



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
الجامعة التكنولوجية
قسم هندسة البناء والانشاءات
فرع طرق والجسور

هندسة الطرق والجسور

تحسين التربة الضعيفة باستخدام مضافات محلية

مشروع تخرج مقدم الى قسم هندسة البناء والانشاءات في الجامعة
التكنولوجية كجزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في علوم هندسة
الطرق والجسور

اعداد الطالبان :

نور عبد المحسن غانم

احمد صلاح الدين مهدي

بإشراف : أ.د . محمد عبد اللطيف النعيمي

2010 م

1431 هـ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الحمد لله رب العالمين

﴿وما أوتيتم من العلم إلا قليلا﴾

صَبْرًا لِلَّهِ الْعَظِيمِ
وَمِنْ مَنَاجِيهِ

الإسراء-85

الأهداء

إلى من كانوا شمعاً حياتي وأضاءوا طريقة مسيرتي

أبي وأمي

إلى عنوان شبابي وملاح طفولتي إلى من أحيأ لأجلهم

أخواني وأخواتي

إلى البلد الذي أنا له بروحي فاديه

العراق

إلى من كانوا لي نعم الزملاء وشاركوني أجمل أيام دراستي

وأحسست معهم بطعم الصداقة الحقيقية

زملائي وزميلاتي

إلى الذين بذلوا جهدهم وكصفوا جل وقتهم من أجل إكمال

مسيرتي الدراسية

أساتذتي الأفاضل

إلى كل قلب خفق حبا وخوفا علي

اهدي ماوفقني إليه ربي

طالبة المشروع

نور عبد المحسن غانم

احمد صلاح الدين مهدي

شكر وتقدير

الحمد والشكر لله سبحانه وتعالى

لا يسعني الى ان أتقدم بوافر الشكر والتقدير الى
الكادر التدريسي الأفاضل في قسم هندسة البناء
والإنشاءات لتوجيهاتهم السديدة والملاحظات القيمة
التي قدموها لي واخص بالشكر الدكتور (محمد
عبد اللطيف) لما ابداه من آراء وساهم به من جهود
سعى لاتمام هذا البحث نهدي جهدنا المتواضع
املين الرضا والقبول .

المحتويات

الخلاصة

الفصل الاول :

- المقدمة
- هدف المشروع
- توزيع الترب الضعيفة في العراق
- تخطيط المشروع

الفصل الثاني :

تحسين الترب الضعيفة

- مقدمة
- طرق تحسين الترب الضعيفة
- الاستنتاجات

الفصل الثالث :

العمل المختبري

- الترب المستخدمة
- برنامج الفحص
- تحضير النموذج
- فحص الهبوط

الفصل الرابع :

- النتائج والمناقشة

الفصل الخامس

- الاستنتاجات
- التوصيات

الخلاصة :

تنتشر الترب الطينية بشكل واسع في بلدان العالم وفي قطرنا وخصوصا في الجزء الجنوبي . لذا كان هناك ضروري لتحسين خواص هذه الترب وذلك لغرض اقامة المشاريع المهمة عليها في هذا البحث تم استخدام تربة طينية رخوة (soft clay) اخذت من محافظة ديالى واجريت عليها عدة فحوصات فيزيائية وميكانيكية حيث وضحت النتائج بان التربة هي (طين واطى اللدونة) (CL) ذات حد سيولة (43.4) وحد لدونة (17.6) ووزن نوعي (2.67)

لغرض تحسين مواصفات (خصائص) هذه التربة تم استخدام طريقة لتثبيت استخدام المضافات حيث تم اختيار المشبكات البلاستيكية والقصب المتوفر في العراق بكثرة وتم اجراء الفحوصات اللازمة عليها لمعرفة تأثيرها على هبوط التربة

ولغرض تحقيق هذا الهدف (تحسين التربة) تم تصنيع قالب حديدي بابعاد (50 x 24 x 20 سم) واستخدام اساس مصنع بابعاد 8*8 سم ووضعت التربة في قالب الفحص على شكل طبقات ورصت بصورة متساوية ومنظمة داخل القالب بعد خلط التربة يدويا وتغليفها بالنايلون وتركها بمدة 24 ساعة لغرض التأكد من انتظام توزيع الرطوبة بصورة متساوية على النموذج .

تم تسليط ضغوط مختلفة (5 ، 10 ، 15 ، 20 ، 25) كيلونيوتن /م² وتسجيل الهبوط الحاصل مع مرور الزمن (0 ، 1 ، 2 ، 4 ، 8 ، 15 ، 30 ، 60 ، 120) ثم اتباع الاسلوب اعلاه للحالات الخمسة التي درست (استخدام شرائح القصب على سطح التربة القصب على سطح التربة المغطى بالاسفلت وكذلك في منتصف الطبقة استخدام الشبكات البلاستيكية على السطح وفي منتصف الطبقة .

اظهرت النتائج ان الهبوط يقل بنسبة 86% عند استخدام القصب على السطح وبمقدار 83% بعد استخدام الشبكات البلاستيكية على السطح وتقل هذه النسبة كثيرا كلما وضعت طبقات التحسين على عمق اكبر .

الفصل الأول

الفصل الاول

1-1 المقدمة : (Introduction)

ان من اهم المشاكل لانشاء مشاريع هندسية ذات مواصفات فنية ونوعية عالية عدم توفر اراضي تتميز بمواصفات جيدة فيتم في بعض الاحيان اختيار مناطق ومواقع ذات مواصفات فنية اقل لانشاء المشاريع عليها .

من اهم هذه المشاكل هي التربة المتكونة من الطين الرخو (soft clay) التي تتميز بقابلية تحمل واطنة نسبيا لذلك فان المواقع التي تمتلك مثل هذا النوع من التربة تتطلب تحسين خواصها وتثبيتها تبعا لنوع المنشأ .

- يمكن تعريف التربة الطينية الرخوة بصورة عامة بانها :
التربة الحبيبية الناعمة والتي يمر اغلبها من المنخل رقم 200 (mm0.074) وتكون مقاومة القص لها ضعيفة اقل من (25kpa) .
- يتصف الطين الرخو بعدة خواص اهمها :
 - 1- محتوى مائي عالي (90% - 60%)
 - 2- ذات انضغاطية عالية (cc= 0.19 – 0.44)
 - 3- قوة العزل واطنة تتراوح بين (20 – 40) kn/n^2 .
 - 4- هنالك احتمال حدوث انتفاخات swelling وخصوصا الانتفاخات الافقية .

2-1 توزيع الترب الضعيفة في العراق :

توجد التربة الطينية الرخوة في بعض مناطق الجنوب وسنأخذ امثل على ذلك :

- أ- الطين الرخو في الفاو : ويتصف الطين الرخو في هذه المنطقة بمعامل ليونة (30-50)% لذلك يمكن ان تصنف ذات لزوجة واطنة الى وسطية
 - ب- الطين الرخو في كرمه علي : وهي تربة لينة واطنة الى متوسطة طبقا للتصنيف الاساسي
- بعض الخواص الفيزيائية لتربة كرمه علي مدرجة ادناه :
- المحتوى المائي يتراوح بين (29.5 – 40.5)%
 - حد السيولة يتراوح بين (24.9 – 49.5)%
 - حد اللدونة يتراوح بين (19.9 – 29.6)%

3-1 هدف المشروع Aim of study :

ان الهدف الاساس للمشروع هو دراسة التربة الطينية الرخوة من خلال التعريف على مشاكلها ومدى خطورتها على المشاريع الهندسية المقامة عليها واقتراح مواد محلية متوفرة ورخيصة وذات ديمومة عالية كمادة القصب والمشبكات البلاستيكية كمواد محسنة و دراسة تاثير هذه المواد على هبوط التربة (settlement) وبالتالي زيادة قابلية تحملها

4-1 تخطيط المشروع layout of study :

تتكون الدراسة من خمسة فصول بضمنها الفصل الاول ، ويشمل الفصل الثاني الدراسات السابقة التي درست التربة الرخوة وطرق التحسين المستخدمة ولكثرة تواجدها . الفصل الثالث يلخص البرنامج العملي الذي اتبع في تحديد خواص التربة المدروسة وكيفية تصنيع لب الفحص واجراء عملية التسخين .

يوضح الفصل الرابع النتائج التي تم الحصول عليها من البحث وكيفية مناقشتها . واخيرا الفصل الخامس الذي يختص بتوضيح اهم الاستنتاجات والتوجيهات .

الفصل الثاني

الفصل الثاني

1-2 المقدمة :

ان وجود الترسبات السميكة من الترب الضعيفة والهشة علاوة على الهطول الحاصل في الارض يسبب المشاكل الكثيرة للمنشآت الهندسية خاصة في المناطق الواطئة ولتجاوز مثل هذه المخاطر افترضت العديد من طرق التحسين السطحية الخاصة بالتربة منها الطرق الميكانيكية mechanically stabilizes Earth (MSE) .

يتم تحسين التربة الطينية الرخوة لزيادة قوة تحملها Bearing capacity حيث يتم ذلك عن طريق استبدال خصائص التربة وخاصيتها Φ والتماسك C والكثافة P فان الزيادة في الكثافة او الوحدة الوزنية (لا) سيؤدي لزيادة (Φ) او (C) او كلاهما على اساس ان التربة متماسكة سيؤدي الى زيادة في الكثافة ونقصان في نسبة المسامات (void ratio) وبالتالي يؤدي الى تقليل الهطول (settlement) كما ان رص الجزيئات سوف يؤدي عادة الى زيادة معمال المرونة وتقليل الهطول .

هنالك عدة طرق لتحسين خواص الترب الضعيفة ومنها مايلي :

استخدام ركائز من الحصى والرمل والمبازل العمودية vertical darins وطريقة الخلط العميق نورة / سمنت lime/cement وتعتبر هذه الطريقة ملائمة لتحسين التربة وتطبيق الاملاءات Fills في الترب الهابطة .

فعند اختيار اي طريقة يجب ان نأخذ بنظر الاعتبار الزمن والكلفة والكفاءة durability .

وتشير الدراسات الى ان طريقة (MSE) هي ذات كفاءة في التحسين السطحي للارض لمنطقة الاملاءات على الارض الهابطة .

وقد اظهرت العديد من الطرق لتحسين التربة الطينية الرخوة كفاءتها من خلال الطرق التالية :

- 1- تحسين قوة التحمل (Bearing capacity)
- 2- تقليل الهبوط الكلي (total settlement) والهبوط التفاضلي (differential settlement)
- 3- تحسين هبوط الانحدارات (slope settlement)

طرق تحسين التربة الطينية الرخوة :

- 1- التثبيت الميكانيكي (mechanical stabilization)
- 2- الرص (compaction) الرص الديناميكي compaction
- 3- الاعمدة الحجرية (stone columns)
- 4- تحسين التربة باستعمال المضافات

- 3- الاعمدة الحجرية (stone columns)
- 4- تحسين التربة باستعمال المضافات
 - a- مزج التربة بالجير المطفى
 - b- تثبيت التربة بواسطة الاسفلت (المواد القيرية)
 - c- تثبيت التربة بواسطة الاسمنت
 - d- الحقن
- 5- استخدام اعمدة الكلس (lime columns)
- 6- اضافة اعمدة من النورة او الاسمنت (lime / cement columns)
- 7- التجميد
- 8- طريق الخلط العميق
- 9- تصريف المياه
- 10- التحميل المسبق (per – loading)
- 11- استخدام الياف التسليح

2-2 دراسات على التربة الطينية الرخوة :

- 1- من خلال التعرف على تركيب التربة الطينية الرخوة وخواصها اثبتت عدم كفاءتها لاقامة المشاريع الهندسية عليها .
- 2- من اهم المؤشرات للتربة الطينية الرخوة هو ان محتوى الرطوبة يكون عادة مساوي او مقارب الى حد السيولة بنسبة (60 – 90) %
- 3- ان مدى محتوى الرطوبي الذي تبقى فيه التربة في الحالة اللدنة هو مؤشر اللدونة ويساوي عدديا الفرق بين حد السيولة وحد اللدونة ومن خلاله يتم التعرف على تصنيف التربة حسب لدونتها وخواصها الجيوتكنيكية
- 4- اهمية دراسة التربة الطينية الرخوة هو لاقامة المشاريع لانه تكثر مئا هذه الترب خاصة في الاقسام الجنوبية من العراق وتتركز في الفاو وفي كرمة علي
- 5- هناك طرق عديدة للمعالجة تعتمد على نوع المنطقة وكلفة المعالجة والوقت والمنشأ

الفصل الثالث

الفصل الثالث

العمل المختبري

1-3 التربة المستخدمة :

اخذت تربة الدراسة من مختبر ميكانيك التربة في الجامعة التكنولوجية حيث جلبت هذه التربة بصورة كاملة من قضاء بلدروز في محافظة ديالى .

قبل اجراء اي فحص جفت التربة بصورة كاملة وتم طحنها وتقسيمها الى قسمين

2-3 برنامج الفحص :

لغرض تدوير خصائص التربة الفيزيائية تم اجراء فحص التحليل المحلي بعد غسل

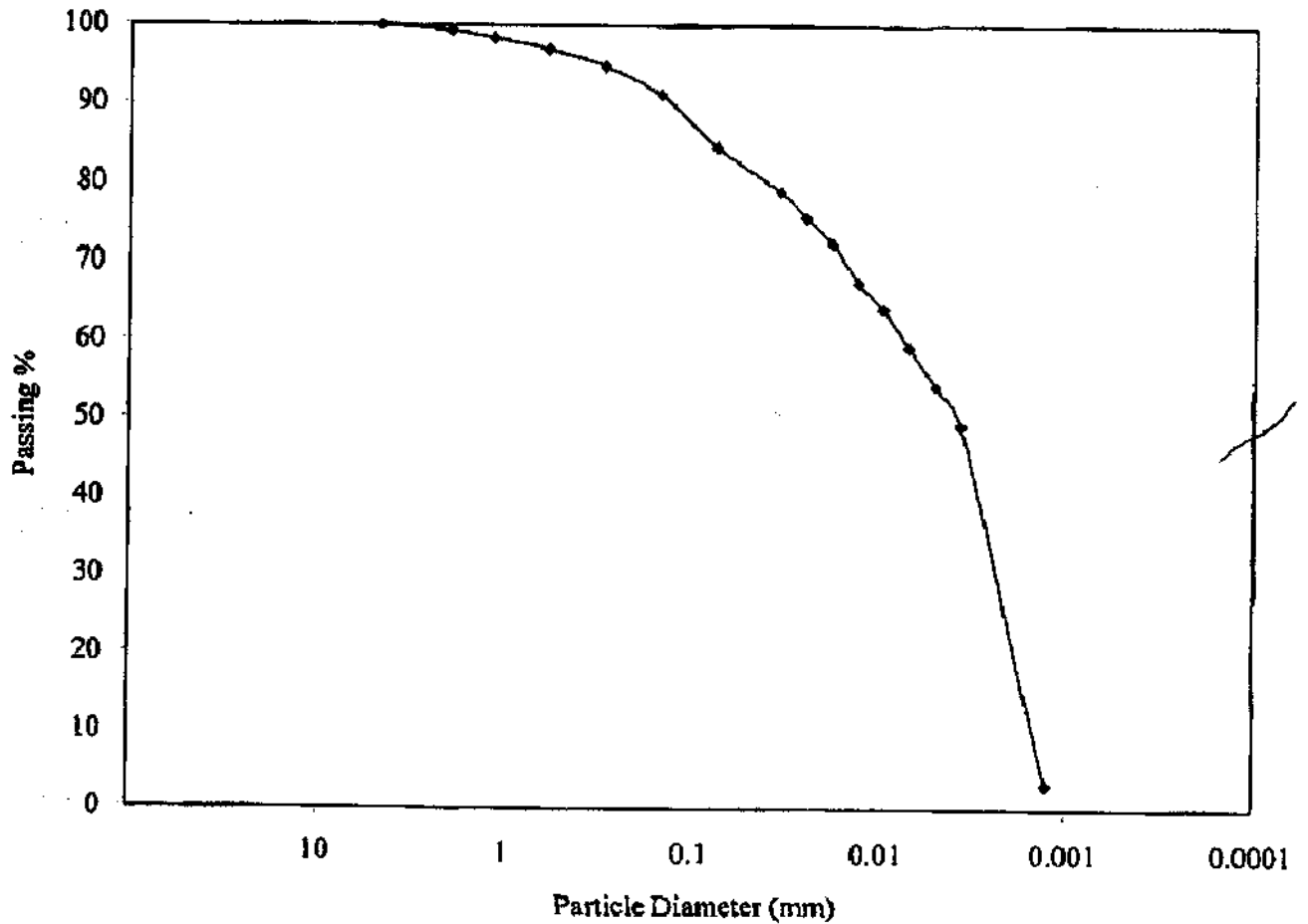


Fig.1- Grain size Distribution

فحوصات حد السيولة وحد اللدونة وكذلك فحص الوزن النوعي يمثل الشكل (1) التوزيع الحبيبي للتربة المستخدمة حيث تبين بان التربة هي طين واطئ اللدونة حسب نظام التصنيف الموحد للتربة.

يبين جدول (1) الخصائص الفيزيائية للتربة

الخاصية	القيمة
حد السيولة	43.4%
حد اللدونة	17.6%
المحتوى المائي	28 %
الوزن النوعي	2.67 %
الكثافة الجافة	13.6 كغم/م ³

3-3 تحضير النموذج preparation of soil study

لغرض تحضير تربة ذات مواصفات رخوة تم احتساب كمية الماء الواجب استخدامها عن طريق استخدام قانون مؤشر السيولة (liquidity index) وكما في المعادلة ادناه :

$$LI \% = \frac{wc - p.L}{pl} \times 100 \quad \dots \quad (1)$$

حيث تم اختبار (LI) يبلغ 42% واستخرجت قيمة الماء اللازم اضافته الى التربة ذات الوزن المعلوم باختيار كثافة مقدارها (13.6) كغم/م³ ثم اضافة الماء الى النموذج على عدة مراحل وخلط يدويا ثم وضع في اكياس من النايلون لغرض التأكد من انتظام الماء في جميع اجزاء التربة .

لغرض دراسة التربة تم تصنيع قالب فحص مكون من مادة الحديد الصلب وبابعاد (50 ، 24 ، 20 سم) ووضعت التربة داخل قالب الفحص على شكل طبقات رصت باستخدام قرص خشبي كما في صورة رقم (1) توضح قالب الفحص والصورة رقم (2) توضح جهاز الفحص الموجود داخل مختبر التربة .



صورة رقم (1) قالب الفحص



صورة (2) جهاز الفحص

4-3 فحص الهبوط :

بعد وضع القالب الحديدي في جهاز الفحص وتثبيت مقياس الهبوط بدقة (0.01) ملم ثم تسليط ضغط عمودي بازدياد ثابت مع الزمن حيث نعرض النموذج الى خمسة ضغوط (5 , 10 , 15 , 20 , 25) وبفترات زمنية (0 , 1 , 2 , 4 , 8 , 15 , 30 , 60 , 120) فترات زمنية معينة حيث يتضاعف الحمل كل 2 ساعة بعد احتساب الهبوط خلال الفترة الزمنية اعلاه.

الفصل الرابع

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

عام:

لغرض دراسة تأثير مواد المعالجة المستخدمة على تحسين خواص الترب الضعيفة فقد تم اختيار مادة القصب المتوفرة بكثرة في اموار العراق وكذلك تم اختيار مادة صناعية هي المشبكات البلاستيكية .

لغرض معرفة مقدار هبوط التربة الطينية فقد تم رصها داخل قالب الفحص واجري عليها فحص الهبوط مع الزمن تحت تأثير الاحمال المختلفة ويبين الشكل رقم 2 الهبوط الحاصل في التربة الضعيفة تحت تأثير خمسة احمال مختلفة (5 ، 10 ، 15 ، 20 ، 25) كيلونيوتن/م² والتي يتم مضاعفتها كل 2 ساعة .

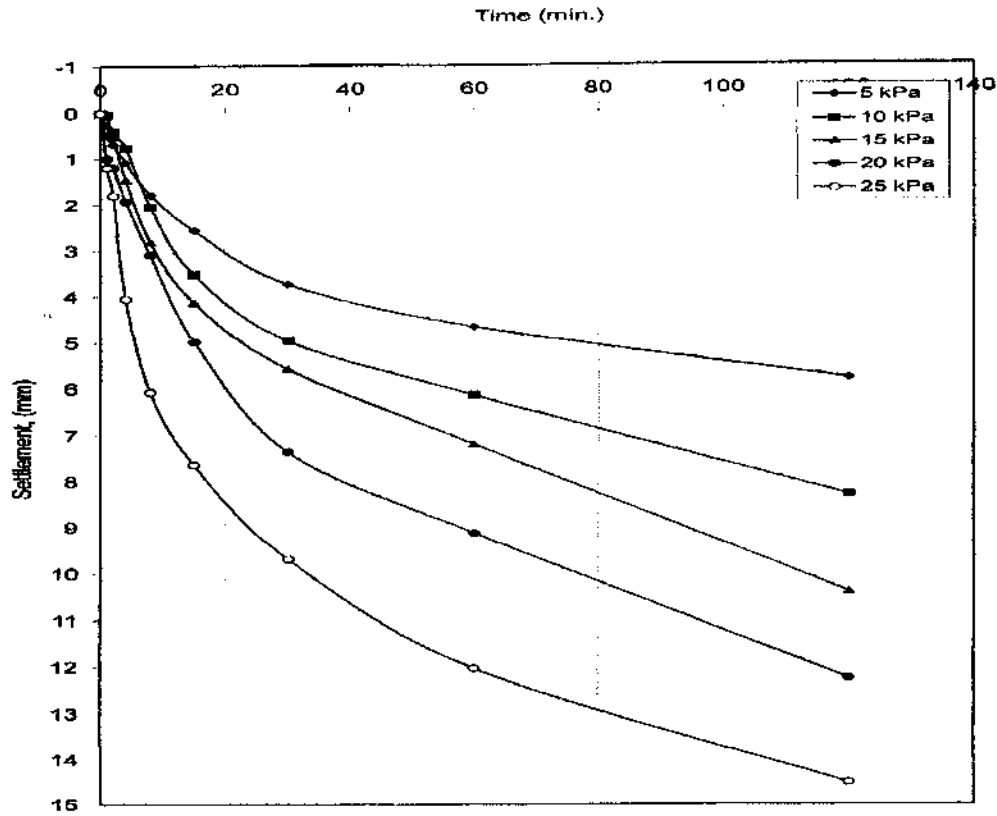


Fig.2-Time - Settlement relationship for natural soil under various stress.

من خلال ملاحظة هذا الشكل رقم (2) نلاحظ بان الهبوط يستمر ويزداد مع الزمن بصورة كبيرة وكذلك يزداد مع الاجهاد ويبلغ ذروته تحت تأثير 25 كيلونيوتن/م².

لقد تم في البحث استخدام حصيرة من القصب وضعت اولاً في الاتجاه الاقصى تحت الاساس وعلى طول سطح التربة ولغرض ديمومتها تم استخدامها بعدما تم تغطيتها بمادة الاسفلت ثم لبيان تأثير اماكن وضع القص فقد وضعت في منتصف الطبقة الطينية الضعيفة و تم حساب قيمة الهبوط مع الزمن وبفترات زمنية مختلفة (0 ، 1 ، 2 ، 8 ، 15 ، 30 ، 60 ، 120 دقيقة) وتحت احمال مختلفة (5 ، 10 ، 15 ، 20 ، 25 كيلونيوتن /م²) وتبين الاشكال (3 ، 4 ، 5) العلاقة بين الهبوط والزمن تحت تأثير الاحمال المختلفة .

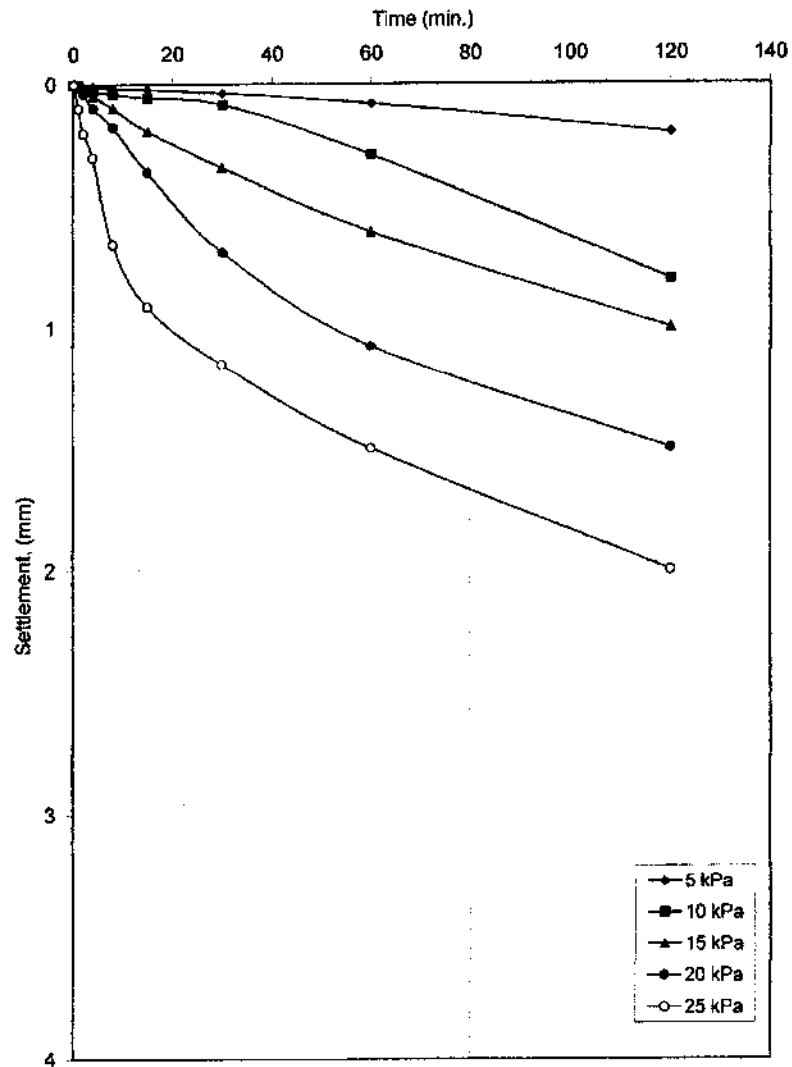


Fig.3-Time - Settlement relationship for natural soil reinforced with Reed layer at top under various stress.

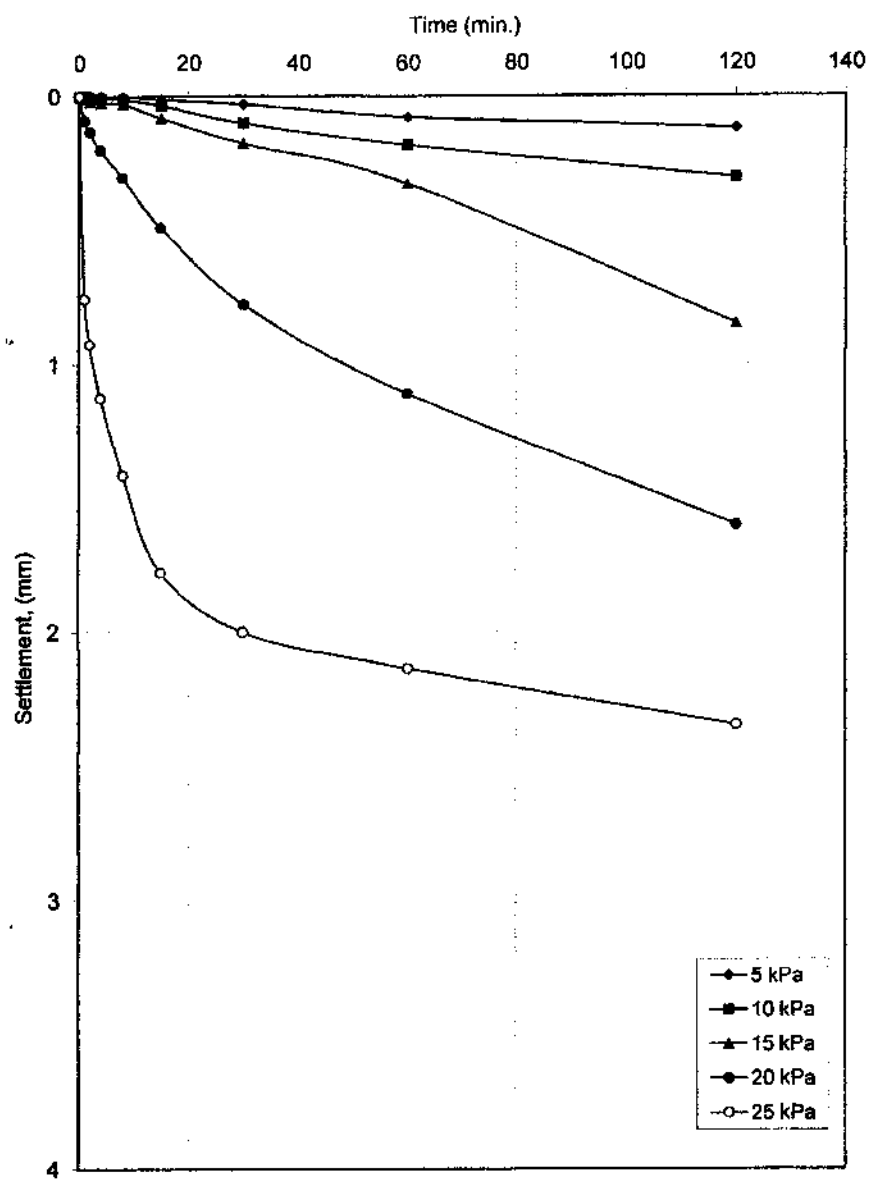


Fig.4-Time - Settlement relationship for natural soil reinforced with Reed layer coated by Asphalt at top under various stress.

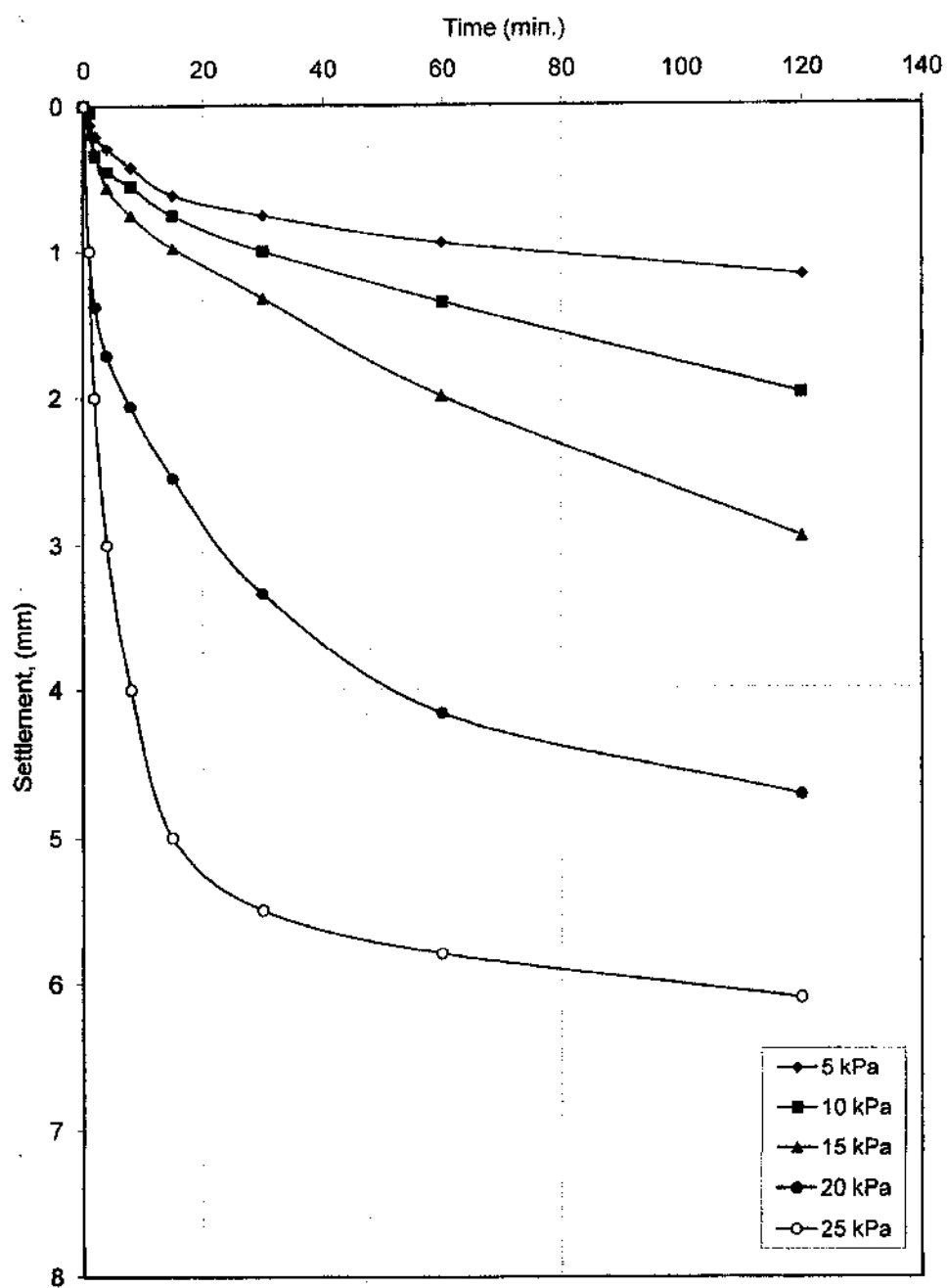


Fig.5-Time - Settlement relationship for natural soil reinforced with Reed layer coated by Asphalt at mid thickness of soft soil under various stress.

نلاحظ في هذه الاشكال بان الهبوط يقل بشكل كبير وملحوظ عند وضع شرائح القصب تحت الاساس مباشرة وهذا النقصان الحاد في الهبوط يكون نتيجة لزيادة المسافة موزع عليها الاجهاد وتقليل تغلغل الاساس داخل التربة مما يؤدي الى تقليل انضغاطية التربة.

كذلك بين العلاقة بين الهبوط والزمن في الحالة الثانية التي يتم فيها تغطية القصب بمادة الاسفلت نلاحظ بان الهبوط هو اكثر مما هو عليه عند استعمال القصب لوحده وهذا الهبوط يحصل لكون الاسفلت يحصل فيه انضغاط اقل ويقل التلاصق بين التربة والقصب المفروش على سطحها .

اضافة الى ذلك بينت الانتاج بان الهبوط يزداد مع الزمن وتحت تاثير الاجهاد كلما ازدادت المسافة بين الاساس ومكان وضع القصب حيث في هذه الدراسة وضع القصب على مسافة 10 سم من سطح التربة وازداد الهبوط بشكل ملحوظ نتيجة لانضغاط التربة فوق القصب .

لاغراض المقارنة وضعت طبقة من المشبكات البلاستيكية على سطح تربة تحت الاساس مباشرة وعلى مسافة 10 سم ايضا وبالشكال ادناه (6 ، 7) تبين نتائج الهبوط مع الزمن تحت الاحمال المختلفة .

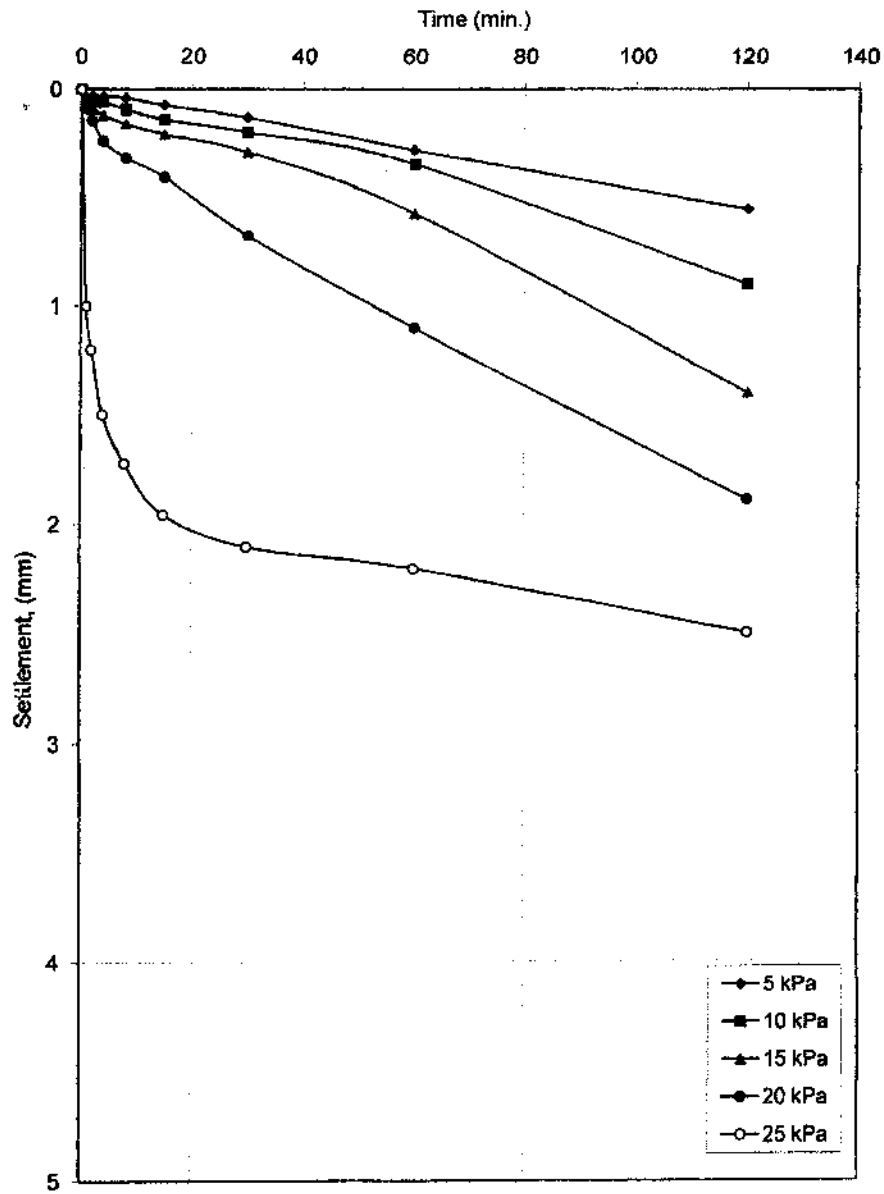


Fig.6-Time - Settlement relationship for natural soil reinforced with geogrid at the top of soft soil under various stress.

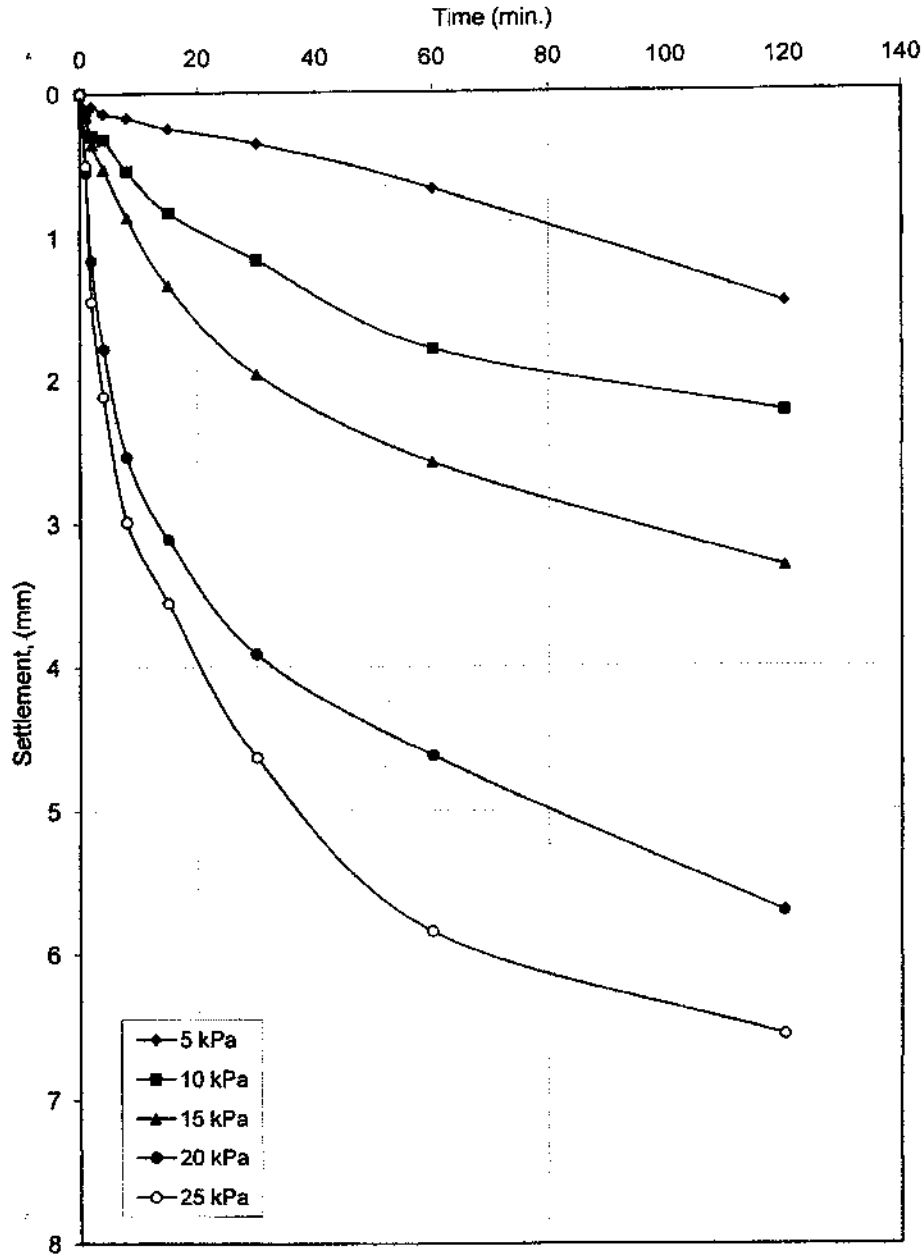


Fig.7-Time - Settlement relationship for natural soil reinforced with geogrid at the mid layer of soft soil under various stress.

من هذه الاشكال يمكن الاستنتاج بان الهبوط يقل ايضا بصورة كبيرة عند وضع الشبكات على السطح ولكن هذا الهبوط يزداد ايضا عند وضع الشبكة على مسافة 10 سم من سطح الطبقة الطينية الرخوة وهذا النقصان في الهبوط الحاصل في الحالة الاولى من استخدام الشبكات البلاستيكية يكون نتيجة زيادة التداخل بين التربة والشبكات البلاستيكية وبالتالي يزداد من قابلية تماسكها .

يبين الشكل (8) العلاقة بين الاجهاد والهبوط النهائي لكل حمل من الاحمال المستخدمة لكافة حالات التربة (الطبيعية والمعالجة).

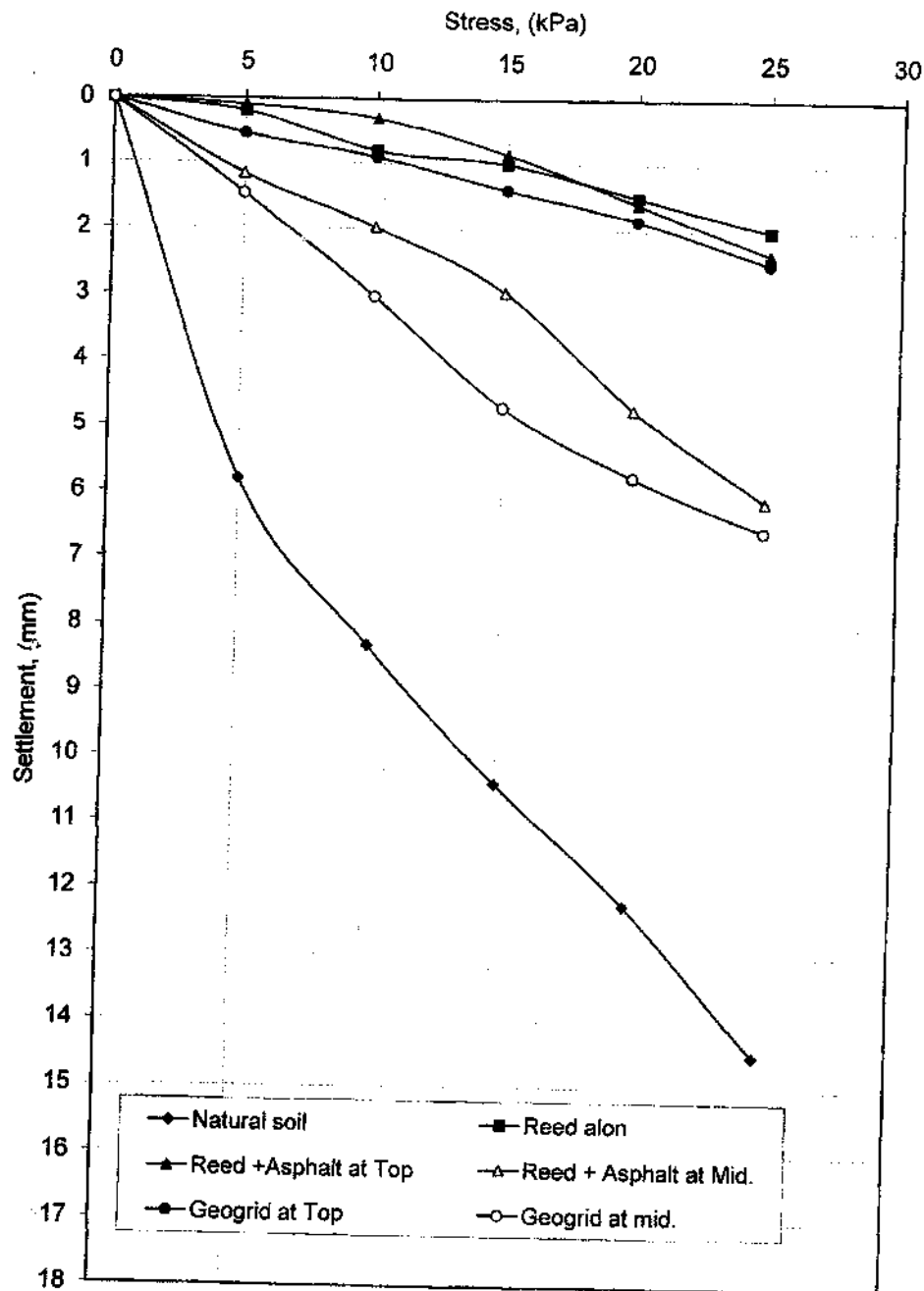


Fig.8- Effect of Reed and Geogrid on Settlement of the Soft soil.

سنلاحظ من الشكل اعلاه بان معظم الهبوط يحصل في الاحمال القليلة ثم يبدأ بالازدياد مع الزمن ولكن بشكل قليل .

لمعرفة درجة التحسين فقد تم رسم علاقة بين لو غارتم الزمن والهبوط الحاصل ولكل حمل من الاحمال التي تعرضت لها التربة اثناء الفحص وكما مبين في الاشكال (9 , 10 , 11 , 12 , 13) .

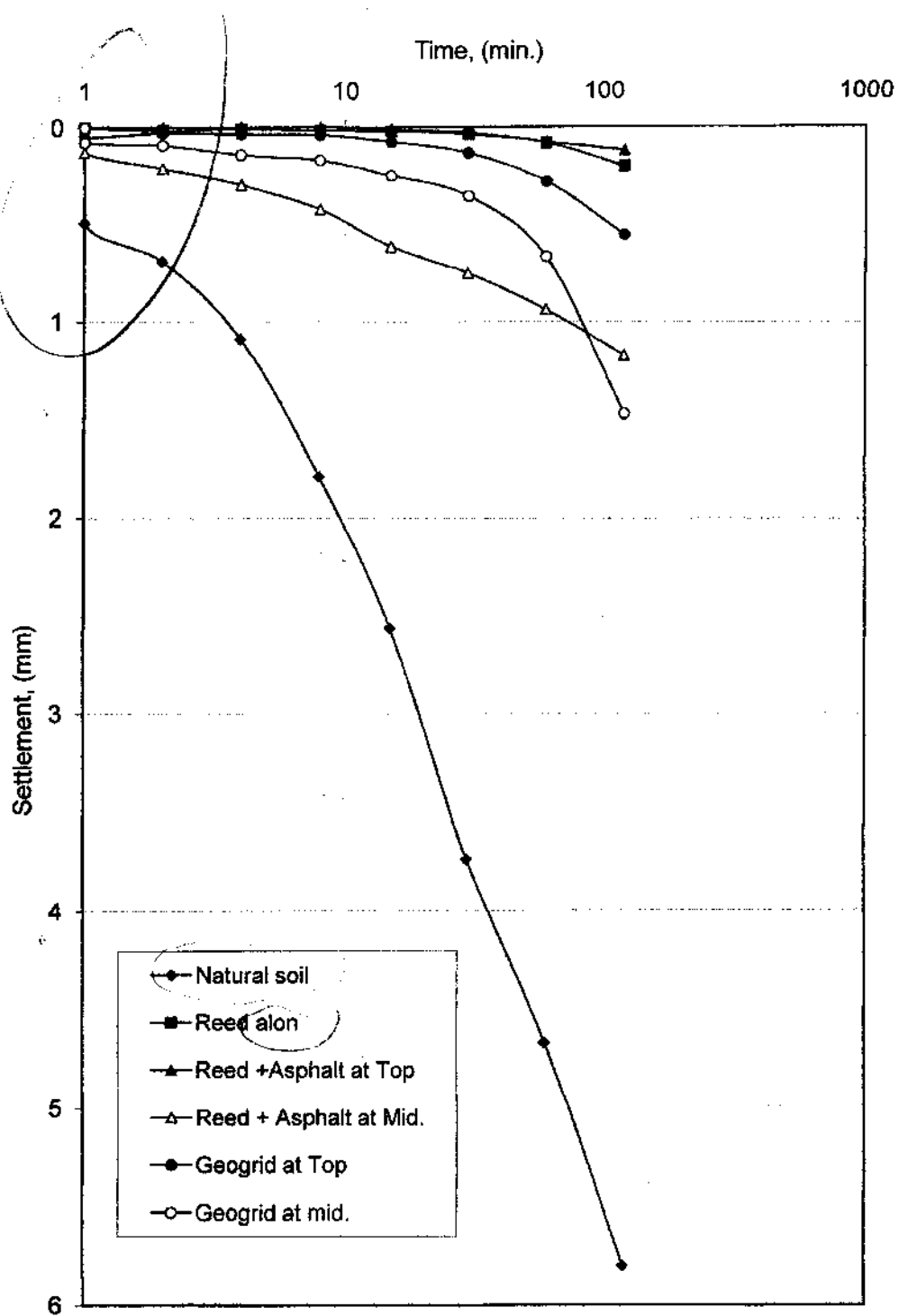


Fig.9-Time - Settlement Relationship for natural and improvement Soil under 5 kPa applied stress

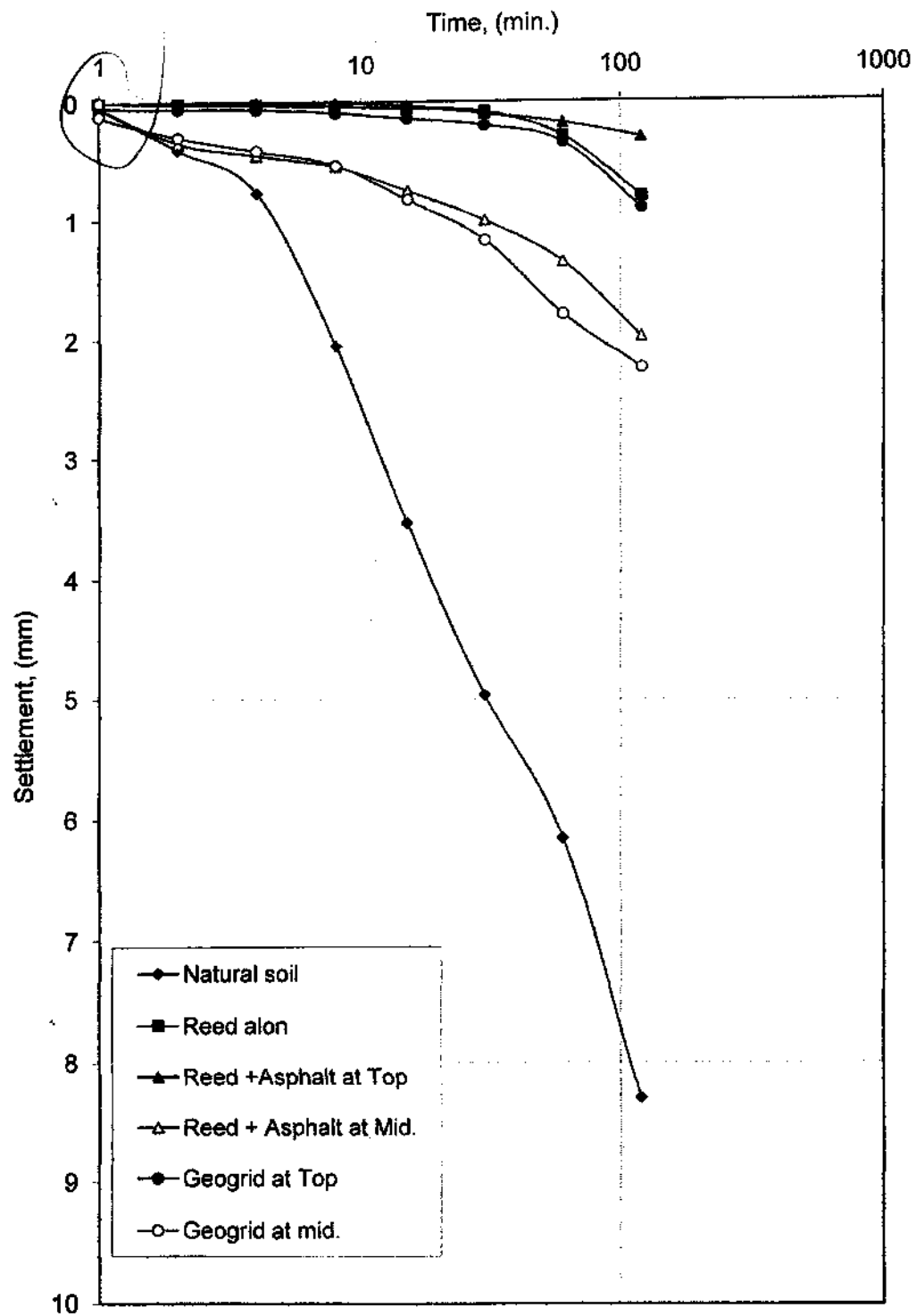


Fig.10-Time - Settlement Relationship for natural and improvement Soil under 10 kPa applied stress

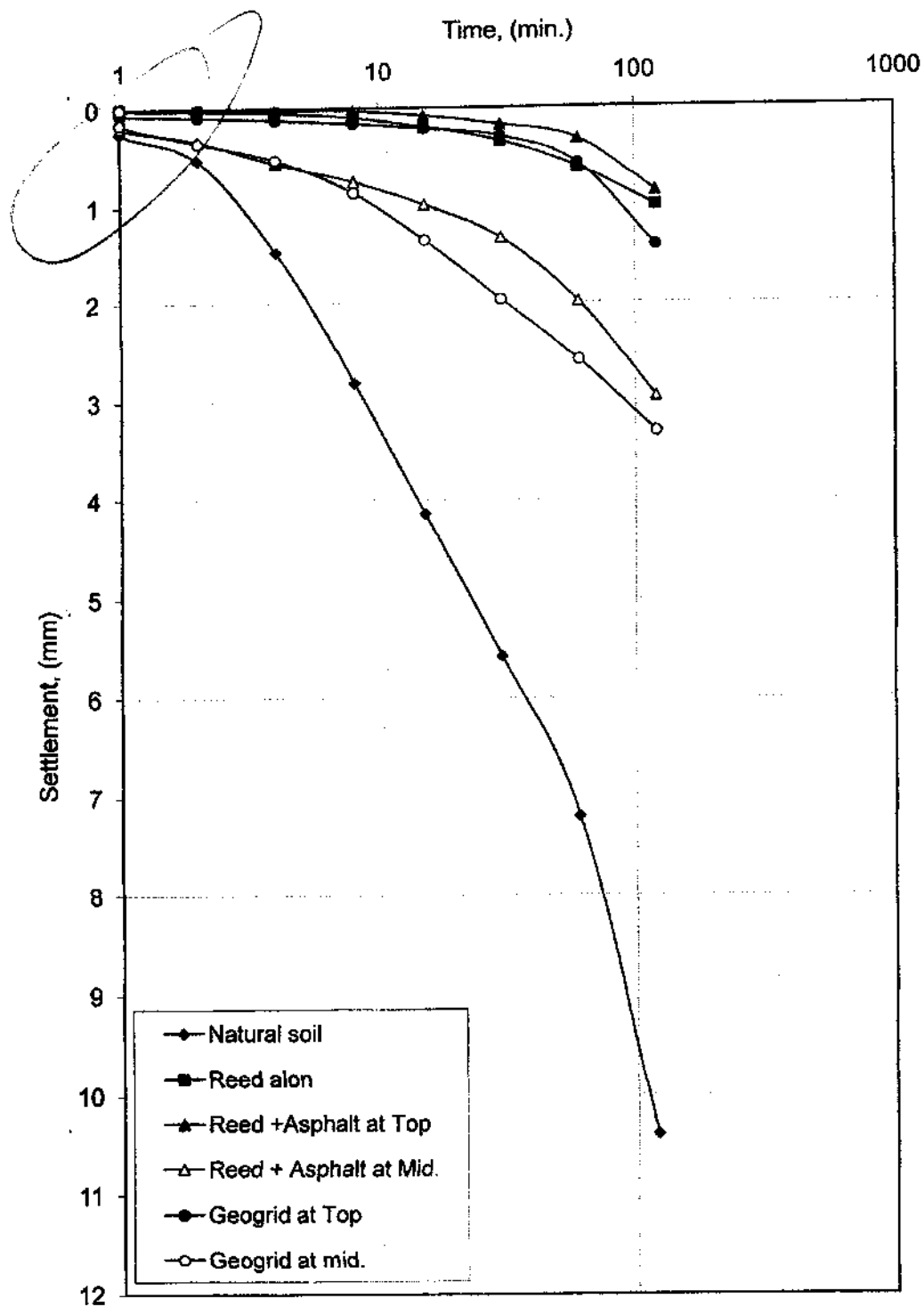


Fig.11-Time - Settlement Relationship for natural and improvement Soil under 15 kPa applied stress

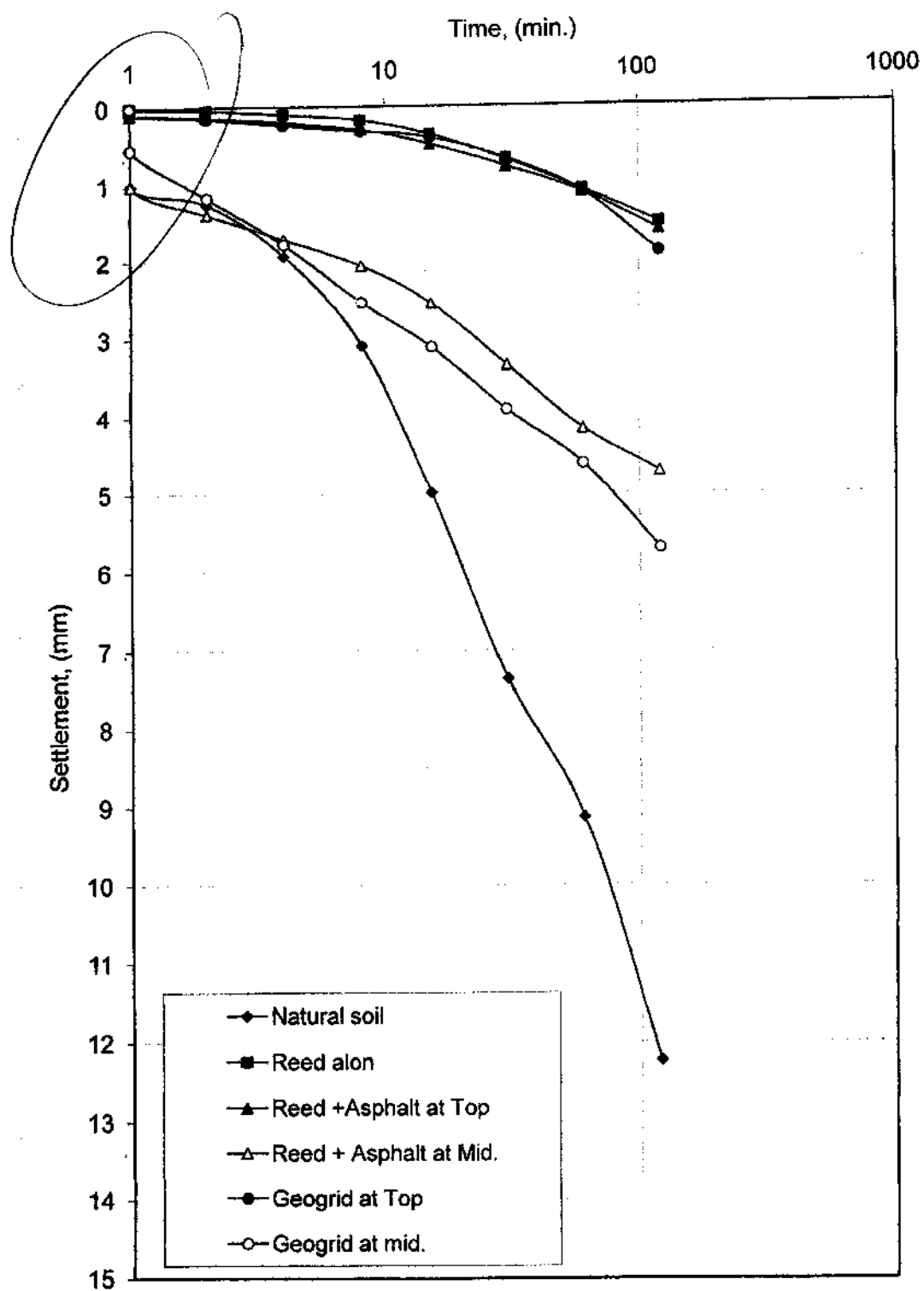


Fig.12 Time - Settlement Relationship for natural and improvement Soil under 20 kPa applied stress

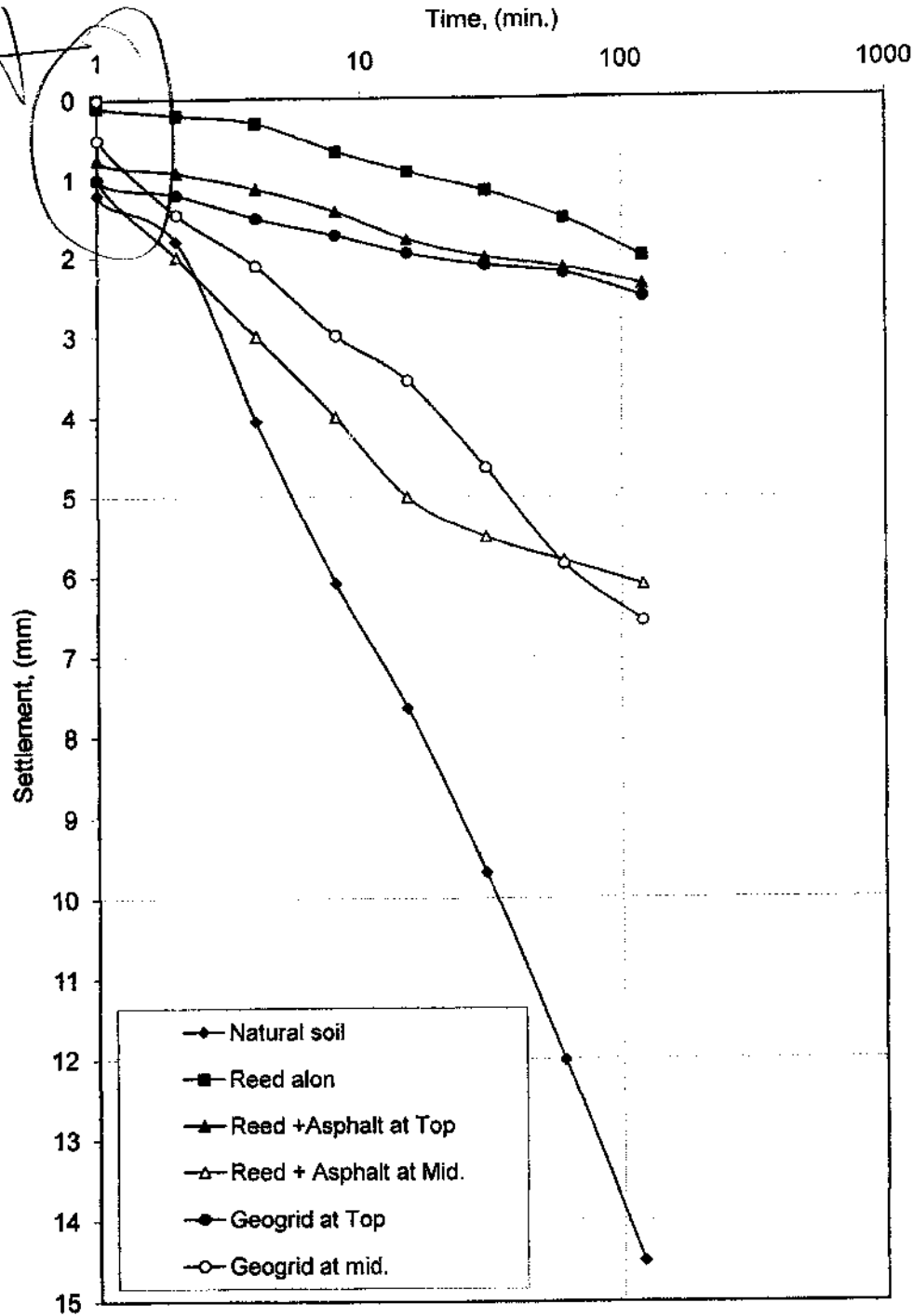


Fig.13-Time - Settlement Relationship for natural and improvement Soil under 25 kPa applied stress

من خلال هذه الاشكال يبين جميع الحالات تؤدي الى تحسين في خصائص التربة الضعيفة عن طريق ملاحظة الهبوط لكل حالة مما يؤدي الى تقليل انضغاط التربة وزيادة قابلية تحملها .

وبين الشكل رقم (14) ملخص التحسين لكل حالة من الحالات المدروسة في هذا البحث .

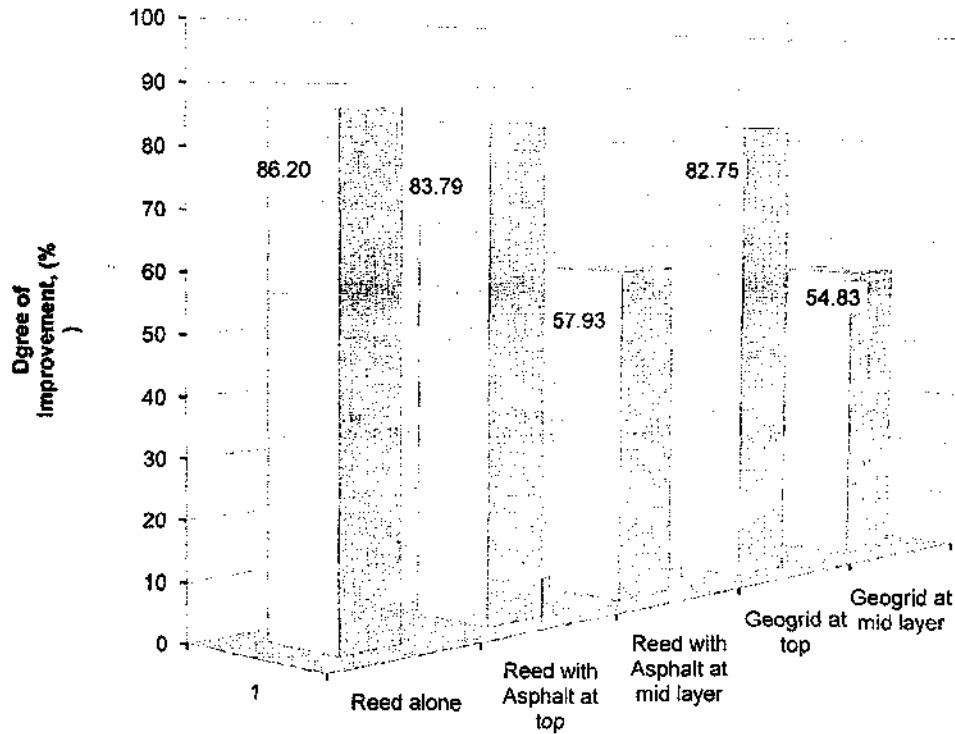


Fig. 14- Effect of reinforced material on settlement of soft clay

حيث يبين الرسم اعلاه بان اكثر قيمة لتحسين ممكن الحصول عليها في حالة استخدام القصب عند سطح التربة ودون تغطيته بمادة الاسفلت يليه استخدام المشبكات البلاستيكية عند سطح التربة ويقل هذا التحسين عند وضع القصب او المشبكات عند منتصف الطرق الطينية .

الفصل الخامس

الفصل الخامس

الاستنتاجات والتوصيات

من خلال نتائج الدراسة يمكن الاستنتاج مايلي :

- 1- ان استخدام القصب تحت الاساس مباشرة وبدون طلاءه بالاسفلت يؤدي الى احداث تقليل حاد في الهبوط الحاصل للترب الضعيفة نتيجة ازدياد المساحة السطحية المعرضة للاجهاد .
- 2- استخدام الشبكات البلاستيكية عند السطح يؤدي الى تحسين انضغاط الترب الرخوة نتيجة لازيادة التداخل بين التربة وفتحات والشبكات البلاستيكية .
- 3- درجة التحسين تقل كلما ازدادت المساحة بين اماكن وضع مواد التحسين و سطح التربة نتيجة حصول انضغاط في الطبقة الواقعة فوق مواد التحسين .
- 4- استعمال الاسفلت مع القصب يؤدي الى تقليل التحسين فيما لو استخدم القصب لوحده وهذا بسبب كون الاسفلت ينضغط ايضا ويؤدي الى تقليل التلاصق بين القصب والتربة التي تسنده .

التوصيات :

توصي الدراسة بما يلي :

- 1- دراسة تأثير القصب على انضغاط الترب الرخوة.
- 2- استخدام القصب في الاتجاه الطولي واعادة الدراسة للتأكد من انه الافضل وضع القصب في الاتجاه العرضي نتيجة لتقليل الهبوط (Deflection) في القصب .
- 3- دراسة تأثير استخدام عدة طبقات من القصب او الشبكات البلاستيكية على انضغاط الرخوة في العراق .
- 4- استخدام طبقة من المشبكات البلاستيكية والقصب معا لمعرفة تأثير التداخل الحاصل بين الاثنين على انضغاطية التربة .

Reference

- 1- ميكانيك التربة وهندسة الاسس
تأليف : ب.سنغ ش. براكاش
تعريب د.مهند عمر عشو
2- كيمياء التربة

تأليف : د. خالد جاسم طاقة د. عدنان قاسم حسين

3-Abdul- Hassain , H.A (2000) "the behavior of group of stone columns in soft clay " M.sc.thesis , university of technology , p.66

4-Abdul-Rahman – I,J (2000)"finite element analysis of stone piles " M.Sc .thesis , university of Baghdad p.117

5-Renka R-A.k (2008) Improving soft clay soils using dynamic compaction and stone columns M.S-c thesis building and construction Eng –DEP

6- Al – kafaja , z-A (1996) " Reinforcement of soft clay using granular columns .