت طريقة التصميم من قبل كل من (Briaud, 1979; Briaud and Shields, 1979, 1981a, 1981b). وفي عام ١٩٨٠م قام كل من Briaud, Lytton and Hung بولاية تكساس بدراسة إمكانية تطبيق تجربة مقياس الضغط في تصميم طبقات الرصف للطرق العامة (Hung et al., 1981; Briaud et al., 1982, 1983a)، وقد أجريت التجارب وطورت التحاليل للحصول على معاملات الانفعال الصغيرة من هذه التجربة. وفي عام ١٩٨٤م قام كل من Briaud, Cosentino and Terry بمقارنة تجربة مقياس الضغط لطبقات الرصف مع مقياس الانحراف للثقل الساقط وثلاثي المحور الدوري، وقد أخذت القياسات وبنيت التوقعات لثلاثة مطارات (Briaud et al., 1986b, 1987).

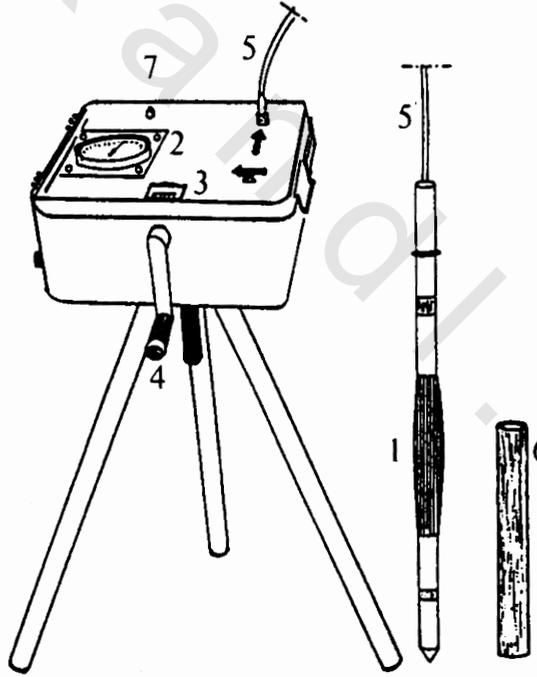
(١٤, ١) مفاهيم تصميم طبقات الرصف PAVEMENT DESIGN CONCEPTS

يتطلب استخدام مقياس الضغط في تصميم طبقات الرصف معرفة الاختلافات الموجودة بين طبقات الرصف والأساسات، ونادراً ما يؤخذ في الاعتبار قدرة التحمل القصوى في هندسة الطرق؛ وذلك لوجود بعض القيود في التصميم - وبالتحديد الانحرافات الصغيرة جداً والمسموح بها - التي تضمن بأن معامل الأمان لقدرة التحمل للانهيال عالٍ. وتتغير قيمة معامل الأمان النموذجية ما بين ١,٥ و ٣,٠، ولكن قيمة معامل الأمان لمعظم طبقات الرصف التقليدية أكبر من ذلك بعدة مرات. ويمكن السماح بالحركة حتى ٢٥ ملم في هندسة الأساسات، أما في هندسة الطرق فإن مثل هذه القيمة للحركة التفاوتية تعتبر كارثة لطائرة تحاول الإقلاع بسرعة ٢٤٠ كلم/ساعة. وقيمة الانفعال الرأسي في طبقات الرصف أقل من ٠,٠٠١ لكل مرة يمر عليها الإطار. ويمكن أن يكون ضغط إطار العربة ٢٠٠ كيلو باسكال والشاحنة ٥٥٠ كيلو باسكال وللطائرة يصل إلى ١٧٠٠ كيلو باسكال. يتضح لدينا بأن مشكلة تصميم طبقات الرصف هي تحديد التشوهات إلى قيم صغيرة جداً مسموح بها. ولهذا فإنه من الضروري إيجاد معامل أي طبقة للانفعالات الصغيرة جداً. أما الاختلافات الأخرى مع الأساسات فهي أولاً أن مستوى الإجهاد في التربة أقل من طبقات الرصف، ثانياً أن حمل كل من العربة والشاحنة والطائرة سريع على التربة مع عدد كبير من التكرار. وعلى هذا فإن تطوير جهاز مقياس الضغط لطبقات الرصف يركز على إيجاد المعاملات كدالة في الانفعال والإجهاد ومعدل التحميل والتحميل الدوري.

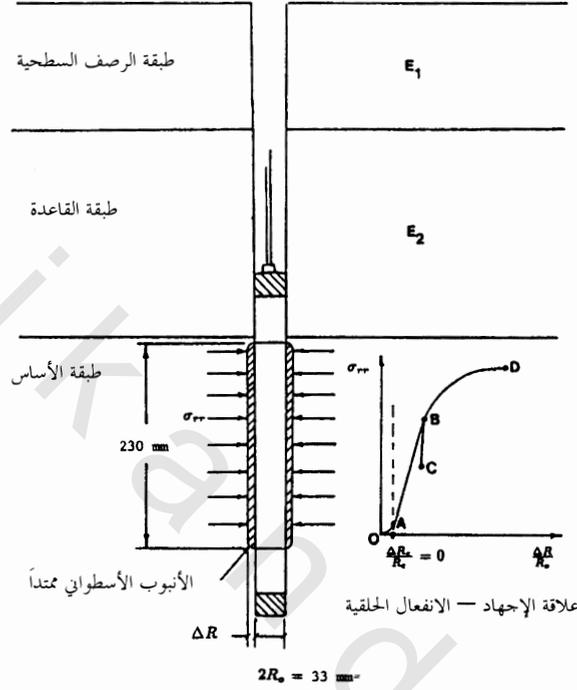
(١٤, ٢) مقياس ضغط طبقات الرصف THE PAVEMENT PRESSUREMETER

تم تطوير أول جهاز لمقياس الضغط لطبقات الرصف (شكلان رقم ١٤٠، ١٤١) للنقل بكندا (Transport Canada, 1979) Briaud، وقد تم تحسين الجهاز لقسم الطرق بولاية تكساس (Hung et al., 1981). وقامت Roctest في عام ١٩٨٤م بصناعة الجهاز بعد وضع التحسينات النهائية له وبيعه تحت اسم PENCEL. ويحتوي الجهاز

على أنبوب أسطواني ومواسير وحقيبة حمل وحدة التحكم، حيث إن قطر الأنبوب الأسطواني ٣٥ ملم وطول الجزء المنفوخ ٢٣٠ ملم. يتم حفر الثقب لطبقات الرصف الجديدة بالثقب اللولبي الصغير وقطره ٣٥ ملم إلى العمق المراد اختباره. ولتقييم طبقات الرصف القائمة يتم حفر ثقب قطره ٥٠ ملم خلال الطبقة السطحية، ويتم ذلك عادة باستخدام حفار للخرسانة وتستخدم العينة لتحديد معامل الطبقة السطحية (أسفلت أو خرسانة). وإذا لم يكن بالإمكان إعداد الثقب بالثقب اللولبي فإن آخر حل هو غرز الأنبوب الأسطواني في موقعه، وفي هذه الحالة يجب تطبيق عوامل التحويل للمعاملات المتحصل عليها (البند ٤،٣) (Briaud et al., 1986b).



شكل رقم (١٤٠). رسم توضيحي لقياس الضغط لطبقات الرصف. ١- الأنبوب الأسطواني، ٢- مقياس ضغط، ٣- مؤشر إزاحة، ٤- المشغل الميكانيكي اليدوي، ٥- أنبوب، ٦- ماسورة حديد لمعايرة الحجم، ٧- توصيله لخزان الماء.



شكل رقم (١٤١). اختبار مقياس الضغط لطبقات الرصف والقطاع العرضي لطبقات الرصف النموذجي.

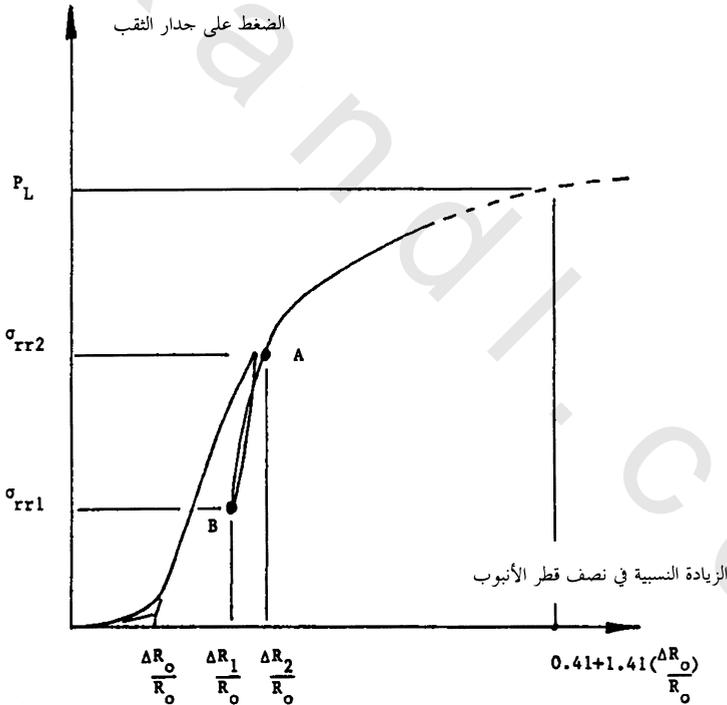
جدول رقم (٣٢). مقارنة بين اختبارات مقياس الانحراف بإسقاط وزن، ومقياس الضغط وثلاثي المحاور الدوري لتصميم وتقويم طبقات الرصف.

المتغير	مقياس الانحراف بإسقاط وزن	مقياس الضغط	ثلاثي المحاور الدوري
قيمة الجهاز	\$ ١٠٠,٠٠٠	\$ ٦٠٠٠	\$ ٥٠,٠٠٠
تكلفة الاختبار	قليل	متوسط	عال
متانة الجهاز	متوسط	عال	متوسط
تعقيدات استخدام الجهاز	متوسط	متوسط	معقد جداً
الوقت المطلوب للاختبار	ثلاث دقائق	٢٠ دقيقة	٤٨٠ دقيقة

تابع جدول رقم (٣٢).

المتغير	مقياس الانحراف بإسقاط وزن	مقياس الضغط	ثلاثي المحاور الدوري
الوقت المطلوب لإخلاء المدرج في حالة الطوارئ	في الحال	دقيقتان	١٥ دقيقة (تفريغ تجهيزات الحفر)
الحصول على البيانات	الانحرافات السطحية انتشار الموجات	منحنى الإجهاد- الانفعال في الموقع	منحنى الإجهاد- الانفعال في المعمل
الإجهادات الأفقية عند السكون	لا	نعم	صعب
اختزال البيانات	معقد	معقد	معقد
تقليل البيانات إلى	معاملات الطبقة (إذا كان سمك الطبقة معروفة بالتحديد) كدالة في مستوى التحميل والدورات من الاختبارات المكررة	معاملات الطبقة كدالة في الاجهاد، الانفعال، الدورات ومعدل التحميل	معاملات الطبقة كدالة في الاجهاد، الانفعال، الدورات ومعدل التحميل
معدل التحميل على طبقات الرصف	لطبقات الرصف البسيطة فقط	نعم	نعم
مراجعة سماكة طبقات الرصف	لا	نعم	نعم
العينة المستخرجة	لا	مخلخلة (مفيدة في تعريف الخصائص، المحتوى المائي... إلخ)	غير مخلخلة
تصميم طبقات رصف جديدة أو عمل إضافة لطبقات رصف موجودة	نعم	نعم	نعم
تقويم طبقات رصف موجودة	نعم	نعم	نعم
مغطى بالتصميم	نعم	نعم	نعم

تتكون التجربة من نفخ الأنبوب الأسطواني بتتابع محدد. وتستغرق التجربة نحو عشر دقائق، وعلى هذا فيمكن عمل ٤ إلى ٥ تجارب في الساعة بفريق عمل ذي خبرة مكون من شخصين. ولمقياس الضغط لطبقات الرصف مزايا وعيوب كأى تجربة أخرى. ويوضح جدول رقم (٣٢) المقارنة بينه وبين مقياس الانحراف للثقل الساقط وثلاثي المحور الدوري. ويبين الجدول بأن مقياس الانحراف للثقل الساقط مثالي للتقييم السطحي السريع لمنطقة واسعة من طبقات الرصف، بينما مقياس الضغط لطبقات الرصف مناسب جداً لتقييم دقيق لأماكن معينة. وتكلفة جهاز مقياس الضغط لطبقات الرصف رخيص مقارنة بتكلفة جهاز مقياس الانحراف للثقل الساقط مما يجعله أكثر قبولاً من الناحية الاقتصادية.



شكل رقم (١٤٢). منحنى مقياس الضغط.

(١٤,٣) المعامل والضغط النهائي MODULUS AND LIMIT PRESSURE

يمكن الحصول على المعامل E من دورة إنزال الحمل - إعادة التحميل من منحنى مقياس الضغط (شكل رقم ١٤٢) ومعادلتها كالتالي :

$$(٣٦٣) \quad E = (1 + \nu) (\sigma_{rr2} - \sigma_{rr1}) \frac{\left(1 + \frac{\Delta R_2}{R_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_0}\right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta R_2}{R_0}\right)^2 - \left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_0}\right)^2}$$

حيث إن ν هي نسبة بويسون (يمكن تقديرها)، ΔR_1 و ΔR_2 هي الزيادة في نصف قطر الأنبوب الأسطواني للنقطتين المأخوذتين في الاعتبار، R_0 هو نصف قطر الأنبوب الأسطواني المفرغ من الهواء و σ_{rr1} و σ_{rr2} هما الضغوط المؤثرة على جدار الثقب للنقطتين المأخوذتين في الاعتبار (شكل رقم ١٤٢).

يمكن الحصول على الضغط النهائي p_L يدوياً وذلك بمد منحنى مقياس الضغط إلى أن يصل عند قيمة ل $\Delta R/R_0$ مساوياً $(\Delta R_0/R_0)$ $0.41 + 1.41$ ، حيث إن ΔR_0 هي الزيادة في نصف قطر الأنبوب الأسطواني إلى أن يلامس الأنبوب الأسطواني جدار الثقب. يكون الضغط النهائي p_L بناء على ذلك هو الضغط المناظر لهذه النقطة على محور $\Delta R/R_0$.

(١٤,٤) معدل التحميل لطبقات الرصف LOAD RATING OF PAVEMENTS

كما ذكرنا سابقاً فإنه نادراً ما تؤخذ في الاعتبار قدرة التحمل القصوى لطبقات الرصف في التصميم ولكن هناك استثناءات. تتعرض بعض المطارات الصغيرة على سبيل المثال أحياناً إلى هبوط طائرات ضخمة أو الزيادة المفاجئة في حركة المرور للشاحنات على الطرق الثانوية، وذلك أثناء عمل بعض الأعمال الإنشائية في الطرق الرئيسية. يتوجب في هذه الحالات إعداد طبقات الرصف إلى أعلى معدل للتحميل يمكن توقعه. وتقدر المعادلة التالية ضغط الإطار p_{max} والذي يؤدي إلى انهيار ثقبى لطبقات الرصف :

$$P_{\max} = \frac{Pt\alpha s}{A} + P_L \quad (٣٦٤)$$

حيث إن P و A هما المحيط والمساحة المتلامسة مع بصمة الإطار، t هي سماكة الطبقة السطحية، s هي مقاومة القص للطبقة السطحية، α هو معامل يبين حالة الطبقة السطحية ($\alpha=1$) عندما تكون الطبقة السطحية سليمة تماماً، $\alpha=0$ عندما تكون سماكة الطبقة السطحية متشققة بالكامل) و P_L هو الضغط النهائي لأول ٣٠٠ ملم من المواد أسفل الطبقة السطحية.

تفترض هذه المعادلة النظرية بأن الطبقة السطحية تقص عمودياً على طول محيط بصمة الإطار، وأن قدرة التحمل للمادة أسفل الطبقة السطحية تساوي P_L . ويأتي هذا التقدير من الخبرة المكتسبة في هندسة الأساسات.

(١٤,٥) طريقة الرسم البياني CHART METHOD

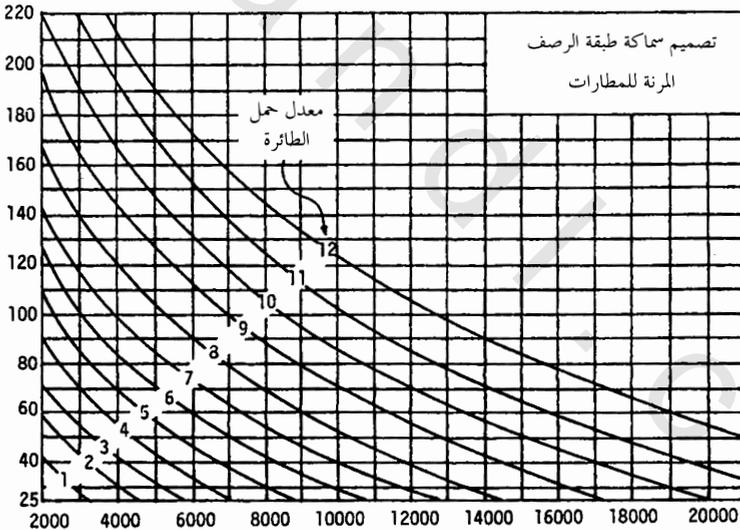
توجد مجموعتان من التقنيات لتصميم طبقات الرصف، أولاهما مبنية على استخدام الرسم البياني والأخرى على استخدام برامج الحاسب الآلي لنمذجة طبقات الرصف وطبقة الأساس بنظام الطبقات المتعددة. وطريقة الرسم البياني توصف طبقة الأساس بمتوسط الصلابة. وتعطى السماكة الكلية الضرورية لطبقات الرصف في الرسم البياني كدالة في متوسط الصلابة وفي العربة المصممة لمستوى معين من حركة المرور. وقد اقترح بريود (Briaud, 1979) هذه المنهجية لتصميم وتغطية طبقات الرصف المرنة لمطار في كندا وهي مبنية على منهجية Mc Cleod للرسم البياني.

تعتمد منهجية Mc Cleod للرسم البياني والمستخدم في كندا لتصميم المطارات على نتائج تجارب اللوح الدوري (Cyclic plate tests) (Transport Canada, 1978). وقد أجريت تجارب لوح Mc Cleod ومقياس الضغط لطبقات الرصف على التوازي (Briaud, 1979) واستنتجت علاقة بين قيمة تحمل لوح Mc Cleod ومعامل مقياس الضغط E_{ore} حيث تسمح هذه العلاقة باستخدام الرسم البياني في شكل رقم (١٤٣) لتصميم طبقات رصف المطارات. ويعتبر الحد E_{or} هو معامل إعادة التحميل والمستنبط

من مقياس الضغط (شكل رقم ١٤٢) حيث يتم إفراغ التحميل إلى الصفر في دورة إفراغ التحميل وإعادته ، وهذا مختلف عن معامل إعادة التحميل والمعرف في البند ٧,٥. ويمكن الحصول على قطاع من قيم E_{or} ضد العمق عند أي موقع لطبقات الرصف ، وذلك بإجراء تجربة مقياس الضغط كل ٠.٣ م بداية من تحت الطبقة السطحية إلى الأسفل حتى ١,٥ متر (شكل رقم ١٤٤). ويحسب معامل إعادة التحميل المكافئ E_{ore} من المعاملات E_1, \dots, E_5 والتي تم الحصول عليها من الطبقات الخمس كالتالي :

$$(٣٦٥) \quad \frac{1}{E_{ore}} = \left(\frac{1}{100} \right) \left(\frac{22.1}{E_1} + \frac{33.5}{E_2} + \frac{24.6}{E_3} + \frac{14.8}{E_4} + \frac{5}{E_5} \right)$$

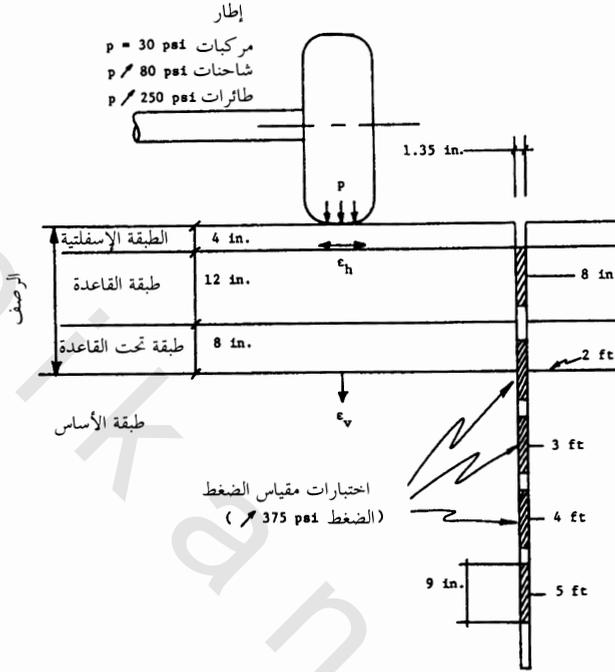
سمك طبقة الرصف الحبيبية
المكافئة (سم)



معامل إعادة التحميل لطبقة الرصف من مقياس الضغط (كيلوباسكال)

شكل رقم (١٤٣). رسم بياني لتصميم رصف مرن بناءً على معامل مقياس الضغط (Briaud, 1979)، أنظر

جدول رقم (٣٣) لمعدل حمل الطائرات.



شكل رقم (١٤٤). التكوين العام لطبقات الرصف واختبارات مقياس الضغط لطبقات الرصف.
يعتمد المتوسط الموزون على فرضية مناسبة لتوزيع الانفعال تحت الإطار. ويتم الدخول للرسم البياني لمقياس الضغط باستخدام E_{ore} وقيمة معطاة لمعدل حمولة الطائرة (باختيار الطائرة كما هو موضح في جدول رقم ٣٣) للحصول على السماكة الكلية المطلوبة لطبقات الرصف والتي تؤدي الغرض بصورة مرضية والموجودة على المحور الرأسي. وتكتب السماكة الكلية t_0 كالتالي :

$$(٣٦٦) \quad t_0 = F_1 t_1 + F_2 t_2 + \dots + F_n t_n$$

حيث إن t_1, t_2, \dots, t_n هي سماكة الطبقات و F_1, F_2, \dots, F_n هي العوامل المكافئة للطبقات وتغير من ١ للأساس الحبيبي غير المتماusk و ٢ للطبقة الأسفلتية. ولتقييم طبقات الرصف تحسب القيمة اللازمة ل t_0 وتقارن بالقيمة الحالية، فإذا كانت القيمة اللازمة ل t_0 أكبر من القيمة الحالية فيتوجب وضع طبقة إضافية بحيث تكون سماكتها هي الفرق بين القيمتين.

من المفيد ذكر العلاقة المقترحة من مينارد (Menard, 1968) بين CBR والضغط النهائي وهي :

$$CBR = 0.017 p_L \quad (٣٦٧)$$

حيث إن وحدات p_L كيلو باسكال.

(٦، ١٤) طريقة نظام الطبقات المتعددة MULTILAYER SYSTEM METHOD

تأخذ في الاعتبار منهجية نظام الطبقات المتعددة المجموعة المكونة لطبقات الرصف وطبقة التأسيس ، وهي عبارة عن نظام الطبقات المتعددة المرنة (شكل رقم ١٤٤). حيث إن كل طبقة لها المعامل الخاص بها ويستخدم برنامج حاسوبي لطبقات متعددة مرنة لمحاكاة تحميل الإطار لطبقة الرصف. ويوجد انفعالان حرجان هما : الانفعال الرأسي ϵ_v عند سطح طبقة التأسيس والانفعال الأفقي ϵ_h عند قاعدة الطبقة السطحية (شكل رقم ١٤٤). فلو أصبحت قيمة ϵ_h كبيرة جداً فإن الطبقة السطحية سوف تتشقق ، أما لو كانت قيمة ϵ_v كبيرة جداً فإن التحدد سيحدث بشكل كبير. وتصمم طبقات الرصف على الوجه الصحيح عندما تكون قيم ϵ_h و ϵ_v أصغر من القيم المسموح بها.

النقطة الأساسية لتصميم الطبقات المتعددة المرنة هي عملية اختيار المعاملات للطبقات المختلفة وأكثر تحديداً طبقات القاعدة وطبقة التأسيس ، ومما لاشك فيه أن الحصول على المعامل للطبقة الإسفلتية أو الخرسانة أسهل وأدق من طبقات التربة. يعتمد معامل التربة على مستوى الانفعال ومستوى الإجهاد ومدة التحميل وعدد الحمل الدوري. وتؤدي معلومات الحركة المرورية إلى تقدير عدد الدورات خلال مدة صلاحية طبقات الرصف. كما تؤدي سرعة السير إلى تقدير مدة التحميل. ويتم الحصول على التقديرات الأولية لمستوى الإجهاد والانفعال بالتنفيذ التجريبي لبرنامج الحاسب الآلي مع استخدام قيم منطقية للمعاملات. وتستخدم هذه التقديرات الأولية لحساب مجموعة جديدة من المعاملات والتي تستخدم كمدخلات لبرنامج الحاسب

الآلي. ويؤدي التنفيذ الجديد للبرنامج إلى الحصول على مستويات جديدة للانفعال والإجهاد، ويستمر التكرار إلى أن تصل إلى قيم للمعاملات يكون الفرق بين قيمتين متلاحقتين في حدود القيمة المختارة للسماح بها (مثلاً ٥٪). يؤدي التنفيذ النهائي للبرنامج إلى الحصول على القيم المتوقعة للانفعالات ϵ_v و ϵ_h حيث يتم مقارنتها بقيم الانفعالات المسموح بها لطبقات الرصف، ويوضح الشكلان رقما (١٤٥ ، ١٤٦) أمثلة على الانفعالات المسموح بها.

جدول رقم (٣٣). معدل تحميل الطائرة (Transport Canada, 1978).

معدل تحميل الطائرة	نطاق الوزن (kN)	أقل وزن (kN)	أقصى وزن (kN)	ضغط الإطار (MPa)	الطائرة
١٠	١٢٥٠-٩٩٠				
١١	١٥٠٠-١٢٥٠	٧٧٠	١٨٠٠	١,٣٨	كونكورد
١٢	(١٨٣٠)-١٥٠٠				
٩	١٠٥٠-٨٥٠				
١٠	١٢٩٠-١٠٥٠	٧١٠	١٥٩٠	١,٣٨	DC-8-63
١١	١٥٦٠-١٢٩٠				
١٢	(١٨٥٠)-١٥٦٠				
٩	٢٣٩٠-١٨٩٠				
١٠	٢٩٣٠-٢٣٩٠	١٧٣٠	٣٦٦٠	١,٣٤	B-747-200
١١	٣٥٦٠-٢٩٣٠				
١٢	-٣٥٦٠				
١٠	١٦٦٠-١٣٩٠				
١١	٢٠٣٠-١٦٦٠	١٠٧٠	٢٠٨٠	١,٢٨	L-1011
١٢	(٢٤٩٠)-٢٠٣٠				
٩	١٦٨٠-١٣٤٠				
١٠	٢٠٢٠-١٦٨٠	١٠٥٠	٢٤٨٠	١,١٤	DC-10-20/30
١١	٢٤٨٠-٢٠٢٠				
١٢	-٢٤٨٠				

تابع جدول رقم (٣٣).

معدل تحميل الطائرة	نطاق الوزن (kN)	أقل وزن (kN)	أقصى وزن (kN)	ضغط الإطار (MPa)	الطائرة
٩	٢٣٤٠-١٨٦٠				
١٠	٢٨٩٠-٢٣٤٠	١٥٩٠	٣٢٨٠	١,٤٨	B-747-100
١١	(٣٦٠٠)-٢٨٩٠				
٩	٢٤١٠-١٩١٠				
١٠	٢٩٦٠-٢٤١٠	١٦٣٠	٣٥٩٠	١,٤١	B-747-200
١١	(٣٦٠٠)-٢٩٦٠				
٨	٢٠٥٠-١٦٧٠				
٩	٢٤٢٠-٢٠٥٠	١٥٣٠	٣٢٨٠	١,٢٨	B-747SR
١٠	٢٨٧٠-٢٤٢٠				
١١	(٣٥١٠)-٢٨٧٠				
٨	٨٦٧-٦٨٥				
٩	١٠٦٠-٨٦٧	٦٦٣	١٤٦٠	١,٢٨	DC-8
١٠	١٢٦٠-١٠٦٠				
١١	(١٦١٠)-١٢٦٠				
٨	٧٩٢-٦٢٣				
٩	٩٧٤-٧٩٢	٤٩٤	١٢٣٠	١,٢٨	Super Hercules
١٠	١١٨٠-٩٧٤				
١١	(١٤٢٠)-١١٨٠				
٩	١١٠٠-٩٢١				
١٠	١٣١٠-١١٠٠	٨٤٥	١٤٧٠	١,٢٥	Airbus A-300B4
١١	(١٦٥٠)-١٣١٠				
٨	٨٨١-٦٤٩				
٩	١١١٠-٨٨١	٦٠٠	١٤٩٠	١,٢٤	B-707-320/420
١٠	١٣٤٠-١١١٠				
١١	(١٥٧٠)-١٣٤٠				
١٠	١٦٣٠-١٣٨٠	١٠٥٠	١٩٣٠	١,١٩	DC-10-10
١١	(٢٤٨٠)-١٦٣٠				

تابع جدول رقم (٣٣).

معدل تحميل الطائرة	نطاق الوزن (kN)	أقل وزن (kN)	أقصى وزن (kN)	ضغط الإطار (MPa)	الطائرة
٩ ١٠ ١١	٥٨٧-٤٧٦ ٧١٢-٥٨٧ (٨٧٦)-٧١٢	٣٩٠	٨٥٠	١,١٦	B-727
٩ ١٠ ١١	١١٣٠-٩١٦ ١٣٧٠-١١٣٠ (١٩١٠)-١٣٧٠	٩٩٠	١٧١٠	٠,٩٣	TU-114
١٠ ١١	١٣٢٠-١٠٧٠ (١٨٢٠)-١٣٢٠	٩٢٠	١٦٢٠	٠,٩٣	IL-62
٨ ٩ ١٠ ١١	٨٤١-٦٩٤ ١٠٣٠-٨٤١ ١٢٩٠-١٠٣٠ -١٢٩٠	٦٩٠	١٤٥٠	٠,٨٥	Super VC-10
٨ ٩ ١٠	٧١٢-٥٦٥ ٩٢١-٧١٢ (١٣٣٠)-٩٢١	٤٩٤	١٠٩٠	١,٢١	Convair 990
٨ ٩ ١٠	٨٨٥-٧١٦ ١٠٨٠-٨٨٥ (١٣٠٠)-١٠٨٠	٥٧٠	١١٥٠	١,١٧	B-707-120B
٨ ٩ ١٠	٤٠٠-٣٢٥ ٥٠٧-٤٠٠ (٦٤٩)-٥٠٧	٢٥٤	٥٦٠	١,١٧	Electra-P3
٨ ٩ ١٠	٤٠٠-٣٢٥ ٥٠٧-٤٠٠ (٦٤٩)-٥٠٧	٢٨٨	٥٤٣	١,١٧	DC-9-51
٨ ٩ ١٠	١٩٣٠-١٦٢٠ ٢٣٢٠-١٩٣٠ (٢٨٩٠)-٢٣٢٠	١٥٣٠	٢٦٨٠	١,٠٨	B-747SR

تابع جدول رقم (٣٣).

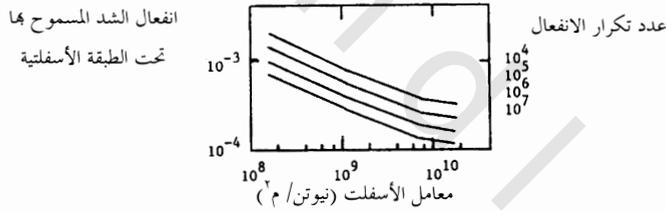
معدل تحميل الطائرة	نطاق الوزن (kN)	أقل وزن (kN)	أقصى وزن (kN)	ضغط الإطار (MPa)	الطائرة
٧	٥٥٢-٤٣٦				
٨	٦٧٦-٥٥٢	٣٨٧	٨٥٤	١,٠٣	Convair 880
٩	٨١٨-٦٧٦				
١٠	(١٠١٠)-٨١٨				
٨	١٨٨٠-١٥٨٠				
٩	٢٢٦٠-١٨٨٠	١٥٣٠	٢٣٣٠	٠,٩٤	B-747SR
١٠	(٢٧٨٠)-٢٢٦٠				
٨	٤٥٤-٣٧٤				
٩	٥٥٦-٤٥٤	٣٦٥	٦٥٢	٠,٩١	Vanguard
١٠	(٦٧٢)-٥٥٦				
٨	٤٩٠-٣٧٤				
٩	٦٠١-٤٩٠	٣٤٧	٦٣٦	٠,٩٠	DC-7-7C
١٠	(٧١٢)-٦٠١				
٨	٤٦٣-٣٦٩				
٩	٥٦٥-٤٦٣	٣٢٥	٦٢٣	٠,٩٠	Super Constellation L-1049
١٠	(٧١٢)-٥٦٥				
٨	٤١٨-٣٣٨				
٩	(٥٢٠)-٤١٨	٢٤٠	٤٥٠	١,١٠	BAC-1-11-500
٧	٣٨٣-٢٩٨				
٨	٤٨٥-٣٨٣	٢٦٠	٤٩٤	١,٠٢	B-737
٩	(٦٢٣)-٤٨٥				
٧	٤٩٨-٣٨٣				
٨	٦٢٣-٤٩٨	٣٢٥	٦٨٩	٠,٦٦	Hercules C130E
٩	(٨١٤)-٦٢٣				
٦	٢٤٠-١٩١				
٧	٣١٦-٢٤٠	١٨٧	٣٢٥	٠,٩٠	Viscount
٨	(٤٣٦)-٣١٦				

تابع جدول رقم (٣٣).

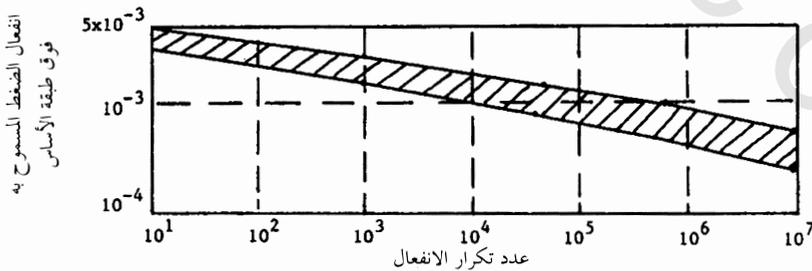
معدل تحميل الطائرة	نطاق الوزن (kN)	أقل وزن (kN)	أقصى وزن (kN)	ضغط الإطار (MPa)	الطائرة
٧ ٨	٣٥٦-٢٧٦ (٤٣٦)-٣٥٦	٢١٩	٤٠٧	٠,٨٨	DC-9-15
٦ ٧ ٨	٥٤٣-٤٣٦ ٦٤٥-٥٤٣ (٧٤٧)-٦٤٥	٤٠٠	٧١٢	٠,٨٣	TU-104
٦ ٧ ٨	٤٥٨-٣٧٤ ٥٤٣-٤٥٨ (٦٤٥)-٥٤٣	٣٥٦	٦٢٣	٠,٧٩	IL-18
٧ ٨	٣٨٧-٣١١ (٤٨٥)-٣٨٧	٢٤١	٤٧٢	٠,٧٢	DC-6B Super
٦ ٧ ٨	٢٩٤-٢٤٠ ٣٥٦-٢٩٤ (٤١٤)-٣٥٦	٢٠٠	٤١٠	٠,٥٠	Argosy 650
٦ ٧	٣٢٩-٢٦٧ (٣٩١)-٣٢٩	٢٠٩	٣٦٥	٠,٦٢	DC-4-M2
٥ ٦	٢٢٢-١٧٨ (٣٤٣)-٢٢٢	-	٢٤٥	٠,٤٨	Convair 440/640
٥	(١٧٨)-١٢٠	١٠٠	١٥٧	٠,٨٣	Gulfstream G159
٥	(١٩٦)-١٤٢	١١٦	١٩١	٠,٦٩	Dash-7
٤ ٥	١٦٥-١١٦ (٢١٤)-١٦٥	١١٣	٢٠١	٠,٥٥	Friendship -Fokker
٤ ٥	١٧٣-١٢٩ (٢١٨)-١٧٣	١١٠	٢٠٠	٠,٥٠	HS-748
٥	(١٤٧)-١٧٣	-	١٩١	٠,٤٠	Dart Herard
٤	(١٣٣)-٧٦	٥٠	٩٠	٠,٦٧	DH-125

تابع جدول رقم (٣٣).

معدل تحميل الطائرة	نطاق الوزن (kN)	أقل وزن (kN)	أقصى وزن (kN)	ضغط الإطار (MPa)	الطائرة
٤	١٠٧-١٥١	٧٦	١٢٠	٠,٣٤	DC-3
٢	٧١-٤٤	-	٩٠	٠,٢٦	Lockheed 18
٣	٧١-٩٨	-	٩٠	٠,٢٦	Lockheed 18
١	٣٦-٠	-	٤٤	٠,٣٨	King Air
٢	٣٦-٦٧	-	٤٤	٠,٣٨	King Air
١	٠-٣١	-	٢٧	٠,٤١	Apache/Aztec
١	٤٠-٠	٢٨	٤٠	٠,٣٢	Dove
١	٤٠-٠	-	-٤	٠,٣١	Beech-18



شكل رقم (١٤٥). انفعال الشد المسموح به للأسفلت (Claessen et al., 1977).



شكل رقم (١٤٦). انفعال الانضغاط المسموح به عند أعلى طبقة التأسيس (after Barker et al., 1977).

(١٤,٧) المعامل كدالة في الإجهاد والانفعال والمعدل والدورات

MODULUS AS A FUNCTION OF STRESS, STRAIN, RATE AND CYCLES

يتأثر معامل التربة بعدة عوامل. والعوامل الرئيسية المؤثرة هي مستوى الانفعال ومستوى الإجهاد ومعدل التحميل وعدد الحمل الدوري الذي تتعرض له التربة. وقد درس جانبو (Janbu, 1963) تأثير مستوى الإجهاد وتبعه العمل الذي قام به كل من دونكن وتشانج (Duncan and Chang, 1970). أما النموذج المقترح لتأثير مستوى الإجهاد فهو كالتالي :

$$E_i = K \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{n_s} \quad (٣٦٨)$$

حيث إن E_i هو معامل المماس الابتدائي (الانفعال = صفر)، θ هو متوسط الإجهاد الفعال المتعامد، K هو المعامل المرجعي ($\theta = p_a$)، p_a هو الضغط الجوي و n_s هو أس الإجهاد.

يكون بالإمكان دمج تأثير مستوى الانفعال عندما تحدد قيمة معامل المماس الابتدائي. وقد درس كندنر (Kondner, 1963) هذا التأثير وأقترح العلاقة التالية :

$$\frac{1}{E} = a + b \varepsilon \quad (٣٦٩)$$

حيث إن E هو معامل القص عند انفعال معلوم ε ، a و b هما القيم الأساسية لتأثير الانفعال.

عند الحصول على المعامل لأي مستوى للانفعال أو الإجهاد، فإنه بالإمكان دمج تأثير معدل التحميل. أقترح رجنز (Riggins, 1981) نموذجاً لتأثير المعدل لمقاومة القص غير المصرف. وقد وسعت لتشمل المعاملات كالتالي :

$$\frac{E_{t1}}{E_{r0}} = \left(\frac{t_1}{t_0} \right)^{-n_r} \quad (٣٧٠)$$

حيث إن E_{t1} و E_{r0} هما معاملا القص المقاسان عند تحميل التربة لمستوى إجهاد معلوم في الأوقات t و t_0 على التوالي و n_r هو أس المعدل.

إن تأثير تكرار التحميل مهم على المعامل ، ولذا فقد اقترح إدريس وآخرون (Idriss et al. 1978) النموذج التالي :

$$(٣٧١) \quad \frac{E_N}{E_1} = N^{-n_c}$$

حيث إن E_N و E_1 هما معاملا القص و n_c هو أس المعدل.

وبإعادة تجميع كل العوامل المؤثرة نحصل على التالي :

$$(٣٧٢) \quad E = \frac{1}{\frac{1}{K} \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{-n_s} + b\epsilon} \left(\frac{t_1}{t_0} \right)^{-n_r} N^{-n_c}$$

نجد أن هناك خمس قيم أساسية لا بد من تحديدها : K, n_s, b, n_r, n_c . وقد طورت تجربة مقياس الضغط لطبقات الرصف للحصول على هذه القيم الخمس من تجربة واحدة.

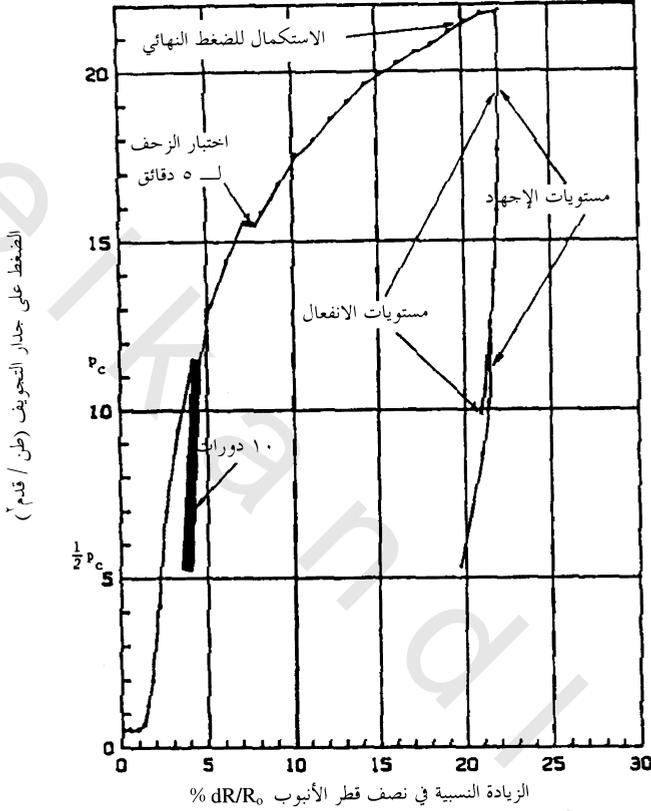
(١٤,٨) اختبار مقياس الضغط لطبقات الرصف

THE PAVEMENT PRESSUREMETER TEST

أوصي الباحثون بعد معايرة الجهاز والتأكد من التشبع (فصل ٣) بتتابع النفخ لكل تجربة عند العمق المطلوب كالتالي (شكل رقم ١٤٧) :

أ- بنفخ الأنبوب الأسطواني بزيادات متساوية من الحجم على أن تستمر كل زيادة ١٥ ثانية. أما حجم الزيادات فيجب أن يكون ٥ سم^٣ وأن توافق ٢,٢٧٪ من الحجم الابتدائي V_0 وإلى $\Delta R/R_0 = 1.13\%$. ويتم الحصول على المنحنى للموقع وذلك بتدوين الضغط والحجم عند كل نهاية زيادة لكل ١٥ ثانية.

ب- إجراء عشر دورات قرب نهاية المنطقة المرنة أو عند الخط المستقيم للمنحنى والتي عندها يكون الضغط p_c ، ويتم إيجاد نهاية الخط المستقيم للمنحنى خلال التجربة بتدوين الزيادة في الحجم Δv والزيادة في الضغط Δp المناظر لها. وتحدد نهاية الخط المستقيم عندما تبدأ نسبة $\Delta p/\Delta v$ بالنقصان. وتنفذ الدورات مابين القيمتين $1/2 p_c$ و p_c على أن تستمر خطوة إنزال التحميل وخطوة إعادة التحميل ١٥ ثانية.



شكل رقم (١٤٧). نتيجة نموذجية لاختبار مقياس الضغط لطبقات الرصف.

ج- تقوم بتطبيق زيادتين أو ثلاث زيادات حجمية من ٥ سم^٣ عند الانتهاء من الدورات وبعدها يتم إجراء تجربة الزحف ولمدة خمس دقائق على أن يتم أخذ قراءات الضغط كل ١٥ ثانية.

د- يتبع تجربة الزحف إكمال تمدد الأنبوب الأسطواني إلى أن يصل تقريباً ١.٥٥ الحجم الأساسي (وهذا يحتاج إلى زيادة حجم الأنبوب الأسطواني إلى ١٢٠ سم^٣) أو

حتى يصل مؤشر الضغط إلى أقصى حد له.

هـ- يتم تفريغ الأنبوب الأسطواني من الهواء عند هذه النقطة، وذلك بتقليل الحجم على النحو التالي : ٠,٥ ، ١,٠ ، ٢,٠ ، ٥,٠ ، ١٠,٠ سم^٣ ، على أن يستمر ١٥ ثانية لكل منها، حتى يصل إلى نصف أعلى الضغط (شكل رقم ١٤٧).

و- يتم نفخ الأنبوب الأسطواني عند الوصول إلى هذا الضغط بحقنه ٠,٥ سم^٣ ثم تفريغها بسحب ٥ سم^٣ لإكمال الدورة. ويتم إنهاء الاختبار بتفريغ الهواء من الأنبوب الأسطواني وذلك بتقليل ٥ سم^٣ لكل خطوة.

(٩, ١٤) الحصول على معاملات من منحنى اختبار مقياس الضغط لطبقات الرصف

OBTAINING MODULI FROM THE PAVEMENT PRESSUREMETER TEST CURVE

يمكن الحصول على المعاملات K و n_s من المنحنى كما يلي : عند تفريغ الأنبوب الأسطواني بحسب قيمة المعامل E_1 خلال إفراغ أول ٠,٥ سم^٣ وقيمة E_2 خلال أصغر دورة ٠,٥ سم^٣ في وسط عملية الإفراغ (شكل رقم ١٤٨) وذلك باستخدام المعادلة رقم ٩١ ، حيث يناظران الإجهاد الحلقي σ_{rr1} و σ_{rr2} على التوالي. قيمة الاجهاد σ_{rr2} تساوي $0.5\sigma_{rr1}$ قدم تقريباً. وقد تم إيجاد طريقة (Briaud et al., 1987; Jamiolkovsky, 1986) لتقدير مناسب لقيمة متوسط الإجهاد الفعال المتعامد (θ) كما يلي :

$$(٣٧٣) \quad \theta = \frac{1}{3}(0.8\sigma_{rr} + \sigma_{ov})$$

حيث إن σ_{rr} هو الإجهاد الحلقي المسلط على جدار الثقب و σ_{ov} هو الإجهاد الرأسي الساكن عند عمق يقع عند منتصف الأنبوب الأسطواني. وفي هذه الحالة نحصل على θ_1 عند التعويض ب σ_{rr1} و θ_2 عند التعويض ب σ_{rr2} . وبمعرفة قيم E_1 ، E_2 ، θ_1 ، θ_2 يمكن استخدام المعادلة ٣٦٨ لإعادة حساب K و n_s . مع ملاحظة أن θ ، σ_{rr} ، σ_{ov} هي إجهادات فعالة بينما مقياس الضغط لطبقات الرصف يعطي إجهادات كلية. يظل الضغط في أنبوب الضغط هيدروستاتيكياً في حالة مقدرة التربة على تصريف المياه

تُحسب المعادلة ٩١ قيمة E_1 و E_{sec} وهما يمثلان الانفعال الحلقي $\epsilon_{\theta\theta 1}$ و $\epsilon_{\theta\theta 2}$ على التوالي: ويحسب هذان الانفعالان بين النقطتين A و B (شكل رقم ١٤٢) اللتين تحدان ميل المعامل (البند ٧).

$$(٣٧٤) \quad \epsilon_{\theta\theta} = \frac{\Delta R_{cA}}{R_c} - \frac{\Delta R_{cB}}{R_c}$$

حيث إن R_c متوسط نصف قطر التجويف بين النقطة A و B ، و ΔR_{cA} و ΔR_{cB} يمثلان الزيادة في نصف قطر التجويف عند النقطة A و B على التوالي. والانفعالات $\epsilon_{\theta\theta 1}$ و $\epsilon_{\theta\theta 2}$ هما انفعالات حلقيه في التربة عند جدار الثقب وتمثل المعاملات E_1 و E_{sec} على التوالي.

أوضح بريود وآخرون (Briaud et al., 1987; Jamiolkovsky, 1986) أن التقدير

المناسب لقيمة متوسط الانفعال العمودي هي كما يلي :

$$(٣٧٥) \quad \epsilon_{\theta\theta} (\text{متوسط}) = 0.32 \epsilon_{\theta\theta}$$

يمكن استخدام المعادلة ٣٦٩ بمعرفة E_1 ، E_{sec} ، $\epsilon_{\theta\theta 1(\text{mean})}$ و $\epsilon_{\theta\theta 2(\text{mean})}$ لإعادة حساب قيم a و b .

يمكن الحصول على المعامل n_r في نموذج معدل التحميل من اختبار إيقاف الضغط خلال عملية نفخ الأنبوب الأسطواني بعد الدورات. ولذلك حساب المعامل E_{s0} والمعامل E_{s5} كمعاملات مماسية عند النقطة المقابلة للوقت المستغرق t_1 و t_2 (شكل رقم ١٤٨). يتم قياس الزمن المستغرق t_1 و t_2 من بداية الضغط، حيث يحسب t_1 دقيقه واحدة و t_2 خمس دقائق. وبمعرفة E_{s0} ، E_{s5} ، t_1 ، t_2 تستخدم المعادلة رقم ٣٧٠ لإعادة حساب قيمة n_r .

يمكن الحصول على المعامل n_c في النموذج الدوري من خلال سلسلة دورات نفخ الأنبوب الأسطواني أثناء الاختبار. ويحسب المعامل E_0 والمعامل E_{10} كمعاملات مماسية للنقاط المقابلة لأعلى نقطة في الدورة ١ والدورة ١٠ (شكل رقم ١٤٨). وبمعرفة E_0 ، E_{10} ، N_1 و N_{10} تستخدم المعادلة ٣٧١ لإعادة حساب قيمة n_c .

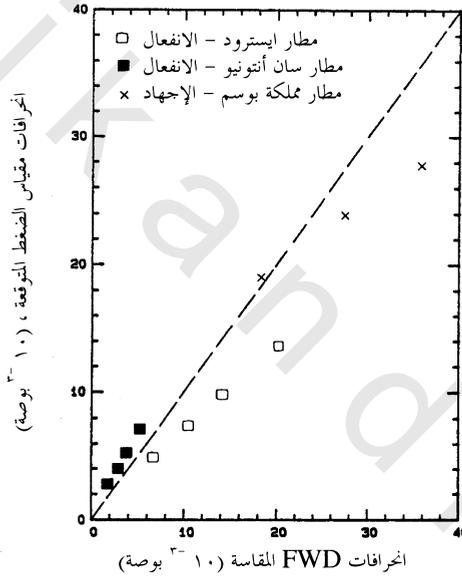
FIELD EXPERIMENTS الحقلية (١٤,١٠)

لقد أجريت التجارب في ثلاثة مطارات بولاية تكساس وهي :
College Station, San Antonio, and Possum Kingdom. عملت طبقات رصف
College Station من الخرسانة المسلحة بسماكة ١٥٠ ملم وطبقة الأساس الحبيبي
بسماكة ١٠٠ ملم ومن تحتها طبقة أساس طينية. عمل المهندسون طبقات رصف San
Antonio من الخرسانة المسلحة بسماكة ٤٠٠ ملم وطبقة الأساس الحبيبي بسماكة
٢٠٠ ملم ومن تحتها طبقة أساس طينية متماسكة جداً. وعملوا طبقات الرصف من
طبقة أسفلتية بسماكة ٥٠ ملم وطبقة الأساس الحبيبي بسماكة ٥٠ ملم ومن تحتها طبقة
أساس رملية كثيفة في مطار Possum Kingdom.

تم إجراء ثلاثة أنواع من التجارب لكل موقع وهي : تجارب مقياس الضغط
والثلاثي المحوري الدوري ومقياس الانحراف للثقل الساقط. أجريت تجارب مقياس
الضغط كل ٣٠٠ ملم للأسفل إلى ١.٥ م وتم الحصول على معاملات مقياس
الضغط بالطريقة التي سبق ذكرها. وأخذت العينات وبصعوبة شديدة خاصة للتربة
الرملية ووضعت في أوعية الضغط ثلاثي المحور وتم الحصول على معاملات
الرجوعية من تجارب ثلاثي المحور الدوري باتباع الطريقة المقررة (Barker and Brabston,
1975). أما مقياس الانحراف للثقل الساقط فاشتمل على إسقاط ثقل على طبقات
الرصف (Briaud et al., 1987) حيث إن قوة التصادم تتغير من ٧,٥ كيلو نيوتن إلى ١٢٠
كيلو نيوتن. وتؤدي البيانات المجمعة إلى قياس انحراف طبقات الرصف تحت هذا
الحمل الديناميكي.

تستخدم المعاملات والقيم الأساسية لمعاملات النموذج المستنتجة من تجارب
مقياس الضغط والثلاثي المحوري الدوري في برنامج الطبقات المتعددة المرنة للحاسب
الآلي لتوقع الانحراف تحت الحمل لتجربة مقياس الانحراف للثقل الساقط FWD. ويختار
معامل كل طبقة بناء على المعلومات المسبقة لمستوى الانفعال و الإجهاد. تعتبر قيم

المعاملات التقليدية لطبقات الخرسانة والأسفلت كبيانات إدخالية. ويتم توقع الانحرافات للمطارات الثلاثة ولكل مستوى حمل استخدم في تجربة FWD، وتُقارن مع الانحرافات المقاسة كما هو مبين في شكل رقم (١٤٩) (ملاحظة : مقياس الرسم ليس لوغاريثمياً). تبين هذه المقارنات أن العامل الرئيسي المؤثر على المعامل للتربة الرملية هو مستوى الإجهاد بينما للتربة الطينية فهو مستوى الانفعال.



شكل رقم (١٤٩). انحرافات PPMT مقابل انحرافات FWD بناءً على الطريقة المقترحة لاختبار مقياس الضغط لكل طبقة تأسيس.