نمذجة تردي بنية الوسط الحبي تحت تأثير الاجهادات المرتفعة

الدكتور المهندس عفيف رحمة[1]

الملخص

نعتمد في تحديد الخصائص الميكانيكية للتربة على مبدأ الثبات والتجانس، غير أن الحقائق والدراسات العلمية بينت أن هذه الخصائص تتعرض لتطور ملحوظ في ظل الإجهادات المرتفعة نتيجة لتطور البنية الفيزيائية لهذا الوسط، إن في شروط التحميل الساكنة أو الديناميكية، مما يدعو لضرورة الأخذ بهذا التطور في دراسة كثير من المنشآت وتصميمها كالسدود والأبنية العالية والمنشآت ذات الخصوصية كمنشآت الطاقة التي تولد إجهادات ذات المصدر الحراري وغيرها من المنشآت المهمة.

نستعرض في هذا البحث بعض الأسس في تحليل المعطيات وتطبيقها في مجال دراسة تطور خصائص التربة، ونقترح بعض العلاقات الاحتمالية لحساب تطور بنيتها الحبية تحت تأثير الإجهادات المرتفعة.

[1] قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة دمشق.

مقدمة

تتصف التربة بأنها مادة حبيبية غير نموذجية وذات بنية فيزيائية وخصائص ميكانيكية عشوائية، نعمد لتقريب خصائصها إلى خصائص منتظمة ومتجانسة بواسطة مجموعة من الاختبارات والمقاييس الحقلية، وننطلق عند استثمار هذه الخصائص من ثباتها وتجانسها في حالات التحميل المختلفة.

غير أن الحقائق العلمية بينت أن فرضية الثبات هذه رغم عدم صحتها تبقى مقبولة من أجل حالات التحميل الشائعة التي لا يتجاوز فيها الإجهاد الفراغي البدائي σ_3 المطبق عليها{ 0.5-1Mpa} (Roberts و De Souza (1958)، Feda (1971))، حيث يبدأ من أجل سوية أعلى من الإجهاد ظهور تغيرات ملموسة في الخصائص الفيزيائية التي يرافقها تغيّر جوهري في الخصائص الميكانيكية للوسط.

ولعل أهم ما بينه Miura و Ohara (1979)، Billam (1971) دور انكسار حبيبات التربة في انخفاض عامل مرونة الوسط E، بينما أوضح كلٌّ من Bishop (1965)، Marsal (1973)، Hicher وفريقه (1995) العلاقة بين هذه الظاهرة وازدياد الانضغاطية β، أما Lee و Seed (1967)، Vesic و Clough (1968)، Miura (1985) فقد بينوا إسهام هذه الظاهرة في انخفاض زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة φ_c.

إن البحث في ظاهرة التطورات الفيزيائية هذه تبدو بالغة الأهمية لدورها في تطور الخصائص الميكانيكية لهذا الوسط ولاسيما عند تعرضه للأحمال الديناميكية والزلزالية حيث يعدم دور الزمن في إعادة تشكل المادة وإعادة استقرارها البنيوي اللازم لاستقرار المنشأة. ففي مجال الدراسات الزلزالية بين Le Long (1968) أثر شدة التردد في زيادة تردي بنية الحبيبات وانكسارها كما أوضح أن هذه الظاهرة تتجلى بشكل واضح في الدورة الأولى للتحميل؛ كما بين Miura و Ohara (1979) دور عدد الدورات في تطور ظاهرة انكسار الحبيبات وما يرافقها من تردٍّ في الخصائص الميكانيكية للتربة.

نلاحظ من ذلك أهمية الأخذ بهذه الظاهرة في دراسة المنشآت الحيوية كالسدود والأبنية العالية والمنشآت ذات الخصوصية كمنشآت الطاقة التي تولد إجهادات ذات المصدر الحراري وغيرها من المنشآت المهمة.

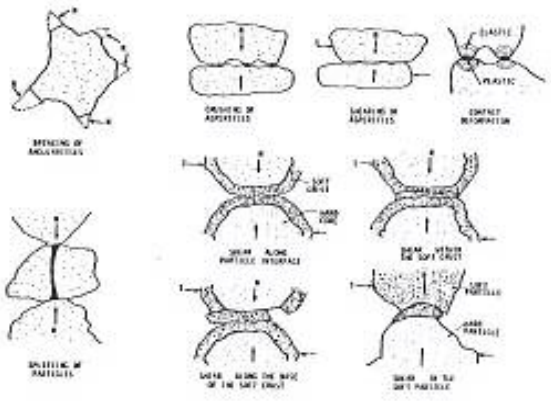
العوامل المؤثرة في حدوث الظاهرة

تزودنا البحوث العالمية بنتائج دراسات توضح بشكل واسع العوامل المؤثرة في حدوث هذه الظاهرة، فقد بين Marsal (1973) أن شدة انكسار الحبيبات متناسب مع شدة الأحمال المطبقة، في حين بين Vesic و Clough (1968) دور شدة الإجهاد الفراغي البدائي، في حين أظهر Miura و Ohara (1979) أهمية طريقة تطبيق الأحمال: تحميلاً ساكناً أو ديناميكياً، وبين Bolt (1995) العلاقة بين عدد الدورات الديناميكية وتردي البنية الحبية للوسط، أماMarsal (1967) فقد بين دور قياس الحبيبات وحجمها وفسر تعرض الحبيبات الكبيرة لمعدل انكسار أكبر للاحتمال الأكبر في التردي البنيوي الداخلي للحبيبات والموروث عن التصدعات في الصخر الأم، أما Hall و Gordon (1963) فقد أوضحا دور التدرج الحبيCu وبينا أن الوسط ذات التدرج الحبي الممتد أقل تعرضاً لهذه الظاهرة من التدرج الحبي المحصور، كما أوضح Lo و Roy (1973) أهمية البنية الفلزية لمادة الوسط في تطور هذه الظاهرة وفي شكل انكسار الحبيبات، أما Ramamurthy و فريقه (1974) فقد بينا أن لانكسار جزيئات الوسط الحبي عتبة لا يمكن تجاوزها ممثلة بالخط الأفقي المماسي لمنحى تردي البنية الحبية حيث تمثل هذه العتبة انعداماً في سرعة تردي الحبيبات.

أشكال انكسار الحبيبات وتطور البنية الحبية

لقد أوضح Ramamurthy (1969) كعدد من الباحثين أشكال انكسار الحبيبات وفصل بين ثلاثة أنماط رئيسية: حتّ في رؤوس الحبيبات وتقشر سطح الحبيبة أو انقسام واضح ومباشر لجسم الحبيبة.

إنَّ هذه التطورات الفيزيائية في شكل الحبيبات تعمل على تعديل البنية الحبية التي نعبّر عنها بمنحنى التحليل الحبي للتربة والذي يتجلى في ازدياد نسبة المواد الناعمة N°200 (حسب ASTM) وازدياد الوزن النسبي للحبيبات المارة من المهزات الدنيا في سلم الترتيب الحبي كما يؤدي إلى انخفاض المعدل الوسطي لأبعاد الحبيبات وإلى ازدياد واضح في التدرج الحبي Cu.



شكل 1 انكسار الحبيبات حسب Ramamurthy (1969)

نمذجة انكسار الحبيبات

نظراً لعدد العوامل المؤثرة في شدة انكسار الحبيبات وللتداخل في أدوارها لم يكن من السهل وضع تقييم دقيق لمقدار هذه الشدة لذلك لجأ عدد من الباحثين إلى وضع دلائل أو معايير نسبية تسمح بتقدير هذه الشدة بما يتوافق والغرض من عملية القياس. اعتمد Lee و Farhoomand (1967) في دراستهم لمواد مرشحات السدود على استخدام النسبة بين مقياس الحبيبات d15 قبل التحميل وبعده، أما Ramamurthy وفريقه (1974) فقد اعتمدوا على فرق المساحة بين منحنيي التحليل الحبي قبل التحميل وبعده، بينما اعتمد Miura و Yamanouchi (1975) على الفارق في قيمة المواد الناعمة

N°200 في حين اعتمد Marsal (1977) على مجموع الفروق الموجبة بين منحنى التحليل الحبي قبل التحميل وبعده، في حين أخذ Datta و فريقه (1979) الفارق في قيمة d10.

ولعل أهم علاقة معتمدة في تقييم مقدار تطور البنية الحبية للوسط تلك المقدمة من Hardin (1985) والتي تأخذ القابلية الكامنة b_p لانكسار الحبيبات كمعيار لقياس شدة حدوث هذه الظاهرة وقد مثلت هذه القابلية بالسطح المحصور بين منحنى التحليل الحبي بعد التحميل وخط 100% من مخطط نسبة المواد المارة من المهز (محدود أفقياً بقيمة المواد الناعمة N°200).

أما Fukumoto (1992) فقد حاول وضع تصور رياضي جبري لتطور البنية الحبية ولمنحنى التركيب الحبي بمعادلة من نمط سلسلة عددية من الشكل:

$$p_n = 1 - \sum_{t=0}^{n-1} \binom{m+i-1}{m-1} \cdot (1-r)^m \cdot r^1 \qquad [1]$$

إلا أن جدوى هذا التصور انحصر في نمذجة تربة مبنية مخبرياً وفق تدرج حبي اصطفائي ومنتظم.

التحليل الإحصائي

حددنا في بداية التحليل العوامل التي يمكن أن تؤثر في شدة حدوث ظاهرة انكسار حبيبات الوسط الحبي بشكل مباشر أو بشكل غير مباشر فكان تصنيفها حسب Biarez و Hicher (1993):

– الخصائص الفيزيائية : قياس الحبيبات d المارة من المهّز، وشكل الحبيبات R

– الخصائص الميكانيكية المباشرة: نسبة المواد الناعمة (% d<0.4 mm) الأصغر من 0.4 ملم التي تدخل في تجربة حدود أتربرغ Atterberg ونسبة المواد الناعمة (%d<0.08 mm) الأصغر من 0.08 ملم المعتبرة كحد أعظم للمواد الناعمة حسب

AFNOR، و البنية الفلذية والمقاومة الذاتية للمادة، وحالة التردي البنيوي لمادة الحبيبات،

– الخصائص الميكانيكية غير المباشرة: درجة الرطوبة، كثافة المادة Dr ودلائل الفراغ العيارية e_{min} و e_{max}،

– حسب شروط التحميل: شدة الإجهادات المطبقة وطريقة التحميل،

ولما كان عدد هذه العوامل المحتملة التأثير مباشرة أو بشكل غير مباشر كبيرة جداً ومن الصعب الكشف عن تأثيرها المتبادل وتحديد الأولوية في أدوارها وجدنا أن أفضل طرائق التحليل المناسبة هي طريقة التحليل الإحصائي المسماة بطريقة المركبات الأساسية (Analyse en Composantes Principales ACP) وهي طريقة مشتقة عن طريقة التحليل العاملي(Analyse Factorielles des des Correspondances AFC) حيث تستخدم طريقة التحليل العاملي في حال تحليل قيم عدية صحيحة(Table de Contingence) أما طريقة التحليل وفق المركبات الرئيسية فتستخدم من أجل تحليل قيم حقيقية لقياسات كمية ذات وحدات قياس متباينة.

التحليل بطريقة المركبات الرئيسية ACP

نسمي عينة إحصائية مجموع عناصر منتقاة بشكل عشوائي حيث يعرف عنصر العينة (Individu) بعدد N من الخصائص أو المتحولات (Variable) المستقلة عن بعضها بعضاً، والتي تقسم إلى متحولات معرَفَة أو ظواهر مرتبطة بها (وبحاجة إلى تعريف). نمثل مجموع العناصر والمتحولات في فضاء أبعاده N حيث يمثل كل متحول مستقل بعداً من أبعاد هذا الفضاء. نسمي النقاط الممثلة للعينة بعناصرها ومتحولاتها في هذا الفضاء بسحابة الانتشار (Nuage des points). وتبقى استقلالية المتحولات ممثلة بالعلاقات الآتية:

$$COV(Vn, V_{n+1})=0 \qquad [2]$$

نستفيد من طريقة المركبات الرئيسية للكشف أولاً عن المتحولات التي تفسر بدرجة مقبولة هوية هذه العينة وثانياً عن القاسم المشترك في خصائص عناصر العينة الإحصائية وعن علاقات الترابط المنطقية بين أي ظاهرة تمتاز بها هذه العينة والمتحولات المناسبة المفسرة لها.

تبقى دقة التعرف على الظاهرة مرتبطة بالقدرة التفسيرية لهذه المتحولات لذلك نهتم في عملية التحليل بالكشف عن علاقات الترابط الكاذبة والعلاقات التبادلية للمتحولات ببعضها بعضاً لتحديد المتحولات الجذرية المناسبة لتعريف الظاهرة رياضياً واصطفائها بشكل صحيح، ومن ثَمَّ التقليل من التباين بين قيم التنبؤ الحسابية والقياس الحقيقي للظاهرة أي بجعل قيمة الأمل الرياضي للراسب ε مساوية الصفر:

$$E(\varepsilon_{ij})\rightarrow 0 \qquad [3]$$

نقوم في عملية التحليل بمجموعة من العمليات الرياضية وأهمها:

– تحويل القيم الكمية الصحيحة غير متجانسة الوحدة (Valeur Hétérogène Continue) إلى قيم الانحراف المعياري المنسوبة لمتوسطها الحسابي ومن ثَمَّ جعلها متجانسة الطبيعة أو قيماً بلا وحدة. بهذه الخطوة تصبح قيم مجموع الأفراد مساوياً للصفر ومجموع المربعات لجميع الأفراد مساوية N، مما يسمح بالعودة إلى طريقة التحليل العاملي مع امتياز بتساوي كتلة جميع العناصر ومن ثَمَّ جعل مركز ثقلها في مركز ثقل الفضاء متعدد الأبعاد والذي يمثل أيضاً متوسط قيم الخصائص.

– نحول غيمة النقاط من المحاور الإحداثية بعددها N إلى محاور عطالة المتحولات (Axe d'Inertie) وتسمى بمحاور العوامل F (Axes Factorielles) بحيث يكون المحور F_1 المحور الذي يحمل أكبر كمية من المعلومات التفسيرية وقد تسيطر عليه أحد المتحولات، وهكذا بتسلسل الأهمية F_n و F_{n+1}.... وبذلك فإن طاقة تفسيرية جيدة للمحاور F_1 , F_2 , F_3 يسمح بالاستدلال على نحو 85–90% من المعلومات اللازمة لتعريف أي ظاهرة.

– على خلاف طريقة التحليل العاملي AFC حيث أبعاد المحاور لانهائية، فإن نصف قطر فضاء العطالة في طريقة المركبات الأساسية محدوداً بالقيمة 1 ونقاط العناصر والمتحولات تجول في فضاء متعدد الأبعاد نصف قطره 1.

إن تفسير أي ظاهرة موضوع الدراسة يتم وفق العلاقة الآتية:

$$V_{ij} = \sum a_{pj} F_{pi} \qquad [4]$$

مع $j\ (j=1,2,3,\ldots)$ و $i(i=1,2,3,\ldots)$

F_{pi} تمثل العوامل التفسيرية المستقلة

a_{pj} يمثل عامل إشباع المتحول V_{ji} في العامل F_{pi} ويساوي1 بحالته القصوى.

تفسر العلاقة في فضاء المعطيات وفق ما يأتي:

– يمثل أي عنصر أو متحول بشعاع مار من مركز ثقل الفضاء والنقطة المعنية في فضاء المتحولات والظواهر،

– إذا تقاربت نقطتا متحولين كان المتحولان مترابطين خطياً،

– يمكن أن يمتاز كل محور عطالة Fx بخضوعه لسيطرة أحد المتحولات على المتحولات الأخرى ومن ثَمَّ سيطرة القدرة التفسيرية لهذا المتحول على غيره من خصائص عناصر العينة.

– القيمة السلمية لمسقط شعاع أي نقطة متحول على محور عطالة Fx يعبر عن شدة الترابط الخطي (درجة الإشباع) بين هذا المتحول ومحور العطالة، كما يعبر عن شدة سيطرة هذا المتحول على المعلومات التي يعبر عنها هذا المحور.

– تعبر القيمة السلمية لشعاع عنصر عن بعد هذا العنصر أو قربه من قيمة المتوسط لصفات العينة الممثلة بمركز الفضاء.

دراستنا الإحصائية

كان الهدف من التحليل هو إيجاد علاقات ترابط بين ظاهرة انكسار الحبيبات والخصائص الفيزيائية والميكانيكية لحبيبات التربة يسمح بالتنبؤ بمعدل التطورات

الفيزيائية التي يخضع لها هذا الوسط نتيجة خضوعه لأحمال القص انطلاقاً من متحولات يسهل قياسها مخبرياً بكلف منخفضة نسبياً وبتجارب ميكانيكية بسيطة.

عينة المواد: مادة الدراسة

عملنا على 14 مادة غلب على تركيبها الفلذي مادة ثاني أوكسيد السيليس SiO2. خضعت هذه المواد لتجارب قص ثلاثي المحاور بلغ مجموع حالات التحميل 53 حالة وقبلنا بمقارنة كل بنية حبية بعد التجربة بالبنية البدائية قبل التجربة مما يسمح باعتبار كل منحنى حبي بعد تجربة القص عنصراً من عناصر العينة الإحصائية المدروسة. وتوفر لنا من المعطيات الضرورية للدراسة: منحنى التحليل الحبي قبل التجربة وبعدها والقيم البدائية للعوامل: e_{min} و e_{max} ، شكل الحبيبات قبل التجربة، دليل الفراغ البدائي e_o لعينة التربة.

وارتأينا أن ننطلق في عملية النمذجة للتنبؤ بقيم خصائص المادة بعد عملية التحميل من خصائصها البدائية، حيث يفترض أن تؤدي دوراً مميزاً لعلاقات النمذجة إضافة إلى سهولة قياسها مخبرياً.

خطوات التحليل

عملنا أولاً على أن نصف تطور البنية الحبية من خلال معيار كمي Vdx وحددنا هذا المعيار بالفارق في النسبة الوزنية المعدلة للحبيبات المارة من مهز ما قبل التحميل وبعده:

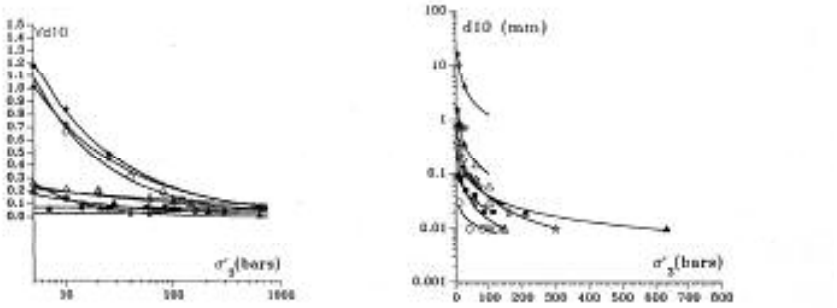
$$Vdx = \frac{\%d_{ini} - \%d_{fin}}{\sigma_3} \qquad [5]$$

$\%d_{ini}$ و $\%d_{fin}$: النسبة المئوية الوزنية للحبيبات المارة من مهزّ قطر فتحاته d قبل التجربة وبعدها، ويوضح لنا الشكل (2 و 3 و 4) منحنيات تطور أقطار الحبيبات المقابلة للنسب d60, d30, d10 كما ويوضح لنا العلاقة بين معيار الانكسار Vdx والإجهاد الفراغي البدائي المطبق σ_3 .

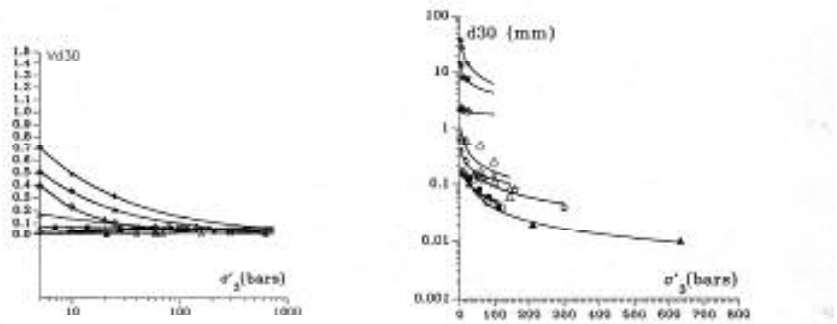
تم في المرحلة الأولى تحديد المتحولات التي تسهم بشكل ملحوظ في تفسير هذه الظاهرة كما تم تحديد المتحولات المترابطة حسابياً فيما بينها والتي تسبب حشواً في المعلومات كالوزن الحجمي γ_d ودليل الفراغ e_o. من ثم تم اصطفاء المتحول منها الأكثر تفسيراً .

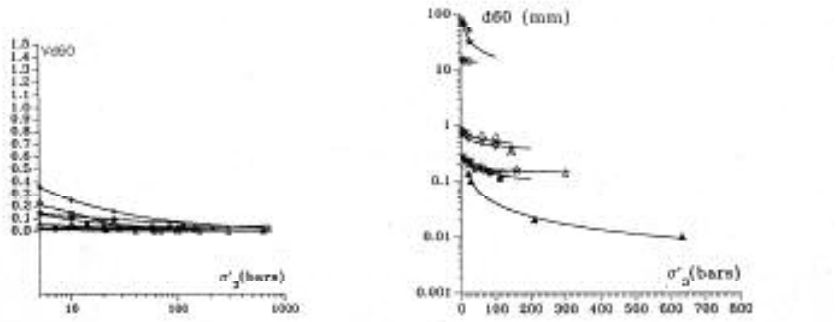
في المرحلة الثانية تم تبني مجمل المتحولات التي تسهم بشكل فعال وواضح في الوصف الفيزيائي والميكانيكي للمواد موضوع التحليل، وأخضعت هذه المتحولات إلى التحليل بطريقة المركبات الرئيسية وكما هو واضع من الشكل 5:

- إن المحور F1 هو محور التدرج الحبي(النسبة المئوية d<0.4mm، d10، d30، d60، d90) ودليل الارتصاص Ie ودليل الفراغ الأعظمي e_{max} ، ونلاحظ شدة ترابطه مع معيار تطور البنية الحبية للمواد الحبيبية (Vd10, Vd30, Vd60) وهو يحمل نحو 51 % من المعلومات التي تفسّر شدة انكسار الحبيبات.
- إن المحور F2 هو محور الخصائص الميكانيكية غير المباشرة e_{max} ، e_{min} ، Cu وهو يملك نحو 20% من المعلومات القادرة على تفسير هذه الظاهرة.
- إن المحور F3 هو محور النسبة المئوية للمواد الناعمة d<0.08 mm (وفق AFNOR) وهو يحمل 15 % من القدرة التفسيرية.

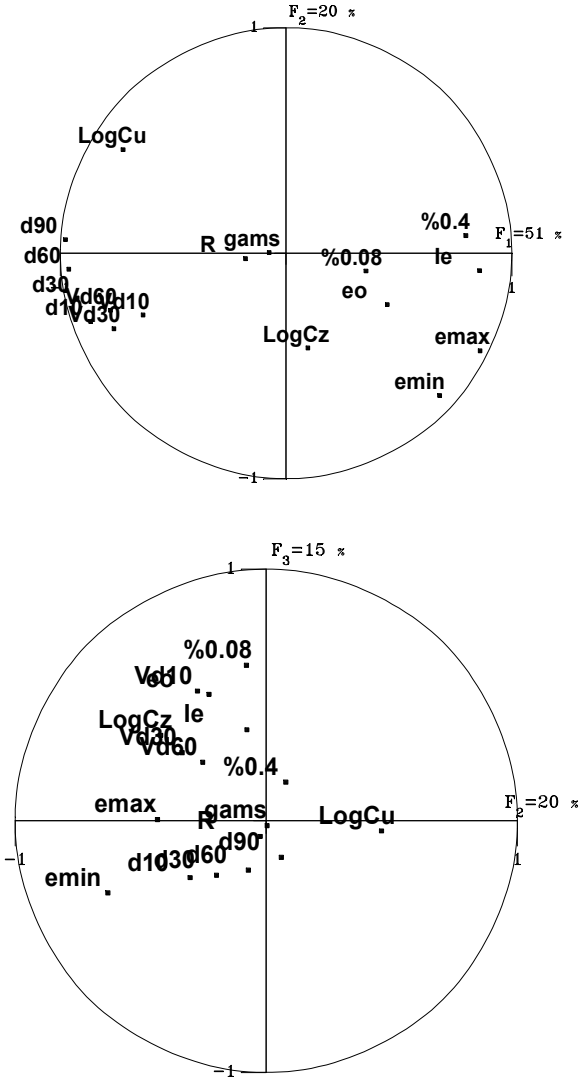


شكل 2 تطور قياس الحبيبات العارة من المهز والتي تشكل 10%، 30%، 60% نسبة وزنية





شكل 3 معدل تطور البنية الحبية للنسب الوزنية 10%، 30%، 60%



شكل 5 التحليل بطريقة المركبات الأساسية ACP

نلاحظ أن شكل الحبيبات R والوزن النوعي γ_S (gam s) لمادة الحبيبات لا تسهم فعلاً في تفسير الظاهرة وإذا كان دور الوزن الحجمي متوقعاً لتقارب قيمه فإن شكل الحبيبات لم يقدم أي إسهام وذلك لأن دوره ينتفي بعد مرحلة التحميل الأولى ودخول التجربة مرحلة الاجهادات العالية التي امتازت بها هذه التجارب.

– إن مجموع إسهامات المحاور الثلاثة وصل إلى نحو 86% من مجمل إسهامات المتحولات الداخلة في التحليل.

واستناداً إلى تحليل مجمل الدراسات المنجزة في هذا المجال تم تحديد المتحولات الرئيسة المؤثرة في تفسير هذه الظاهرة والمتفقة مع الملاحظات الجريبية.

تلا خطوة انتقاء المتحولات هذه إخضاعها للتحليل بالتراجع متعدد المتحولات بطريقة الخطوة خطوة Step-Wise حيث بعملية التكرار تستبعد المتحولات المتشابهة الفعل أو ضعيفة التأثير والإبقاء على المتحول الأكثر ترابطاً مع معيار شدة انكسار الحبيبات V_{dx} المعرف بالعلاقة (5) والتي تمخض عنها علاقة من الشكل:

$$Vdx = \frac{\%\,d_{ini} - \%\,d_{fin}}{\sigma_3} = \sum Coef \cdot (Vi) + Const \qquad [6].$$

تم تبسيط هذه العلاقة لتسهيل العمليات الحسابية الهندسية لتأخذ الشكل:

$$d_{fin} = d_{ini} + 0.01 \cdot \sigma_3 \cdot \sum Coef \cdot (Vi) + Const \qquad [7]$$

حيث σ_3 الإجهاد الفراغي البدائي المطبق في بداية التجربة أو الإجهاد الفراغي المكافئ للضغط الموافق لعمق العينة والمقدر ب [bars].

Coef معامل التراجع (Coéfficient de régression)،

Vi المتحولات التفسيرية وحددت هذه المتحولات الأكثر تفسيراً لهذه الظاهرة بما يأتي:

- D60 قطر الحبيبات المكافئ لنسبة 60% وزناً، وتقدر بالميليمتر

- Cu=d60/d10 معدل التدرج الحبي وفيه يظهر دور d10 قطر الحبيبات المقابل لنسبة 10% وزناً

- e_{max} دليل الفراغ الأعظم

- Ie معامل الارتصاص حيث $Ie=e_{max}-e_{min}$ وفيه يظهر دور e_{min}

ـ 0.4% النسبة الوزنية للمواد الغضارية الرملية الناعمة حيث d<0.4.

- e_o معيار الفراغ في بداية التحميل.

وتظهر في الجدول (1) معاملات الترابط الخطي من أجل حالات التحميل متوسطة ومرتفعة الإجهاد.

جدول 1

شروط التحميل	المتحول بعد الانكسار Final	المتحولات التفسيرية						
		Log d60	Log Cu	emax	Ie	eo	%0.08	Const
إجهادات متوسطة σ_3=1-5 Mpa	d10	+40	-56	-125	+227	+45	+2	-10
	d30	+16.8	-13	-23	+43	+13	+0.8	-7
	d60	+8.6	-6.4	-13	+24	+9.7	+0.37	-5
	%d<0.08	-8.4	+8.7	+62	-100	-39	0	+13.5
إجهادات مرتفعة σ_3=5-50 MPa	d10	+59	-10	0	0	21	+1.0	-10.5
	d30	+12	-5	0	0	+6	+0.6	-4.5
	d60	+10	-0.5	0	0	+3.5	+0.1	-2.5
	%d<0.08	-13.7	+17.3	+74	-115	-27	0	+6

وللدلالة على جودة التحليل وقدرة العلاقات المقترحة على التنبؤ بمقدار تردي الحبيبات نلجأ لحساب ما يسمى بمعامل الترابط متعدد المتحولات (Coéfficient de correlation) والتي تحدد قيمتها من العلاقة:

$$\rho = \left[1 - \left(\frac{SCR}{\Sigma \left(y - \bar{y} \right)^2} \right)^{1/2} \right] \quad [8].$$

حيث y التابع متعدد المتحولات وهو في دراستنا V_{dx}

$$SCR = \Sigma \left(\varepsilon_i \right)^2 \qquad [9].$$

ومن أجل معادلات استنباط قوية تتراوح قيم معامل الترابط بين (0.95-0.98)، ومقارنة مع القيم التي حصلنا عليها بالتحليل لمعامل الترابط متعدد المتحولات حيث تراوحت قيم ρ بين 0.82 و 0.92 ، فإننا نعدُّ هذه القيم جيدة نسبياً وذلك لعدد المواد المعتدل نسبياً وللتباين الكبير في مواصفات هذه المواد التي خضعت للتحليل.

الخلاصة

كان الغرض من هذه الدراسة وضع نماذج رياضية بسيطة للتنبؤ بدرجة تردي بنية الوسط الحبي تحت تأثير الإجهادات المرتفعة، وقد بينت لنا طريقة التحليل بالمركبات الأساسية المستخدمة في الدراسات الإحصائية إمكانية الوصول إلى مثل هذه النماذج الرياضية البسيطة الكفيلة وبدرجة مقبولة من الدقة بالتنبؤ بشكل تطور الخصائص الفيزيائية لحبيبات التربة نتيجة لتطبيق الأحمال الخارجية.

وإذا ما قبلنا بمبدأ الترابط المنطقي بين الخصائص الميكانيكية والخصائص الفيزيائية لوسط التربة فإن هذه النماذج تسمح برسم سلوك التربة بشكل أقرب لسلوكها الحقيقي تحت تأثير الإجهادات المرتفعة مما يقلل وبدرجة كبيرة من مخاطر تعرض المنشآت وخاصة الحيوية منها لاحتمالات التصدع أو الانهيار.

المراجع

1) Biarez, J., Hicher, P.Y. 1994. Elementary mechanics of soil behaviour, saturated soils. Edited by Balkema, A.A., Rotterdam, Netherlands.
2) Billam J., 1971. Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures. Proceeding of the Roscoe memorial symposium, Cambridge, March 1971, pp.69-80.
3) Bishop, A.W. 1965. Discussion the subject of the shear-strength behaviour of soils under high confinig pressures, with special reference to the influence of particule degradation. Proceedings of the 6th I.C.S.M.F.E., Montréal, 1965, Vol. 3, pp. 306-310.
4) Bolt A.F. 1995. Particule breakage in sand under repeated loding. International workshop. Homogenization, Theory of migration and granular bodies. Gdansk-Kormaran 14-17 May 1995. pp 41-52.
5) Datta M., Gulhati S.K., Rao G.V. 1979. Crushing of calcareous sand during shear. Proceedings of the 11th annual offshore technology conference. Houston, 1979, OTC Paper N 3525, pp. 1459-1467.
6) Feda, J. 1971. The effect of grain crushing on the peak angle of internal friction of a sand.Proc. 4^{th}. Conf. On soil machanics, Budapest, pp. 79-93.
7) Fukumoto T. 1992. Particule breakage characteristics of granular soils. Japanes Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundation, Vol. 32, N. 1 26-40, Mar. 1992.
8) Hall E.B., Gordon B.B. 1963. Triaxial testing with large-scale high pressure equipement. ASTM Special publication on laboratory shear testing of soils. STP 361, 1963, pp 315-328.

9) Hardin, B.O. 1985. Crushing of soil particles. ASCE Jornal of Geotechnical Engineering 111(10) : 1177-1192.
10) Hicher, P.Y., Kim, M.S., Rahma A. 1995. Experimental evidence and modeling of grain breakage influence on mechanucal behaviour of granular media. International workshop. Homogenization, Theory of migration and granular bodies. Gdansk-Kormaran 14-17 May 1995. pp 125-133.
11) Lee, K.H, et Seed, H.B. 1967. Drained strength characteristics of sand. Proccedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 93(SM6), pp. 117-141.
12) Lee K. L. and Farhoomand I., 1967, "Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression", Canadian Geotechnican Journal, Vol. 4, N°1, 1967, pp. 68-100.
13) Le Long. 1968. Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols sous fortes pressions Thèse D.D.I. Grenoble.
14) Lo, K. L., et Roy, M. 1973. Response of particulate materials at high pressures. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 13(10) : 61-76.
15) Marsal, R.J. 1967. Large scale testing of rockfill materials. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 93(SM2), pp27-43.
16) Marsal, R.J. 1973. Mechanical properties of rockfill. Embankment Dam Engineering, Casagrande Volum, John Wiley and Sons, New York, pp 109

17) Marsal, R.J. 1977. Research on granular materials (Rockfill and soil-gravel mixtures. Experimental work compiled for the IX International Conference of Soil mechanics and foundation Engineering, Tokio, E-25, Universidad National Autonoma deMexico, pp 78, June 1977.
18) Miura, S., Ohara, S. 1979. Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 19(3) : 1-14
19) Miura N., Yamanouchi T. 1975. Effect of water on the behaviour of a quartz-rich sand under high stresses. Soils and Foundation, Journal of the J.S.S.M.F.E., Vol 15, N 4, Dec. 1975, pp 23-34.
20) Miura N. 1985 Point resistance of piles in sand. Proceeding of 11th international conference on soil mechanics and foundation endineering. San Francisco, 12-16 AUG. 1985, Vol 3, pp 1445-1448.
21) Ramamurthy, T. 1969. Crushing phenomena in granular soils. Journal of the Indian National Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, **8(**1) : 67-86.
22) Ramamurty T., Kanitkar V.K., Prakash K. (1974). Behaviour of coarse-grained soils under high stresses. Indian Geotechnical Journal, Vol. 4, N 1, Jan. 1974, pp 36-63.
23) Roberts J.E. De Souza J.M., 1958, "The compressibility of sands", Proc. ASTM, 58, 1269-1277.
24) Vesic, A.S., et Clough, G.W. 1968. Behavior of granular materials under high stresses. ASCE J. of SMF Division, Vol. 94, SM3, : 661-688.

تاريخ ورود البحث إلى جامعة دمشق2004/1/15.