الاستجابة الزلزالية للأساسات السطحية: تقييم التسييل الموضعي والهبوط باستخدام الطاولة الاهتزازية

عناية علي *،علي العبدالله، تركي طبق*****

* طالبة دكتوراه قسم الهندسة الجيوتكنيكية ، كلية الهندسة المدنية ، جامعة حمص

** أستاذ ، قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حمص

*** باحث في مركز الدراسات والبحوث العلمية

ملخص البحث:

تمت دراسة سلوك الأساسات السطحية تحت تأثير التحميل الزلزالي بشكل واسع، وعلى الرغم من وفرة الدراسات التي تناولت السلوك الزلزالي للأساسات السطحية، وقد ركزت معظم الدراسات السابقة على الأساسات السطحية دون النظر إلى التفاعل المعقد بين عمق التأسيس واضطراب التربة المحيطة، وهو ما قد يؤدي إلى تسييل موضعي وهبوط أكبر مما هو متوقع .إلا أن استجابة هذه الأساسات وتأثير عمق التأسيس على الاستجابة الديناميكية لا تزال غير مفهومة بشكل كافٍ، خاصة فيما يتعلق باضطراب التربة الناتج عن الحفر ووضع الأساس. تهدف هذه الدراسة إلى استقصاء تأثير عمق التأسيس على بدء التسييل والهبوط الناتج، باستخدام أساس مربع (0.1m×0.1m) موضوع على ثلاثة أعماق مختلفة: على سطح العينة، وعلى عمق 0.03m، وعلى عمق 0.05m تحت سطح التربة وتحت تأثير نفس الضغط المطبق من الأساس (1Kpa). تم تجهيز العينة الرملية المشبعة في صندوق التربة الصلب، كما تم تطبيق حركة جيبية (0.2g,2Hz) وباستخدام الحساسات اللازمة تم تسجيل ضغط ماء المسام الزائد، التسارع، والهبوط. أظهرت النتائج وجود عمق وسطي (حوالي 10% من سمك الطبقة القابلة للتسييل) كـ "عمق حرج" يزيد بشكل كبير من مخاطر التسييل الموضعي والهبوط الكبير، وبالتالي ضرورة مراعاة اضطراب التربة الناتج عن الحفر وإعادة توزيع الإجهادات عند تقييم قابلية التسييل للأساسات السطحية على أعماق مختلفة.

الكلمات المفتاحية: عمق التأسيس، التسييل الموضعي، هبوط الأساسات، الطاولة الاهتزازية، اضطراب التربة، التفاعل بين التربة والمنشأ.

Seismic Response of Shallow Foundations: Evaluating Localized Liquefaction and Settlement via Shaking Table Modeling

, Inaya Ali*,*Ali Alabdullah, Turki Tabakh*****

*Phd Dept of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering , University of Homs
** Prof. Dr. Eng. Department of Geotechnical Engineering, , Faculty of Civil Engineering , University of Homs
*** Dr. Eng. Researcher at the Scientific Studies and Research Center (SSRC)

Abstract

The behavior of shallow foundations under seismic loading has been extensively studied. Despite the abundance of studies addressing the seismic behavior of shallow foundations, most previous studies have focused on shallow foundations without considering the complex interaction between foundation depth and surrounding soil disturbance, which may lead to localized liquefaction and settlement greater than expected. However, the response of these foundations and the effect of foundation depth on the dynamic response are still not sufficiently understood, especially with regard to soil disturbance caused by excavation and foundation placement. This study aims to investigate the effect of embedment depth on liquefaction initiation and resultant settlement. A square footing (0.1m × 0.1m) was tested at three different depths: at the soil surface, at a depth of 0.03m, and at a depth of 0.05m, maintaining a constant applied pressure of 1 kPa. Saturated sandy specimens were prepared in a rigid soil box and subjected to sinusoidal motion (0.2g, 2Hz). Excess pore water pressure, acceleration, and settlement were recorded using specialized sensors. The results identified an intermediate depth (approximately 10% of the liquefiable layer thickness) as a "critical depth" that significantly increases the risk of localized liquefaction and substantial settlement. Therefore, it is necessary to consider soil disturbance resulting from excavation and stress redistribution when assessing the liquefaction of shallow foundations at different depths.

Keywords: Embedment depth, Localized liquefaction, Foundation settlement, Shaking table, Soil disturbance, Soil-Structure Interaction (SSI)

1-المقدمة:

تعتبر ظاهرة التسييل liquefaction الناتجة عن حدوث الزلازل واحدة من أخطر المشاكل الهندسية حيث يشكل تسييل التربة خطراً كبيراً على البنية التحتية السطحية وتحت الأرضية وعلى حياة الإنسان. إن فقدان قدرة تحمل التربة ومقاومة القص، والانتشار الجانبي للتربة، وحركة كتلة التربة الكبيرة وما يصاحبها من هبوطات وحدوث تشققات أرضية جميعها عوامل يمكن أن تعرض البنية التحتية لمختلف أنواع الإجهادات والتشوهات (Teixeira, 2024). قام العديد من الباحثين بدراسة ظاهرة تسييل التربة منذ ظهور تأثيراتها للمرة الأولى في زلزال Alaska 1964 وزلزال Niigata اليابان عام 1964 والذي تسبب بحدوث أضرار بالغة بالمنشآت الهندسية (Seed and Lee, 1966; Seed & Idriss, 1971; Yoshimi et al, 1984; Ishihara, 1996;).

فعندما تتعرض الترب الرملية المشبعة المخلخلة إلى أحمال زلزالية سريعة، فإن ماء المسام الغير قابل للانضغاط وبسبب عدم كفاية الوقت اللازم للتصريف يؤدي لحدوث انخفاض في حجم التربة وبالتالي يساهم ميل التربة للانكماش والانضغاط إلى تراكم ضغط زائد في ماء المسام، وحدوث التسييل في نهاية المطاف وبذلك تكون التربة الحبيبية المفككة أكثر عرضة للتسييل لأنها قابلة للانضغاط والانكماش بدرجة كبيرة تحت تأثير القص الدوري، وذلك بسبب نسبة الفراغات المرتفعة بين جزيئات التربة (Hīkina Whakatutuki.2016) . كما وجد بأن حدوث ظاهرة التسييل لا يتوقف فقط على الترب الحبيبية أو وصول قيمة ضغط ماء المسام إلى قيمة الإجهاد الفعال الليثوستاتيكي (الإجهاد الفعال الابتدائي الناتج عن الوزن الذاتي للتربة في الظروف الساكنة قبل تطبيق الحمل الزلزالي وهو يستخدم كقيمة مرجعية لحساب ضغط ماء المسام في دراسات التسييل)، وإنما يرتبط أيضاً بتسارع الحبيبات الأفقي، وطفو السوائل، وارتفاع ضغط ماء المسام فقد يحدث انخفاض حجم التربة حتى عند قيم منخفضة نسبيًا لذروة التسارع الأرضي (PGA)، وذلك فقط بسبب تأثير الطفو. ومع ذلك، وجد بأن الانخفاض يتعزز بشكل كبير بفعل ضغط المسام الناتج ديناميكيًا ويحدث هذا حتى عندما تبقى قيمة ضغط المسام أقل من قيمة الإجهاد الفعال، أي حتى عندما لا يتحقق معيار التسييل الكلاسيكي على نطاق المختبر، والذي ينص على أن ضغط المسام يساوي الإجهاد الفعال الليثوستاتيكي وبالتالي

يمكن أن يحدث التسييل نتيجة لقوة رفع عالية بما يكفي، تتغلب على مقاومة التربة (Ben- Zeev, et al, 2017). وفي دراسة أجريت من قبل (Singh et al, 2019) وجدوا بأن مقاومة التسييل تزداد مع انخفاض درجة الإشباع الأولية، ومع زيادة الكثافة النسبية وضغط الحصر الفعال الأولي وعندما تقترب درجة الإشباع من 100%، يكون تأثيرها على مقاومة التسييل أكثر أهمية. بالإضافة لما سبق فإن مقاومة الترب الرملية للتسييل الدوري تتأثر بعدة عوامل أخرى مثل عدد الدورات، ونسبة المواد الناعمة، وتاريخ الإجهادات، وعمر الترسبات، وغيرها حيث تُظهر نتائج الدراسات المخبرية التي أجراها (Lentini et al, 2019) بأن مقاومة الرمال المختبرة للتسييل الدوري تزداد مع انخفاض إجهادات الحصر الأولية، وتقل مع ازدياد نسبة السيلت كما أكدت النتائج أن المواد الأكثر خشونة أقل عرضة للتسييل. هذا وتعتبر سعة التسارع أهم مُعامل يتحكم في التسييل أثناء التحميل الدوري، فكلما زاد التسارع، قلّ عدد الدورات اللازمة للتسييل، وزاد ضغط ماء المسام المتولد، كما يتحقق تسييل محدود للرمال الأكثر كثافة عند أحمال دورية أقل، حيث يرتفع ضغط المسام إلى حد معين، لكن نسبة ضغط المسام لا تصل أبدًا إلى الواحد، ولا ينخفض الإجهاد الفعال إلى الصفر (Varghese & Gali, 2014). ونظراً لخطورة ظاهرة التسييل على المنشآت الهندسية وما يرافقها من حدوث هبوطات وميلان ودوران في أساسات المباني فقد حظي موضوع التفاعل الديناميكي بين الأساسات والترب القابلة للتسييل على اهتمام الباحثين في السنوات العشر الماضية سواء باستخدام النمذجة العددية أو من خلال التجارب المخبرية لتفسير تلك الآليات والعوامل المختلفة المسببة لحدوثها وتقييم استجابة الأساسات للتسييل أثناء الزلازل (Setyadi et al, 2024; Cerado & Estores, 2025; Amin & Singh, 2024). بينت دراسة (Zhang et al., 2015) أن الأساسات المدفونة على أعماق ضحلة تعدل من توزيع ضغوط المسام والإجهادات الفعالة في التربة المحيطة، وتسبب تركيزاً محلياً للإجهادات تحت زوايا الأساس، مع ميل إلى تقليل عمق التسييل حول المنشأ من جهة أخرى. بينما أشارت دراسة (Olarte et al. 2018) إلى أن التحكم في مسارات التصريف يمكن أن يكون له تأثيرات متضاربة، حيث أن إعاقة التدفق الخارجي للماء قد تزيد من ضغوط المسام الزائدة تحت أطراف الأساس، بينما يؤدي تعزيز التصريف إلى تقليل الهبوط والدوران. كما أظهرت دراسة قام بها الباحثان (Gourvenec & Randolph 2009) أهمية اختيار عمق تأسيس الأساسات السطحية لأنه يؤدي إلى إطالة مسارات التصريف، مما يقلل من معدل تبدد ضغط ماء المسام الزائد، كما يؤثر نوع التأسيس وخشونة السطح الفاصل بشكل ملحوظ على الاستجابة الديناميكية.

هناك أبحاث عديدة باستخدام الطاولة الاهتزازية للوصول إلى فهم أكثر لطبيعة التفاعل الديناميكي SSI (Soil Structure Interaction)، حيث تُستخدم الطاولة الاهتزازية في تجارب النمذجة الفيزيائية في الهندسة الجيوتكنيكية الزلزالية، وهي مهمة من أجل التطبيقات العملية لفهم سلوكيات التربة، وهي اختبارات واقعية وواضحة عند مناقشة استجابة المشاكل الجيوتكنيكية أثناء الزلزال مثل التسييل، واستجابة الأساسات، هبوطات ما بعد الزلزال والتفاعل الديناميكي بين التربة والمنشآت، ومشاكل ضغط التربة الجانبي (Alaie & Chenari, 2018).

قدم الباحثان (Ziotopoulou & Gazetas, 2022) دراسة علمية أثبتت أن زيادة عمق التأسيس تحسن من استقرار الأساس ضد الانهيارات الجانبية، لكنها قد تزيد من تراكم ضغط الماء المسامي حول جوانب الأساس المدفون. كما وجد (Barrios et al. 2020) أن عملية التصريف أثناء الزلزال له تأثير كبير على استجابة الأساسات، خاصة عند مستويات ضغوط الحصر المنخفضة، وأن تسارع الأساسات يتأثر بعددها وموقعها. أما الباحثان (Nguyen & Ghalandarzadeh, 2023) فقدما نموذجاً رياضياً يربط بين عمق التأسيس ومعدل تولد ضغط الماء المسامي، وأثبتا بأن الأساسات الأكثر عمقاً تستفيد من إجهاد الحصر (Confinement) العالي الذي يؤخر لحظة التسييل. توجد دراسة علمية قام بها (Qiu & Elgamal, 2020) حول المحاكاة العددية للتفاعل الديناميكي بين التربة والأوتاد المقامة في الترب القابلة للتسييل تبين بأن التربة المحيطة بالجوانب تلعب دوراً هاماً في نقل الأحمال الديناميكية الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض مقاومتها للضغط الجانبي بمحيط الأساس عندما تسييل الترب السطحية. تم نشر ورقة بحثية في مجلة جامعة حمص اهتمت بدراسة الاستجابة الزلزالية للأبنية البيتونية العالية مع أخذ أثر التربة بعين الاعتبار من خلال استخدام برنامج النمذجة العددي (simulia'sAbaqus 6.14)،حيث تم أخذ أثر التربة اعتمادًا على الطريقة المباشرة (وسط التربة FEM حيث تم دراسة تأثير تغيير نوع التربة (تربة طرية و قاسية) على الاستجابة الزلزالية لبناء عالي مكون من 16طابقًا ،و اعتماد الجملة الثنائية لمقاومة الحمل الزلزالي، و استخدام العناصر Semi-infinite من مكتبة العناصر الصلبة لنمذجة وسط التربة وإدخال السجل الزلزالي El-Centro. وأظهرت نتائج التحليل وجود اختلافات بين أنواع التربة الطرية والقاسية خاصة فيما يتعلق بقيم الانتقالات والقص القاعدي والدور (المراد والحلواني،2021). ومن خلال ورقة بحثية أخرى وباستخدام برنامج النمذجة العددي ETABS تم اقتراح مجموعة من العلاقات تربط بين خصائص

المنشأ وبين معايير الاستجابة الزلزالية، بحيث تأخذ بعين الاعتبار تأثير مقدار وموقع عدم انتظام الصلابة على قيمة الدور الأساسي وقوة القص القاعدية التصميمية (فرج وآخرون، 2001). أيضاً بدراسة علمية أخرى تهتم بالسلوك الزلزالي للإطارات البيتونية والغير مصممة على القوى الزلزالية (الابراهيم و العامودي، 2021) حيث أظهرت النتائج فعالية التقوية في زيادة المقاومة الجانبية ، تخفيض الانتقالات الأفقية، وتخفيض دور الاهتزاز لنماذج الإطارات المدروسة حيث تزداد هذه الفعالية مع زيادة كل من السماكة ونسبة مقاومة البيتون ، بينما تتناقص الفعالية مع زيادة عدد الطوابق.

وبالتالي نلاحظ بأن الدراسات التجريبية ولاسيما التجارب الديناميكية لم تحظى بالاهتمام الكبير ولاسيما بإدخال أثر التفاعل الديناميكي بين المنشأ والتربة المعرضة للتسييل ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث المنشور لتغطية ظاهرة تسييل التربة الرملية المشبعة باستخدام الطاولة الاهتزازية.

2-هدف البحث:

يهتم هذا البحث بدراسة تأثير عمق الأساس وتوزيع الإجهادات وبصلة الإجهاد لحظة حدوث التسييل في التربة الرملية المشبعة على مسألة التفاعل الديناميكي ومناقشة النتائج.

3-مواد وطرق البحث:

تم إجراء سلسلة من الاختبارات باستخدام طاولة اهتزازية (0-1 g) تتحرك باتجاه أفقي وحيد، الشكل (1)، حيث تم تحضير العينة الرملية المشبعة ضمن صندوق التربة الصلب rigid soil box المصنوع من مادة plexi- glass المرنة وبأبعاد تتناسب مع أبعاد الطاولة الاهتزازية الأبعاد الداخلية: (0.38m) طول، (0.38m) عرض، (0.49 m) ارتفاع. وهي نفسها أبعاد العينة الرملية المشبعة من حيث الطول والعرض ولكن ارتفاع العينة (0.285m). تم تثبيت حساس الضغط في منتصف قاعدة العينة الرملية المشبعة لقياس تغيرات ضغط ماء المسام أثناء الحركة الزلزالية، وحجرة الحساسية الخاصة به ترتفع عن القاعدة (1cm) وبالتالي ارتفاع العينة الصافي فوق حساس الضغط (0.275m)، تم تحضير العينة بطريقة الترسيب الرطب يدوياً، وبعد 24 ساعة من التحضير تم عمل الحفرة في منتصف العينة على عمق التأسيس المطلوب للتجربة، ومن ثم وضع الأساس، كما تم

تثبيت حساس التسارع على الأساس وكذلك الأمر بالنسبة لحساس الانتقال بهدف رصد تسارع وهبوطات الأساس المربع الناتجة عند تطبيق الحركة الزلزالية، الشكل (2). تم اختيار أبعاد الأساس المستخدم في التجربة (B=0.1*0.1m) وكذلك الضغط المطبق من الأساس يساوي 1Kpa. حيث تعتبر هذه الأبعاد والضغط المطبق من الأساس نموذجية لكي نتجنب تداخل تأثير جدران صندوق التربة الصلب مع الأمواج القصية الناتجة عن الحركة وبالتالي تعبر النتائج عن سلوك التربة الرملية المشبعة الحر بشكل أدق، كما أن هذا الضغط يمثل سلوك المنشآت الخفيفة. وبالعودة لقوانين التشابه (Iai, 1989)تم اختيار λ معامل القياس بحيث يمثل ارتفاع العينة الرملية المشبعة في النموذج (Hm=0.285m) سماكة طبقة تربة رملية مشبعة حقيقية منطقية (ارتفاعها عادة بين 3 – 10 متر) حيث تم اعتباره 1/20 وهي قيمة سهلة الحساب (λ = 1/20 = 0.05). وبالتالي فإن ارتفاع التربة الحقيقي Hp = 5.7 m وعرض الأساس (B'= 2m) والضغط الناتج عنه هو (1Kpa). تمت دراسة تغيرات ضغط ماء المسام في حالة السطح الحر (بدون وجود أساس) وفي حالة وجود الأساس، حيث وضع الأساس مرة على سطح التربة، ومرة على عمق (0.03m)، ومرة على عمق (0.05m).
خضع صندوق التربة الصلب مع العينة الرملية المشبعة إلى حركة جيبية بتسارع 0.2g وتردد 2Hzباستخدام الطاولة الاهتزازية في جميع الاختبارات. في هذه الدراسة تم استخدام رمل نهري ذو تدرج حبيبي ضعيف، حيث يقع توزيع حجم الحبيبات ضمن نطاق التسييل (Xenaki et al, 2003)، يوضح الشكل (3) منحني التركيب الحبي للرمل المستخدم، بينما يعرض الجدول (1) الخصائص الفيزيائية له.



e d c b a

الشكل (1) يبين الطاولة الاهتزازية مع ملحقاتها حيث: a دارة التحكم الالكترونية بالطاولة الاهتزازية، b شاشة التحكم بالمدخلات الديناميكية للطاولة، c الطاولة الاهتزازية وعليها صندوق التربة الصلب، d مجموعة محصل البيانات موصولا بها حساس ضغط ماء المسام وحساس التسارع ومقياس الانتقال الشاقولي و وحساس الانتقال الأفقي الخاص بالطاولة، e شاشة برنلمج معالجة الإشارات القادمة من محصل البيانات.

تم تطبيق حركة اهتزازية جيبية بتردد 2Hz وتسارع 0.2 g لجميع الاختبارات، كما تم تقدير قيمة بصلة الإجهاد ،العمق المؤثر $Z_{10\%}$، (عمق بصلة الإجهاد حتى 10% من الضغط المطبق وهو 1 كيلو باسكال) وحسب نظرية Boussinesq (وهي الأكثر استخداما في حالة الترب الرملية) تم الاعتماد على القانون الأساسي لزيادة الإجهاد الشاقولي تحت منتصف أساس مربع الشكل وبتطبيق المعادلة $\Delta\sigma_z = I_\sigma \times q$ بحيث تصل زيادة الإجهاد إلى $I_\sigma = 10\% = 0.1$ وباستخدام جداول معاملات التأثير (Fadum, 1948) بالنسبة للأساس المربع، تبين أن العمق المؤثر يقع عند عمق يقارب ضعف عرض الأساس ($Z_{10\%} \approx 2B$)، وهذه النتيجة متوافقة مع الحلول المرنة المقدمة من(Poulos & Davis, 1974).



e d c b a

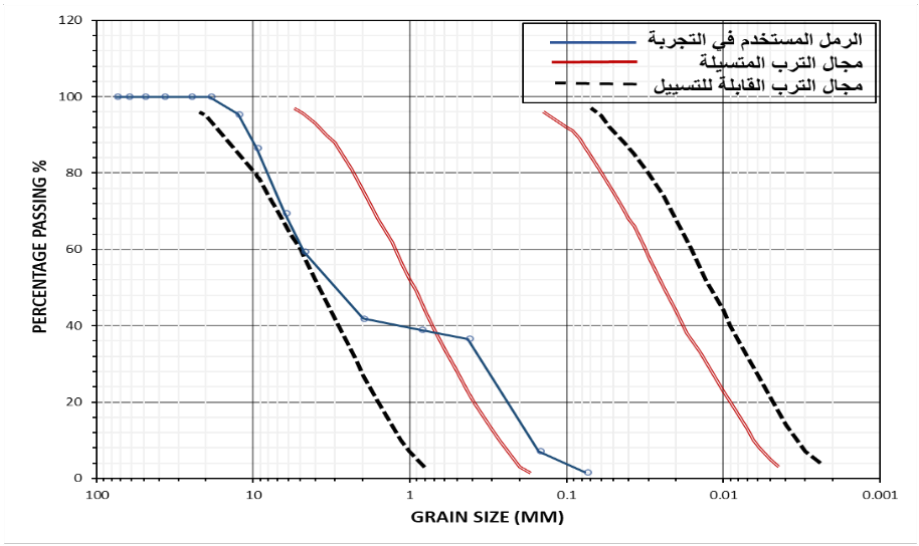
الشكل (2) يبين مراحل تحضير وحفر موضع الأساس في العينة الرملية المشبعة. a يبين موقع حساس ضغط ماء المسام في قاعدة العينة، b تحديد موقع الحفرة بعد مرور 24 ساعة من تحضير العينة، c بعد عملية الحفر على العمق المطلوب، d وضع الأساس في الحفرة مثبت عليه حساس التسارع ومقياس الانتقال، e نظام تربة – أساس أثناء الحركة الزلزالية،

الجدول (1) مواصفات الرمل المستخدم في تجارب الطاولة الاهتزازية

الوزن النوعي	$G = 2.66$
الكثافة النسبية	$D_r = 47\ \%$
وزن واحدة حجم الماء	$\gamma_w = 10\ Kn/m^3$
وزن واحدة حجم الإشباع	$\gamma_{sat} = 21.2\ Kn/m^3$
نسبة الفراغات الأعظمية	$e_{max} = 0.593$
نسبة الفراغات الأصغرية	$e_{min} = 0.357$
وزن واحدة الحجم الأعظمي	$\gamma_{d_{max}} = 19.6\ Kn/m^3$

وزن واحدة الحجم الأصغري	$\gamma_{d_{min}} = 16.7\ Kn/m^3$
عامل الانتظام	$C_U = 29.1$
عامل الانحناء	$C_C = 0.1$

حيث الهدف من هذا الإجراء هو إيجاد هذا العمق (يحسب من قاعدة الأساس المدفون في التربة) للحالات الثلاثة المدروسة والمرتبطة بتموضع وعمق الأساس وتأثيره على لحظة بدء التسييل من حيث تسارع وهبوط الأساس وضغط ماء المسام. تم تحليل وتفسير النتائج حسب (Kramer, 1996) المرجع الرئيسي في علوم الزلازل والحركات الأرضية والظواهر الجيوتكنيكية الزلزالية الخطيرة.

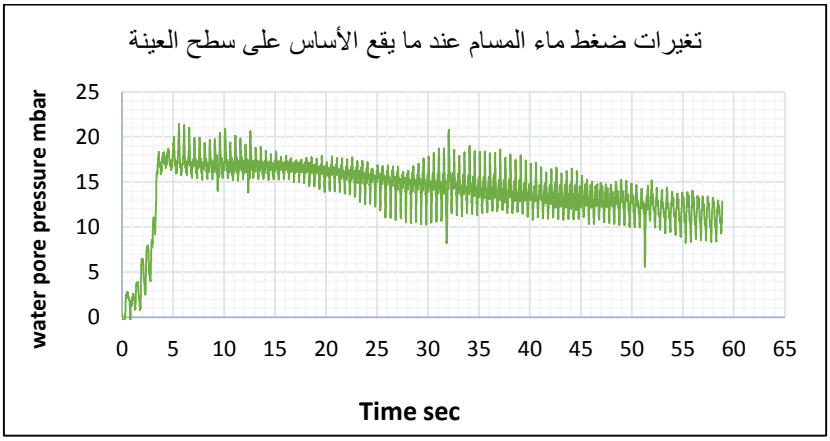


الشكل(3) التدرج الحبي للرمل المستخدم في الاختبارات

4-النتائج ومناقشتها:

بعد تطبيق الحركة الزلزالية المتولدة بواسطة الطاولة الاهتزازية تم التوصل إلى النتائج التالية حيث العمق المؤثر من قاعدة الأساس $Z_{10\%}=2B'=0.2$ m وذلك من أجل حساب الإجهادات الإضافية الناتجة عن تواجد الأساس على الأعماق الثلاثة. وبالتالي فإن قيمة الإجهادات الفعالة الكلية الأولية

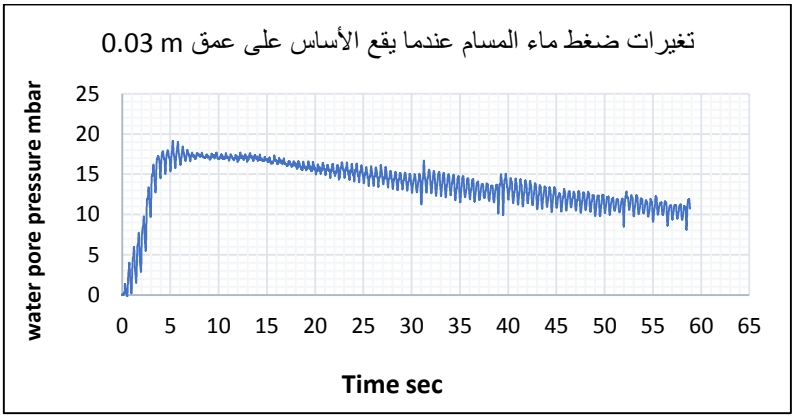
لنظام (تربة + أساس) حيث يوجد حساس ضغط ماء المسام على عمق Z= 0.275 m تساوي مجموع الإجهاد الفعال الأولي للتربة مضافاً إليها الإجهاد الإضافي الناتج عن وضع الأساس. عند حساس ضغط ماء المسام حيث الإجهاد الفعال الأولي الناتج عن الوزن الحجمي المغمور للتربة فقط يساوي σ'_{soil} = 3.08 Kpa ، وحسب عمق تموضع الأساس المربع الشكل في العينة الرملية المشبعة فإن قيم الإجهاد الإضافي الناتج عن وجود الأساس $\Delta\sigma_v$ والإجهادات الفعالة الكلية الأولية σ_v' نقرأها من الجدول (2). حيث نلاحظ بأن الزيادة في قيمة الإجهادات الإضافية الناتجة عن وضع الأساس على أعماق مختلفة والتي وصلت لحساس الضغط هي زيادة طفيفة نتيجة صغر حمل الأساس وانتشار الإجهادات في كل الاتجاهات مع زيادة عمق التأسيس، كما نلاحظ بأن العمق المؤثر عند العمق 5 سم يشمل معظم ارتفاع العينة الرملية المشبعة وبالتالي كبر حجم التربة المتأثرة ببصلة الإجهاد المنتشرة.



الشكل (4) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن والأساس على سطح العينة

الجدول (2) نسبة الزيادة في قيمة الإجهاد الفعال حسب عمق الأساس Z

D_f (m) عمق التأسيس	Z(m) ارتفاع الأساس عن حساس الضغط	$\Delta\sigma_v$ (kPa) (الإجهاد الإضافي نتيجة وجود الأساس) عند موقع حساس ضغط ماء المسام	$\sigma_v' = \sigma'_{soil} + \Delta\sigma_v$ (kPa) قيمة الإجهادات الفعالة الكلية لنظام (تربة + أساس)	نسبة الزيادة في قيمة الإجهاد الفعال
0	0.275	0.071	3.08+0.071=3.151	0.023%
0.03	0.245	0.084	3.08+0.084=3.164	0.027%
0.05	0.225	0.095	3.08+0.095=3.175	0.031%

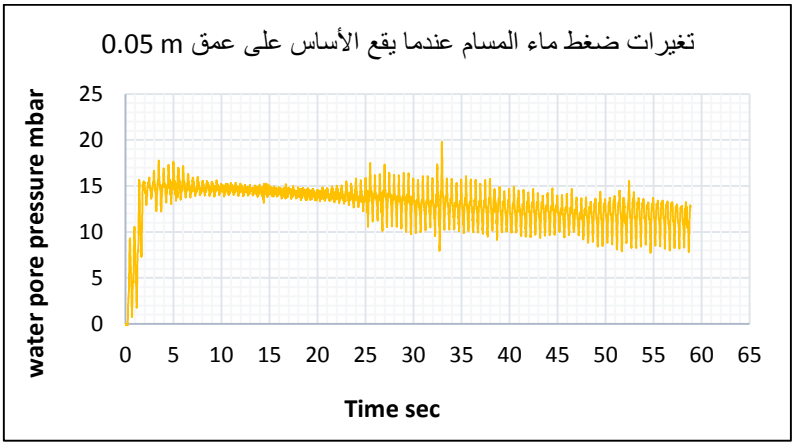


الشكل (5) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن والأساس يقع على عمق (0.03m)

ومن الأشكال (4،5،6،7،8،9،10،11،12،) تم أخذ قيم تغيرات ضغط ماء المسام (mbar) عند لحظة بدء التسييل وتحول المنحني ضغط ماء المسام، كما أنه وعند نفس الزمن تم أخذ قيمة هبوط الأساس (mm) وتسارع الأساس (g) عند الأعماق الثلاثة، والشكل (13) يوضح تغيرات ضغط ماء المسام في حالة السطح الحر، كما يوضح الشكل (14) مقارنة بين هبوطات الأساس تحت تأثير التغيرات في عمق التأسيس. جميع النتائج التجريبية نجدها في الجدول (3).

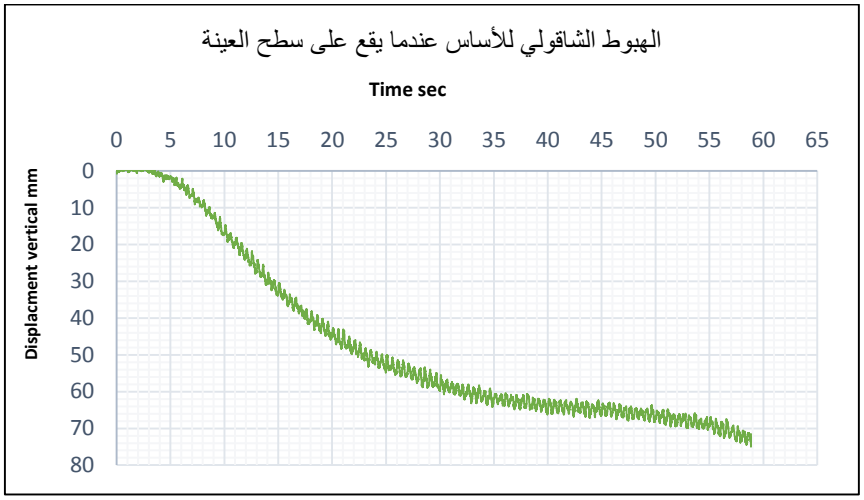
الجدول (3) يبين النتائج التجريبية الشاملة نتيجة اختبارات تأثير عمق الأساس على لحظة بدء التسييل

العمق	t_{liq} sec زمن بدء التسييل	P_{liq} mbar قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالميلي بار	ΔU_{liq} Kpa قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالكيلو باسكال	$r_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'_{initial}}$ نسبة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل	$N_{liq}=t\times 2$ عدد دورات التحميل حتى لحظة بدء التسييل	الهبوط (مم)	التسارع (g)
السطح الحر	2.205	31.2	3.12	1.013	4.41	----	----
0 سم	4.03	18.217	1.822	0.578	8.06	0.592	0.217
3 سم	4.28	17.432	1.743	0.551	8.56	5.442	0.038
5 سم	2.37	15.39	1.539	0.485	4.74	1.949	0.049

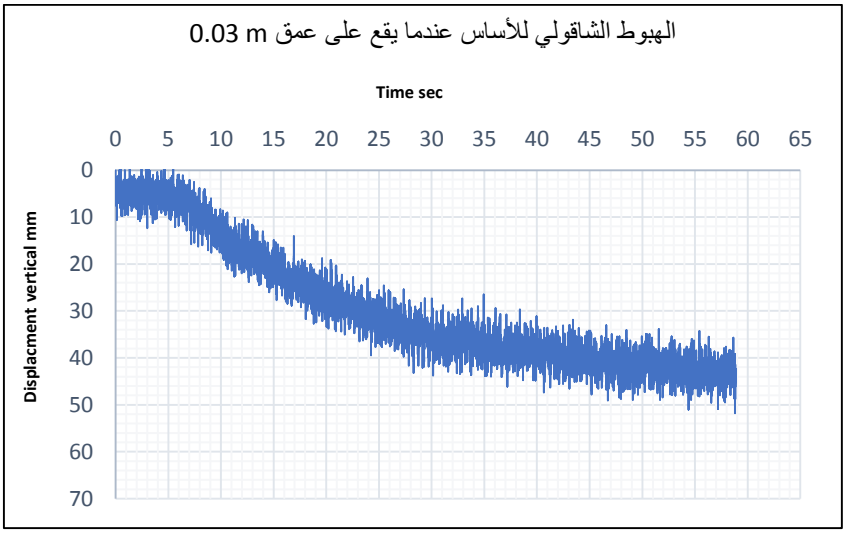


الشكل (6) يوضح تطور ضغط ماء المسام مع الزمن والأساس يقع على عمق (0.05m)

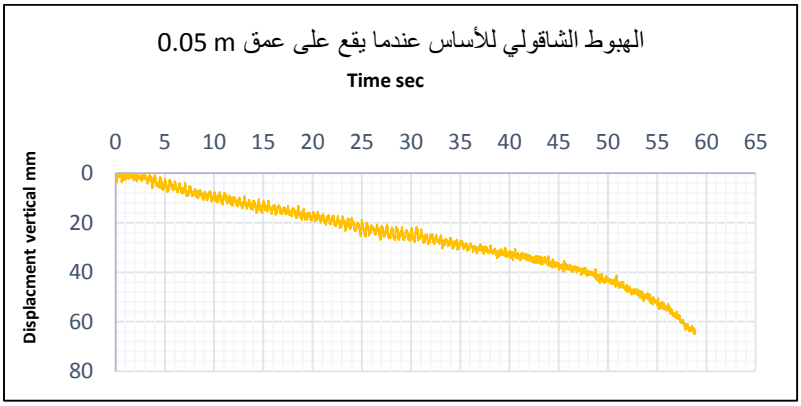
حيث تمثل سعة تذبذب ضغط ماء المسام الاستجابة الهيكلية لحبيبات التربة الرملية المشبعة، الصعود يمثل حالة الانكماش حيث تحاول الحبيبات الانضغاط، والهبوط يمثل حالة التمدد حيث تحاول الحبيبات الانزلاق والركوب فوق بعضها البعض وتعكس التغيرات اللحظية في ضغط ماء المسام خلال كل دورة. أما سعة تذبذب الهبوط فتمثل حالة الاضطراب الشاقولي اللحظي (الإزاحة الشاقولية للمنشأ) وهي لاتمثل اهتزازاً فقط وإنما غوص الأساس داخل التربة الرملية المشبعة التي تفقد قدرة تحملها تدريجياً والسعة الكبيرة تدل على أن الأساس لم يعد مستقراً على قاعدة صلبة بل يطفو فوق سائل كثيف. بمجرد حدوث التسييل، تبدأ التربة في الانكماش (إعادة ترتيب الحبيبات تحت تأثير الجاذبية) ويبدأ الهبوط في التزايد، ونلاحظ بأن منحني الإزاحة يتحول من شبه ثابت إلى منحني متزايد بشكل واضح مع قفزة في سعة التذبذب وميل عام للأسفل.



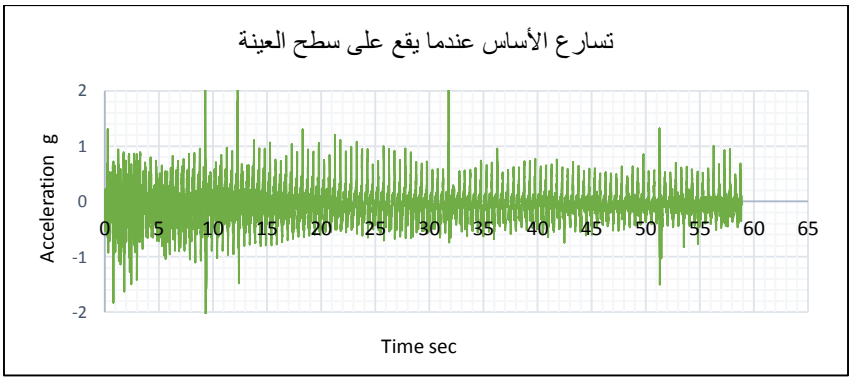
الشكل (7) يوضح الهبوط الشاقولي للأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على سطح العينة



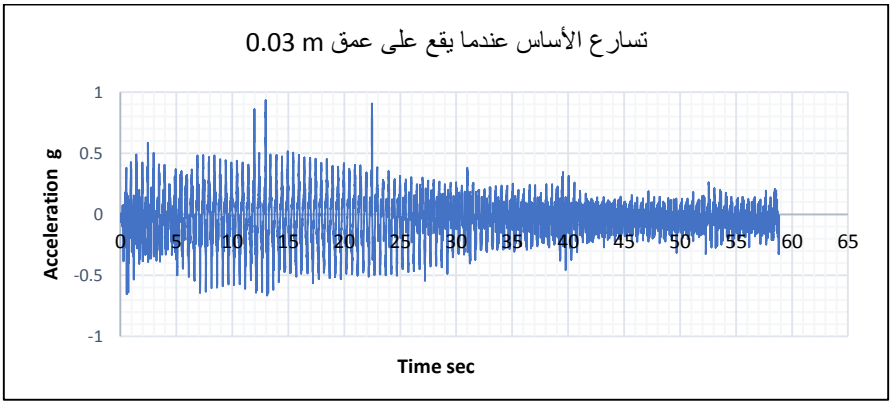
الشكل (8) يوضح الهبوط الشاقولي للأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.03m)



الشكل (9) يوضح الهبوط الشاقولي للأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.05m)

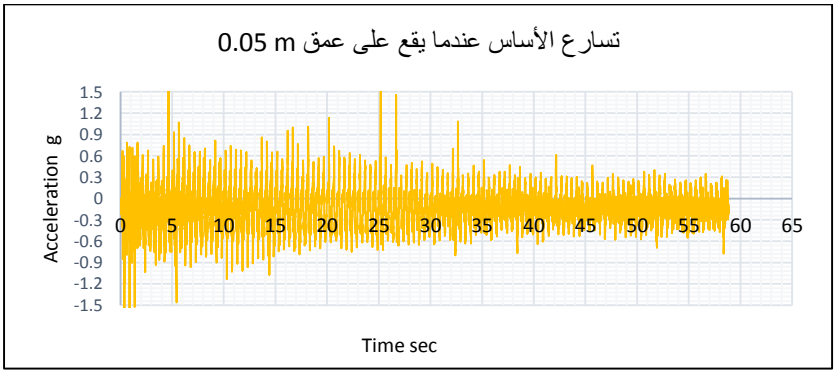


الشكل (10) يوضح تسارع الأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على سطح العينة.

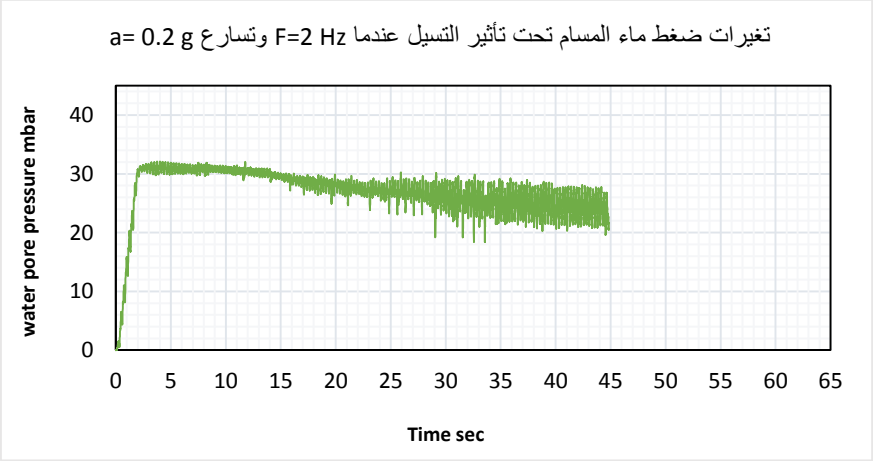


الشكل (11) يوضح تسارع الأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.03 m).

وأخيراً تمثل سعة تذبذب التسارع على الأساس كفاءة نقل الطاقة (Transmission efficiency) من التربة الرملية المشبعة إلى الأساس (التسارع الأفقي لكتلة المنشأ وهو بنفس اتجاه حركة الطاولة الاهتزازية) حيث قبل بدء التسييل تكون السعة عالية ومطابقة أو أكبر من تسارع الطاولة الاهتزازية المطبق، مما يعني أن التربة في طور الحالة الصلبة وتنقل الموجات القصية وإجهادات القص والصدمات إلى المنشأ بكفاءة.

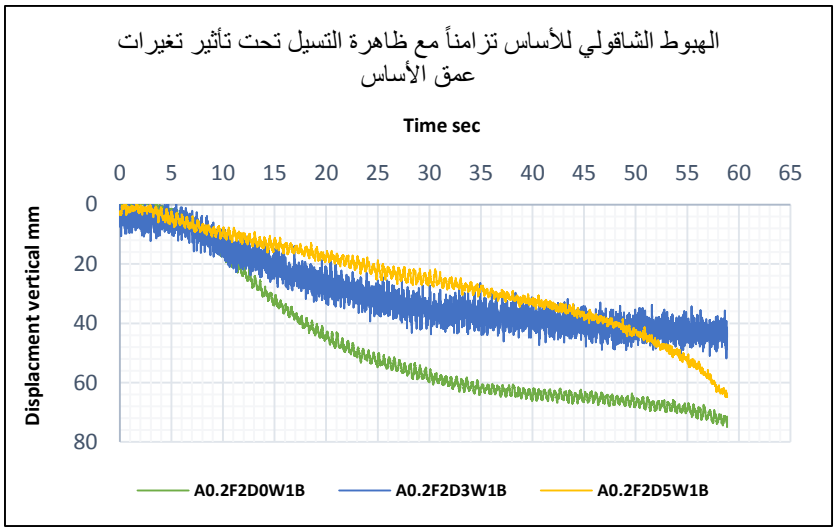


الشكل (12) يوضح تسارع الأساس تزامنا مع ظاهرة تسييل التربة عندما يقع على عمق (0.05 m).



الشكل (13) نتائج الاختبار في حالة السطح الحر (بدون وجود أساس)

أما لحظة بدء ووصول التربة إلى حالة التسييل، تفقد قدرتها على نقل إجهادات القص. عندئذ تتقطع الآلية التي تنقل بها الحركة من القاعدة إلى السطح، وبأن التربة الملامسة للأساسات قد دخلت في طور الحالة السائلة، وأصبحت تعمل كوسادة مائية تمنع وصول الترددات العالية إلى المنشأ (الموجات القصية والتي لا تنتقل عبر السوائل) وتسمح فقط بمرور الموجات ذات الترددات المنخفضة (موجات الضغط)، وهذا ما يفسر تحول حركة الأرض الطبيعية السطحية إلى اهتزازات بطيئة وواسعة النطاق بعد التسييل، وبالتالي تنخفض سعة التسارع ونلاحظ انخفاضاً مفاجئاً في سعة التسارع المقاسة على الأساس (المنشأ)، هذا الانخفاض هو مؤشر هام في الدراسات التجريبية لبدء التسييل عند الأساسات.



الشكل (14) مقارنة الهبوطات الناتجة تحت تأثير تغيرات عمق التأسيس. حيث يعبر المنحني باللون الأخضر عن تواجد الأساس على سطح العينة والعمق 0، يعبر المنحني باللون الأزرق عن تواجد الأساس على العمق 0.03 م، يعبر المنحني باللون البرتقالي عن تواجد الأساس على العمق 0.05 م.

الجدول(4) مقارنة بين الأعماق الثلاثة.

العمق	N_{liq}	الهبوط (مم)	التسارع (g)	هل حدث تسييل؟	ملاحظات الدمج بين عمق بصلة الإجهاد وتأثيرها على التسييل من حيث عدد الدورات
السطح الحر	4.41	---	---	نعم كامل	----
0	8.06	0.592	0.217	جزئي (تضخيم)	تسييل غير كامل، تضخيم في التسارع وتأخير معتدل في عدد الدورات

تسييل موضعي شديد حول الأساس، هبوط كبير، انهيار في التسارع وتأخير أكبر في عدد الدورات	نعم (موضعي)	0.038	5.442	8.56	0.03 m
تسييل مبكر لكن الهبوط أقل بسبب تأثير القاعدة الصلبة	نعم (محتمل)	0.049	1.949	4.74	0.05 m

تفسير النتائج في **ضوء نظرية التفاعل الديناميكي** حيث من الجدول (4)؛ العمود الأخير والذي يمثل ملاحظات الدمج بين عمق بصلة الإجهاد وتأثيرها على التسييل من حيث عدد الدورات؛ نلاحظ بوضوح تأثير العمق على بصلة الإجهاد ولحظة بدء التسييل، أما العلاقة بين الهبوط والتسارع فنلاحظ مايلي:

– عند العمق 0 :هبوط صغير (0.59 مم) مع تسارع مرتفع (0.217g) لم يحدث تسييل كامل، بل تضخيم بسبب الرنين.

– عند العمق 0.03 m حدث هبوط كبير (5.44 مم) مع تسارع منخفض جداً (0.038g) هذا يدل على أن التسييل حدث بشكل كامل حول الأساس، مما أدى إلى فقدان كامل لمقاومة التربة (هبوط كبير) وانقطاع كامل لنقل موجات القص (تسارع منخفض). أما لو جزأنا ما يحدث عند هذا العمق لمرحلة ما بين (0 – 4.03 ثانية) فنلاحظ بأن الحفر سبب اضطراباً في التربة حول الأساس، مما جعلها أكثر رخاوة، ومع بدء الاهتزاز، ترتفع ضغوط المسام بسرعة في هذه المنطقة المخربة. وآلية حدوث التسييل للمرحلة (عند 4.28 ثانية) فتصل المنطقة المخربة إلى التسييل الكامل محلياً ($r_u \approx 0.9$) وهذا يسبب انهياراً موضعياً للتربة حول الأساس وهبوطاً كبيراً (5.44 مم) لأن الأساس يفقد دعمه من الجوانب وانخفاضاً حاداً في التسارع (0.038g)، وذلك لأن التربة المسالة حول الأساس تمنع نقل موجات القص إلى المنشأ. أما المرحلة (بعد 4.28 ثانية) نلاحظ التالي: يستمر الاهتزاز، لكن التربة المسالة لا تنقل الحركة، فيبقى التسارع منخفضاً. ويزداد الهبوط نتيجة تبدد ماء المسام.

– أما عند العمق 0.05 m فنلاحظ بأنه قد حدث هبوط متوسط (1.95 مم) مع تسارع منخفض (0.049g) مما يدل على أن التسييل حدث لكن بشكل أقل شدة، ربما لأن قاعدة صندوق التربة الصلب حدّت من حدوث التشوهات. وتفسير آلية التسييل عند هذا العمق القرب من القاعدة الصلبة

لصندوق التربة الصلب يحد من قدرة التربة على التشوه بحرية، والحفر الأعمق قد يكون أقل إزعاجاً للتربة المحيطة (بسبب الإجهاد الذاتي الأعلى)، التسييل يحدث في طبقات ضحلة (ربما بين العمق 0 و 0.05 m) لكن لا يصل إلى القاعدة بسرعة حيث وجود حساس ضغط ماء المسام كما أن الهبوط أقل (1.95 مم) لأن الطبقة المتسيلة ضحلة، والتسارع منخفض (0.049g) لكنه ليس منخفضاً مثل حالة 0.03 m.

يعتبر عمق التأسيس 0.03 m (وهو يمثل 10% من ارتفاع الطبقة القابلة للتسييل) عمقاً حرجاً في هذه الدراسة، تعرف هذه الظاهرة في الأدبيات بـ ظاهرة العمق الحرج في التفاعل الديناميكي (Critical Depth) حيث:

يتوضع الأساس قريباً بما يكفي من السطح وبالتالي يقل التأثير المقيد للتربة السطحية الناتج عن الأساس، بحيث لا يُقيد بشكل كامل تشوهات التربة السطحية. الأساس ليس قريباً جداً من القاعدة (فتكون حركة التربة حرة)، حيث يكون الأساس بعيداً بما يكفي عن القاعدة الصلبة للصندوق (على عمق 25.5 سم) بحيث لا تُحد القاعدة من *تشوهات* القص. بصلة الإجهاد (وهي المنطقة داخل التربة التي تشهد زيادة ملحوظة في الإجهادات نتيجة الحمل المطبق القادم من الأساسات) تمتد في منطقة لا تتعارض مع القاعدة الصلبة (لا تصل إلى القاعدة حيث يتواجد حساس ضغط ماء المسام) وبالتالي فإن التربة المحيطة بالأساس تتشوه بحرية، مما يسمح بتطور ضغط المسام حتى الوصول للتسييل الكامل. وبالتالي كل ماسبق ذكره يفسر لماذا كان الهبوط عند العمق 0.03 m (5.44 مم) أكبر بكثير من الهبوط عند العمق 0 m (0.59 مم) والعمق 0.05 m (1.95مم).

وأخيرا وبتطبيق قانون التشابه حيث $prototype = \frac{model}{\text{معامل القياس الخاص}}$ تم ربط نتائج النموذج المستخدم في تجربة الطاولة الاهتزازية الموجودة في الجدول (3) بنتائج زلزال حقيقي على أرض الواقع فحصلنا على الجدول رقم (6). الجدول (5) يوضح معاملات القياس للنموذج الفيزيائي حسب (Iai, 1989). حيث عدد الدورات حتى بدء التسييل في النموذج يتوافق مع عدد دورات الإجهاد الفعال للزلزال الحقيقي. لربط الحركة الجيبية بزلزال حقيقي، يمكن استخدام مفهوم الإجهاد الدوري المكافيء CSR وهو في هذه الدراسة يسجل زلزال بتردد 0.212 هرتز وأقصى تسارع له 0.2g وهذه

القيمة تمثل زلزالاً متوسطاً إلى قوي في الكودات الهندسية أما قيمة الإجهاد الفعال الأولي في حالة السطح الحر تصبح 61.6 Kpa.

الجدول(5) يوضح معاملات القياس حسب (Iai, 1989) باعتبار $\lambda_p = 1, \lambda_\varepsilon = \lambda^{0.5}$

الكمية الفيزيائية	الرمز	العلاقة مع λ	القيمة عند $\lambda = 1/20 = 0.05$
الطول	L	λ	0.05
الزمن	t	$\lambda^{0.75}$	$0.05^{0.75} \approx 0.106$
التردد	f	$\lambda^{-0.75}$	$1/0.106 \approx 9.43$
التسارع	a	1	1
السرعة	v	$\lambda^{0.75}$	$0.05^{0.75} \approx 0.106$
الإزاحة	d	$\lambda^{1.5}$	0.011
الإجهاد الكلي للتربة	σ	λ	0.05
الإجهاد الفعال للتربة	σ'	λ	0.05
انفعال التربة	ε	$\lambda^{0.5}$	$0.05^{0.5} \approx 0.224$
كثافة التربة المشبعة	ρ	1	1
ضغط ماء المسام	p	λ	0.05
معامل القص	G	$\lambda^{0.5}$	$0.05^{0.5} \approx 0.224$

الجدول (6) يبين النتائج التجريبية الشاملة نتيجة اختبارات تأثير عمق الأساس على لحظة بدء التسييل بعد تطبيق نظرية التشابه حسب (Iai, 1989)

العمق	t_{liq} sec زمن بدء التسييل	P_{liq} mbar قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالميلي بار	ΔU_{liq} Kpa قيمة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل بالكيلو باسكال	$r_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'_{initial}}$ نسبة تغيرات ضغط ماء المسام لحظة بدء التسييل	$N_{liq}=t\times2$ عدد دورات التحميل حتى لحظة بدء التسييل	الهبوط (مم)	التسارع (g)
السطح الحر	20.80	624	62.4	1.014	4.41	----	----
0 سم	38.02	364.34	36.43	0.578	8.06	53.82	0.217
3 سم	40.38	348.64	34.86	0.551	8.56	494.73	0.038
5 سم	22.36	307.8	30.78	0.485	4.74	177.19	0.049

5-الاستنتاجات والتوصيات:

- تأثير العمق ليس خطياً: الأساس الأعمق ليس بالضرورة أن يكون هو الحل الأفضل أو الأسوأ. العمق 0.03 متر أعطى أسوأ حالة (أكبر هبوط، أسرع انهيار في التسارع) بينما العمق 0.05 متر أعطى تسييلاً مبكراً لكن هبوطاً أقل.
- حدوث تسييل موضعي: في الحالتين 0.03 متر و0.05 متر، حدث تسييل حتى مع عدم وصول r_u نسبة ضغط ماء المسام عند القاعدة إلى 0.9 حيث يوجد حساس ضغط ماء المسام، وهذا يؤكد أهمية وضع حساسات قياس ضغط ماء المسام في مواقع متعددة (وليس فقط في قاعدة العينة) لتحديد منطقة التسييل بدقة.
- العلاقة بين الهبوط والتسارع :الانخفاض الحاد في التسارع إلى g(0.038–0.049) كان مصحوباً بهبوط كبير، مما يؤكد أن قياس التسارع على المنشأ هو مؤشر موثوق لحدوث التسييل.
- العمق الحرج: يبدو أن عمق 0.03 متر (حوالي 10% من ارتفاع العينة) يمثل العمق الأكثر خطورة من حيث الهبوط والتسييل السريع.
- تأثير طريقة وضع الأساس: حفر حفرة ووضع الأساس فيها يخلق منطقة مخربة محيطة بالأساس أكثر عرضة للتسييل وهذا له آثار عملية على تصميم الأساسات في المناطق الزلزالية لذا يجب تجنب الحفر وإعادة الردم دون رص مناسب.
- تغير في مسار تصريف الماء: الأساس المدفون على عمق ضحل قد يعيق التصريف الرأسي للماء، مما يؤثر على توزيع ضغوط ماء المسام.
- ارتباط الهبوط بالتسارع: في حالة العمق الحرج يمكن استخدام هذه العلاقة لتطوير مؤشر تشغيلي للتسييل: إذا انخفض التسارع على المنشأ إلى أقل من 20% من تسارع الطاولة، فهذا يعني حدوث تسييل كامل وهبوط خطير.
- الربط بالواقع الهندسي: يجب دراسة عمق التأسيس بعناية في المناطق الزلزالية، فالعمق المتوسط (الحرج) قد يكون الأسوأ من حيث المخاطر، وليس بالضرورة أن يكون الأعمق دائماً هو الأفضل حيث تشير النتائج إلى وجود عمق معين (حوالي 10% من ارتفاع طبقة التربة القابلة للتسييل). كما يجب إعادة رص التربة حول الأساسات المدفونة بنفس معايير رص التربة الأساسية (أو أعلى) لتجنب خلق منطقة ضعيفة يمكن أن تسيل بسرعة.

- الدراسات المستقبلية: نوصي في الدراسات المستقبلية باختبار أعماق إضافية (مثل 10، 20، 40 مم) وأنواع تربة مختلفة ، وكثافات مختلفة، كما نوصي بعمل معايرة للنموذج باستخدام البرنامج الهندسي المثالي لتحديد دقيق لمدى تعميم هذه النسبة في الكودات الهندسية.

6-المراجع:

الابراهيم، مريم.، والعامودي، سليمان. (2021). تأثير تقوية الأعمدة باستخدام تقنية القميص البيتوني في السلوك الزلزالي للإطارات البيتونية المسلحة بفتحة واحدة. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (43)، العدد 14، 131-166.

المراد، وليد.، والحلواني، أمجد. (2021). دراسة الاستجابة الزلزالية للأبنية البيتونية العالية مع أخذ أثر التربة بعين الاعتبار. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (43)، العدد 18، 99-120.

فرج، براءة.، الجراش، علي.، والعامودي، سليمان. (2021). تقييم الاستجابة الزلزالية للجمل الإنشائية المختلطة غير منتظمة الصلابة شاقولياً باستخدام السجل الزمني المقيس. *مجلة جامعة حمص*، المجلد (43)، العدد 16، 41-70.

Alaie, R., & Chenari, R. J. (2018). Design and performance of a single axis shake table and a laminar soil container. *Civil Engineering Journal*, *4*(6), 1326–1337

Amin, M., & Singh, M. (2024). A numerical study on the effect of liquefaction on ring footings during the 2001 Bhuj earthquake, Gujarat, India. *Discover Civil Engineering*, *1*(1), Article 9. https://doi.org/10.1007/s44290-024-00009-7.

Barrios, G., Larkin, T., & Chouw, N. (2020). Influence of shallow footings on the dynamic response of saturated sand with low confining pressure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *128*, Article 105872. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105872.

Ben-Zeev, S., Goren, L., Parez, S., Toussaint, R., Clément, C., & Aharonov, E. (2017). The combined effect of buoyancy and excess pore pressure in facilitating soil liquefaction. In *Poromechanics VI* (pp. 107–116). HAL. hal.science.

Cerado, J. M. F. T., & Estores, G. B. (2025). Nonlinear seismic response analysis of a building foundation on liquefaction-prone soil in Padada, Davao del Sur. *Buildings*, *15*(2), Article 442. https://doi.org

Fadum, R. E. (1948). Influence values for estimating stresses in elastic foundations. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, *3*, 77–84.

Gourvenec, S. M., & Randolph, M. F. (2009). Effect of foundation embedment on consolidation response. In Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Vol. 1, pp. 638–641). IOS Press. https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-638

Hīkina Whakatutuki. (2016). *Earthquake geotechnical engineering practice: Module 3. Identification, assessment and mitigation of liquefaction hazards*. New Zealand Geotechnical Society. https://nzgs.org.

Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soils and Foundations*, *29*(1),105–118. https://doi.org.

Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

Lentini, V., Castelli, F., Cavallaro, A., & Grasso, S. (2019). A laboratory study for the dynamic characterization of sandy soil. In F. Silvestri & G. Moraci (Eds.), *Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions* (pp. 3568–3576). CRC Press/Taylor & Francis Group

Nguyen, D. V., & Ghalandarzadeh, A. (2023). A macroelement model for shallow and embedded foundations on liquefiable soils considering pore

pressure generation. *Computers and Geotechnics*, *155*, Article 105218. https://doi.org.

Olarte, J. C., Dashti, S., Liel, A. B., & Paramasivam, B. (2018). Effects of drainage control on densification as a liquefaction mitigation technique. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 110, 212–231. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.008

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. John Wiley & Sons

Qiu, Z., & Elgamal, A. (2020). Numerical simulation of seismic soil-pile-structure interaction in liquefiable ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *132*, Article 106059. https://doi.org.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, *97*(9), 1249–1273. https://doi.org.

Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, *92*(6), 105–134. https://doi.org.

Setyadi, G. P., Rifa'i, A., & Indrawan, I. G. B. (2024). Effects of soil liquefaction to foundation bearing capacity based on empirical and numerical simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1373*(1), Article 012011. https://doi.org.

Singh, V., Yadav, A. K., & Bano, S. (2019). A theoretical study of liquefaction process. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, *6*(1), 32–36.

Teixeira, F. (2024). Mechanisms to explain soil liquefaction triggering, development, and persistence during an earthquake. *Earthquake Science*. https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.07.003.

Varghese, R. M., & Gali, M. L. (2014). Shaking table tests to investigate the influence of various factors on the liquefaction resistance of sands. *Natural Hazards*, *73*(3), 1337–1351. https://doi.org.

Xenaki, V. C., & Athanasopoulos, G. A. (2003). Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An experimental investigation of the effect of fines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *23*(3), 183–194. https://doi.org.

Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O., & Makihara, Y. (1984). Undrained cyclic shear strength of dense Niigata sand. *Soils and Foundations*, *24*(4), 131–145. https://doi.org.

Zhang, C., Zhang, Q., Wu, Z., Zhang, J., Sui, T., & Wen, Y. (2015). Numerical study on effects of the embedded monopile foundation on local wave-induced porous seabed response. *Mathematical Problems in Engineering*, *2015*, Article 184621. https://doi.org/10.1155/2015/18462.

Ziotopoulou, K., & Gazetas, G. (2022). Seismic response of embedded foundations in liquefiable soils: Insights from centrifuge modeling and numerical simulations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 148(3), Article 04021195. https://doi.org.