



Evaluasi Perbandingan Pembuatan Kanal Dengan Metode Konvensional Dan Metode Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) Pada Proyek Strategis Nasional Jaringan Irigasi Baliase Di Sulawesi Selatan

Regi Suhandar^{1)*}, Mahliza Nasution²⁾

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area

*Corresponding author. suandaregi@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Geosynthetic Cementitious Composite Mats, GCCM, Conventional Method, Irrigation Canal, Construction Evaluation, National Strategic Project

How to cite:

Regi Suhandar, Mahliza Nasution (2025), Evaluasi Perbandingan Pembuatan Kanal Dengan Metode Konvensional Dan Metode Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) Pada Proyek Strategis Nasional Jaringan Irigasi Baliase Di Sulawesi Selatan)



ABSTRACT

The implementation of canal construction with an alternative method is to use Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) which is a relatively new technology in industrial construction consisting of synthetic materials (geosynthetic) and cement concrete (cementitious). The GCCM method offers potential advantages over conventional methods, including faster construction time, lower maintenance costs, lower risk of environmental damage, and more consistent and durable channel quality. This study aims to highlight and compare the effectiveness of conventional methods and Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) methods in canal construction. The results of the study indicate that the GCCM method has advantages in terms of structural strength, erosion resistance, and reduced environmental impacts compared to conventional methods. The results of physical tests show that GCCM significantly increases slope stability by reducing soil stoppage up to eight times compared to conventional methods. Under seepage flow conditions, slopes stabilized with GCCM remain solid without structural failure, while slopes with conventional methods experience total collapse. In terms of cost, although the price of GCCM material is higher, savings in labor and implementation duration make it more economical for large-scale projects. The results of this study can be a reference for practitioners and decision makers in choosing the right canal construction method for national strategic projects

1. Pendahuluan

Dalam beberapa dekade terakhir, industri konstruksi telah mengalami perkembangan yang pesat dalam hal teknologi dan material. Salah satu teknologi yang relatif baru adalah Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM). Geosynthetic Cementitious Composite

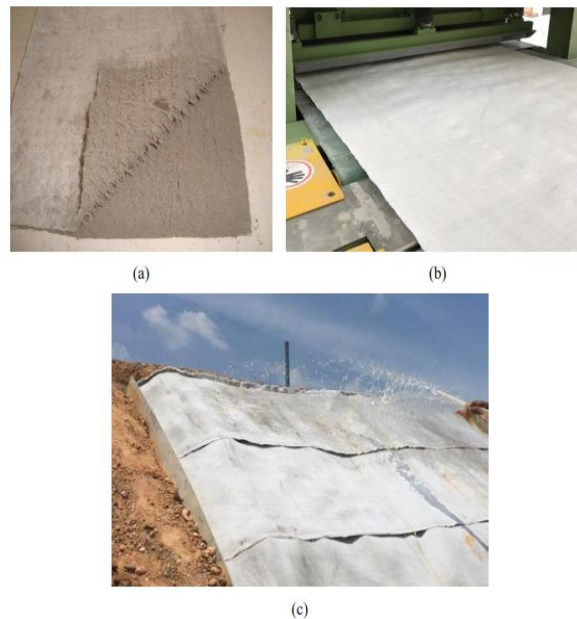
Mats (GCCM) adalah suatu sistem komposit yang terdiri dari bahan sintetis yang digunakan untuk memperkuat tanah (geosynthetic) dan beton semen (cementitious).

Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) pertama kali dikembangkan pada tahun 1990-an sebagai alternatif untuk metode konvensional dalam pembuatan kanal, jalan, dan struktur lainnya. Pada awalnya, Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) digunakan untuk proyek-proyek kecil, tetapi seiring waktu, teknologi ini telah berkembang dan digunakan dalam proyek-proyek besar.

Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode konvensional, antara lain:

1. Waktu konstruksi yang lebih cepat
2. Biaya perawatan yang lebih rendah
3. Risiko kerusakan lingkungan yang lebih rendah
4. Kualitas kanal yang lebih konsisten dan tahan lama

Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) telah digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pembuatan kanal dan jalan, perkuatan tanah dan lereng, pembuatan struktur penahan tanah, serta perbaikan jalan dan jembatan.



Gambar 1. Contoh tikar komposit geosintetik semen (GCCM) dan aplikasinya
(a) Komposisi GCCM; (b) Proses pembuatan; (c) Pemasangan dan penyemprotan air GCCM pada permukaan lereng.

Metode yang digunakan diantaranya melakukan pengamatan, menganalisis secara komparatif antara Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) dengan metode konvensional. Kinerja Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) yang dihasilkan dari metode di atas pada umumnya tidaklah sama.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui analisis statistik, analisis kualitatif, dan analisis komparatif antara metode Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) dengan metode konvensional dan mendapatkan nilai yang lebih efisien.

Oleh karena itu peneliti tertarik untuk mengkaji “Evaluasi Perbandingan Pembuatan Kanal Dengan Metode Konvensional Dan Metode Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) Pada Proyek Strategis Nasional Jaringan Irigasi Baliase Di Sulawesi Selatan



Gambar 2. Pembangunan dan rehabilitasi jaringan irigasi Baliase

2. Tinjauan Pustaka

Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCM) adalah geosintetik fleksibel, komposit, berisi beton yang mengeras karena hidrasi untuk membentuk lapisan beton yang tipis, tahan lama, dan tahan air. Pada dasarnya Concrete Canvas adalah beton dalam bentuk gulungan yang diproduksi dibawah ISO.

Concrete Canvas memadukan sifat kedap air geomembran dengan perlindungan dan ketahanan beton. Geomembran ini dapat dipasang secepat geosintetik konvensional dan akan mengeras dalam waktu 24 jam sejak terhidrasi untuk menghasilkan pelapis beton tahan lama yang siap digunakan.

Concrete Canvas terdiri dari dua lapisan geotekstil yang saling terhubung yang membungkus campuran beton kering yang diformulasikan secara khusus. Lapisan geomembran LLDPE memastikan material memiliki daya serap yang sangat tinggi yang secara signifikan mengurangi atau menghilangkan kebocoran rembesan. LLDPE atau *Linear Low Density Polyethylene* adalah bahan plastik yang memiliki sifat lentur dan tahan terhadap suhu dan cuaca ekstrem.

Concrete Canvas dapat dengan cepat digulung untuk melapisi dan memperbaiki infrastruktur kanal. Pemasangannya jauh lebih cepat, mudah, dan lebih hemat biaya daripada metode pelapisan konvensional. Concrete Canvas dapat dihidrasi baik dengan cara disemprotkan maupun direndam sepenuhnya dalam air. Hasilnya, Concrete Canvas merupakan solusi ideal untuk pelapisan dan perbaikan saluran besar seperti kanal irigasi guna meningkatkan masa pakainya.

Concrete Canvas (Geokomposit Semen) dapat mencegah pertumbuhan vegetasi atau tumbuhan, meminimalisir menumpukkan sedimentasi atau lumpur dan pengendalian erosi, mengurangi kebutuhan dan biaya pemeliharaan. Selain itu, pelapis saluran Concrete Canvas (Geokomposit Semen) 5 kali lebih tahan abrasi dari beton OPC standar, memiliki ketahanan kimia yang sangat baik, kinerja pelapukan yang baik dan tidak akan terdegradasi oleh UV.

Concrete Canvas dapat dipasang untuk aplikasi dengan akses terbatas dan siap digunakan dan tidak memerlukan alat bantu, pengukuran, atau pemadatan.

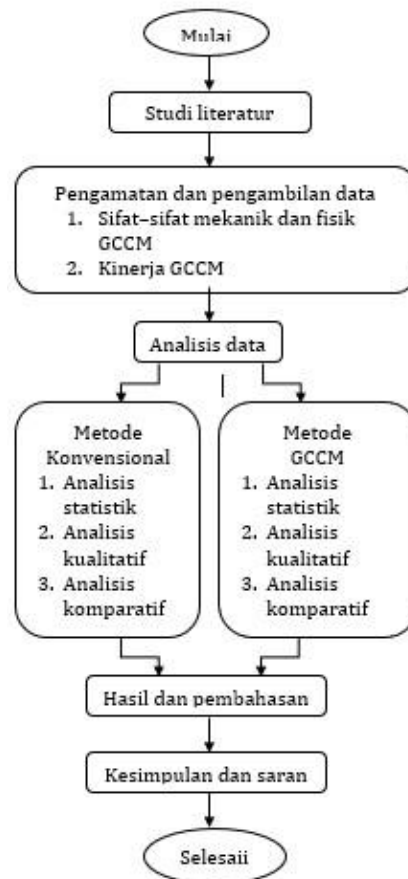
CC bersertifikat BBA (*British Board of Agrément*) dengan daya tahan lebih dari 120 tahun bila digunakan untuk aplikasi pengendalian erosi. Untuk saran mengenai iklim tertentu, silakan hubungi *Concrete Canvas Ltd*

3. Metode Penelitian

Metode penelitian dimulai dari tahapan studi literatur untuk memahami konsep dan prinsip dasar metode *Geosynthetic Cementitious Composite Mats* (GCCM), serta aplikasinya dalam konstruksi. Selanjutnya melakukan pengukuran terhadap sifat-sifat mekanik dan fisik dari *Geosynthetic Cementitious Composite Mats* (GCCM), seperti kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan modulus elastisitas, serta melakukan pengamatan terhadap kinerja *Geosynthetic Cementitious Composite Mats* (GCCM) dalam kondisi lapangan yang sebenarnya.

Langkah selanjutnya berupa pembahasan analisis statistik terhadap data yang diperoleh dari lapangan, melakukan analisis kualitatif terhadap data yang diperoleh dari pengamatan, melakukan analisis komparatif antara metode *Geosynthetic Cementitious Composite Mats* (GCCM) dengan metode konvensional dalam konstruksi. Langkah terakhir yaitu penarikan kesimpulan serta saran dari kajian yang dilakukan.

Langkah-langkah pada metode penelitian ini secara detail akan dijelaskan menggunakan bagan alir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Bagan alir

Penelitian ini mengambil studi kasus pada proyek Strategis Nasional Jaringan Irigasi Baliase di Bendung Baliase, Kabupaten Luwu Utara – Sulawesi Selatan. Jaringan irigasi yang ditinjau adalah 3 saluran irigasi, yakni :

1. Jaringan irigasi di Baliase kiri, dengan panjang segmen 34,60 km dan luas 3.421,28 ha.
2. Jaringan irigasi Baliase kanan 1, dengan panjang segmen 19,24 km dan luas 2.968,56 ha.
3. Jaringan irigasi Baliase kanan 2, dengan panjang segmen 23 km dan luas 1.716,87 ha.

Secara keseluruhan, daerah irigasi Baliase sendiri memiliki luas 21.928 ha yang terletak di 5 kecamatan, yakni Kec. Masamba, Mappadeceng, Sukamaju, Baebunta, dan Malangke yang merupakan daerah potensial bagi sumber daya lahan pertanian dan air irigasi

4. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan data pembangunan jaringan irigasi Baliase yang diperoleh melalui PT. Brantas Abipraya (Persero), dua percobaan dilakukan dalam kondisi aliran rembesan, yaitu percobaan yang lerengnya tidak stabil dengan metode konvensional (kasus 1) dan percobaan yang lerengnya distabilkan oleh GCCM (kasus 2).

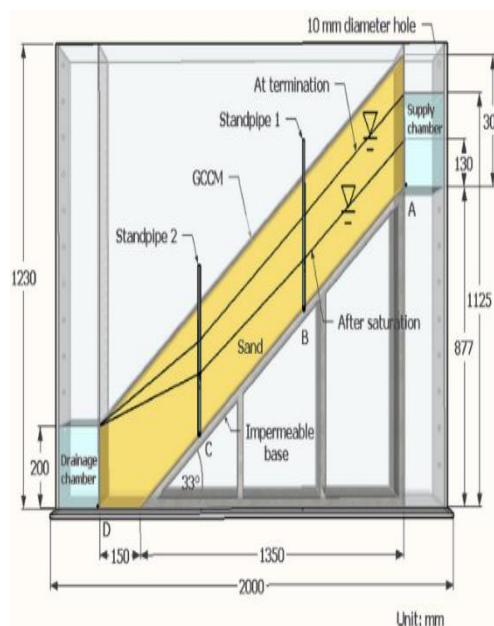
Dalam kasus 2, GCCM sepanjang 1,7m dan lebar 0,19m yang telah diawetkan selama 7 hari diletakkan langsung di permukaan lereng. Untuk menghindari gesekan antara GCCM dan akrilik, celah 5mm disediakan di setiap sisi GCCM untuk mencegahnya berinteraksi dengan sisi tangki, yang dapat memengaruhi hasil pengujian.

Tangki yang digunakan adalah tangki akrilik sepanjang 2,0m, tinggi 1,2m, dan lebar 0,2m yang digunakan untuk uji model fisik lereng tanah. Setiap sisi tangki setebal 10mm transparan, yang berguna untuk memantau dan memotret lereng tanah selama pengujian.

Selain itu, ada celah 50 mm antara GCCM dan kasa baja yang terletak di ujung untuk mencegah keduanya bersentuhan. Perlu diperhatikan bahwa gesekan antarmuka antara GCCM dan pasir mencegah GCCM meluncur dari permukaan lereng.

Dalam banyak kasus, lereng yang dangkal dapat menjadi tidak stabil ketika terkena aliran rembesan, oleh karena itu tujuan di sini adalah untuk memodelkan lereng nyata dengan naiknya air tanah. Prosedur pengujian terdiri dari dua tahap, yaitu saturasi dan aliran rembesan.

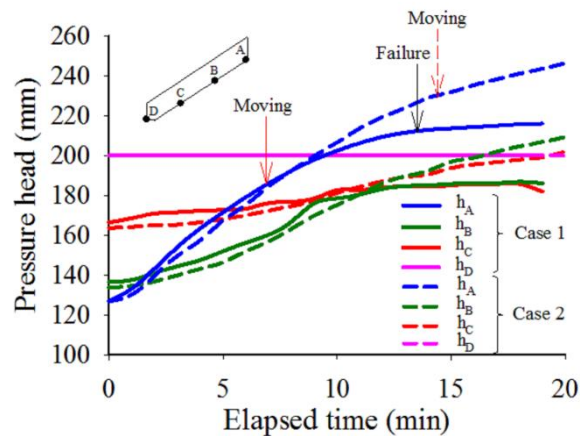
Sebelum melakukan pengujian, bagian bawah lereng berpasir, yaitu zona yang terletak di dekat dasar kedap air, dijenuhkan dengan menerapkan tekanan air konstan (h_A) sebesar 130mm di lereng atas. Untuk menjaga h_A tetap konstan, terdapat serangkaian lubang berdiameter 10mm di sisi kanan ruang pasokan untuk mengontrol ketinggian air (lihat Gambar 1). Untuk mengontrol h_A , hanya satu lubang berdiameter 10mm pada ketinggian air target yang dibuka sementara yang lain ditutup



Gambar 1. Skema model fisik

Aliran rembesan mencapai ujung lereng setelah sekitar 1 jam, setelah itu dibutuhkan waktu yang hampir sama lagi agar tekanan air di ujung lereng (h_D) mencapai nilai target 200m. Agar aliran rembesan menjadi stabil, h_A dan h_D dipertahankan selama 30 menit, selama waktu tersebut laju aliran keluar dipantau. Perhatikan bahwa h_D tetap konstan pada 200mm selama pengujian.

Setelah jenuh, pompa listrik mengalirkan air ke ruang pasokan untuk menaikkan h_A secara bertahap dari 0,13m. Garis biru pada Gambar 2 menunjukkan bahwa rata-rata air dalam kasus 1 (tidak stabil) naik sedikit lebih lambat daripada dalam kasus 2 (stabil).



Gambar 2. Variasi tekanan air seiring waktu

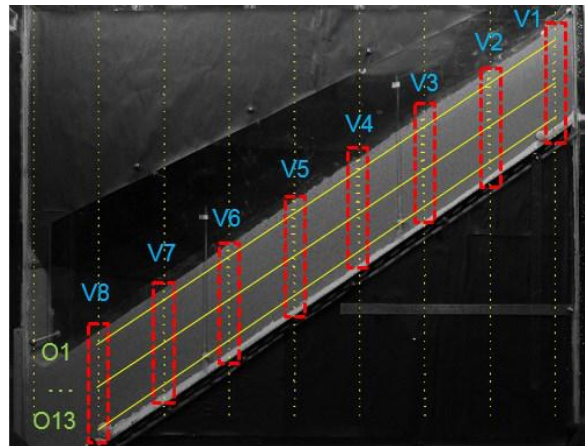
Selama setiap pengujian, perhatian diberikan untuk menghindari gangguan pada model fisik atau kondisi pencahayaan, yang akan memengaruhi kualitas foto yang diambil untuk analisis PIV (*Particle Image Velocimetry*). Setiap pengujian dihentikan ketika lereng runtuh atau h_A mencapai level maksimum 250mm (yaitu untuk menghindari luapan).

Hasil

Semua hasil yang disajikan di sini muncul dari informasi yang terdapat dalam foto-foto yang diambil selama pengujian. Tekanan ditentukan dari pipa tegak dan level air di ruang-ruang di kedua ujung lereng model, dan perpindahan tanah diukur menggunakan PIV (*Particle Image Velocimetry*).

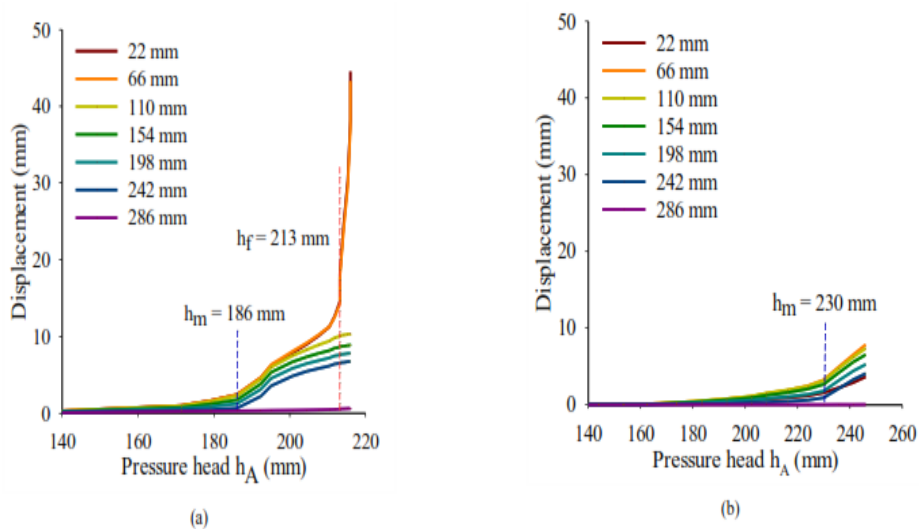
Pergeseran Tanah

Untuk menginterpretasikan bagaimana lereng tanah mengalami deformasi, delapan penampang vertical dan 13 penampang miring dipertimbangkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, dengan jarak antara keduanya masing-masing 180mm dan 22mm



Gambar 3. Lokasi penampang melintang

Perlu dicatat bahwa penampang vertikal V3 dipertimbangkan pada Gambar 4a dan 4b karena pengamatan PIV (*Particle Image Velocimetry*) menunjukkan bahwa perpindahan paling tinggi di sana, sehingga kemungkinan besar merupakan lokasi ketidakstabilan terbesar. Hal ini juga dikonfirmasi oleh plot deformasi pada V3 yang dihasilkan oleh variasi tekanan air pada titik A.

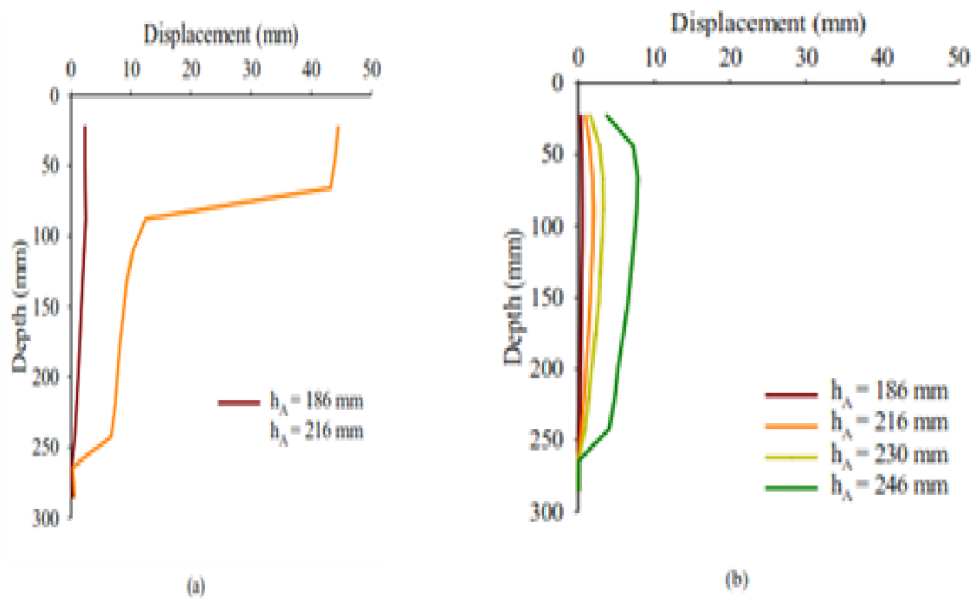


Gambar 4 . Perpindahan tanah pada penampang vertikal V3 terhadap tekanan air di lereng (h_A): (a) tanpa stabilisasi; (b) dengan stabilisasi

Gambar 4 menunjukkan perpindahan tanah versus h_A pada V3 pada kedalaman 22mm, 66mm, 110mm, 154mm, 198mm, 242mm, dan 286mm. Pergeseran tanah jelas meningkat dengan h_A , dengan perpindahan tanah maksimum masing-masing 45mm dan 7mm pada kasus 1 dan 2. Perpindahan yang sangat berkurang pada kasus 2 menunjukkan bahwa GCCM membantu mengurangi deformasi lereng. Pada kasus 1 dengan metode konvensional, perpindahan lereng menjadi cepat ketika h_A mencapai 213mm (sekitar 71% dari kedalaman lereng model), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(a). Sebaliknya pada kasus 2, perpindahan lereng tetap bertahap ketika h_A mencapai 213mm dan bahkan setinggi 246mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(b).

Ini menunjukkan bahwa GCCM berkontribusi pada ketahanan lereng dan mengurangi deformasi. Perpindahan tanah pada penampang vertikal lainnya mirip dengan yang ada pada V3 tetapi dengan besaran yang lebih kecil. Pada setiap penampang vertikal, terdapat sangat sedikit pergerakan tanah pada kedalaman 286mm, yang disebabkan oleh kekasaran dasar.

Untuk menginterpretasikan bagaimana perpindahan lereng bervariasi terhadap kedalaman, yang pertama di plot ulang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5



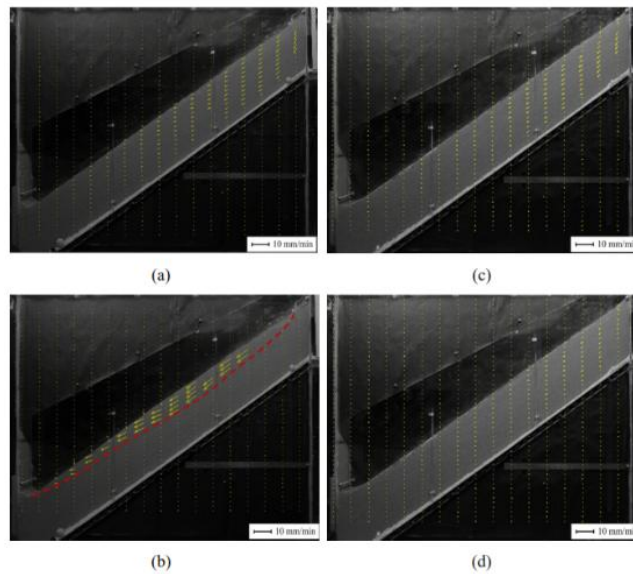
Gambar 5. Variasi perpindahan terhadap kedalaman di penampang V3: (a) kasus 1: tanpa stabilisasi; (b) kasus 2: dengan stabilisasi.

Dalam kasus 1 [yaitu, tidak ada stabilisasi; Gambar 8(a)], ketika h_A relatif kecil (yaitu $h_A = 186$ mm), pergerakan tanah adalah nol di dasar dan meningkat cukup stabil menuju permukaan lereng. Ia turun sedikit di zona paling dangkal di mana tanah berada di atas muka air tanah. Namun, ketika h_A relatif tinggi ($h_A = 216$ mm), lereng mulai runtuh dan ada lebih banyak pergerakan tanah.

Dalam kasus 2 sebaliknya [yaitu dengan stabilisasi GCCM; Gambar 5(b)], perpindahan tanah adalah nol di dasar, meningkat ke maksimum yang jelas pada kedalaman tertentu dan kemudian menurun ke arah permukaan.

Perpindahan maksimum di dekat permukaan dalam kasus 1 dan 2 untuk $h_A = 216$ mm adalah 44mm dan kurang dari 5mm masing-masing, yang sekitar delapan kali lipat merupakan perbedaan yang relatif besar. Dalam kasus 2 dengan stabilisasi GCCM, keberadaan karpet beton (*Concrete Mat Cloth*) dapat berkontribusi pada pemerataan pergerakan tanah di dekat permukaan.

Di sisi lain, dalam kasus 1 dengan metode konvensional tanpa stabilisasi, kegagalan dimulai dari lapisan pergerakan tertinggi dan menjalar ke arah lereng atas. Arah pergerakan lereng tanah dapat disajikan dalam bentuk vektor kecepatan partikel tanah yang diperoleh dari OpenPIV, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Hasilnya menunjukkan bahwa arah utama pergerakan hampir sejajar dengan dasar lereng

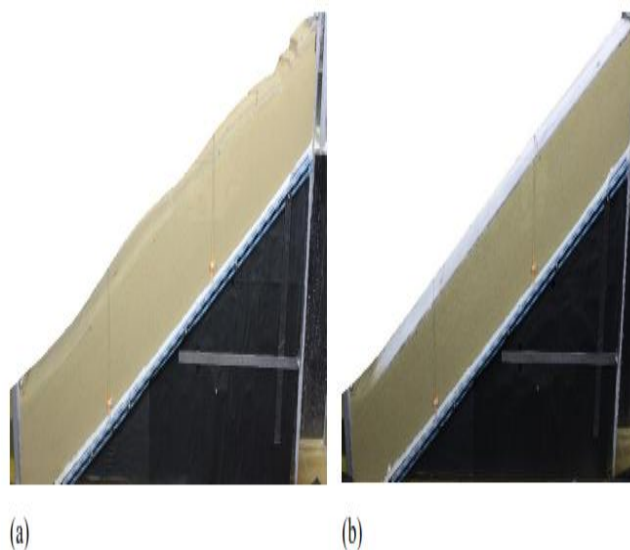


Gambar 6. Vektor kecepatan partikel tanah: (a) kasus 1, $h_A = 186\text{mm}$; (b) kasus 1, $h_A = 213\text{mm}$; (c) kasus 2, $h_A = 230\text{mm}$; (d) kasus 2, $h_A = 246\text{mm}$.

Selain itu, zona kegagalan dapat di deteksi dari vektor kecepatan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9(b).

Kedalaman zona kegagalan bervariasi dari satu bagian ke bagian lainnya dan cenderung lebih dalam di lereng atas dan lebih dangkal di lereng bawah. Kedalaman maksimum (D) dan panjang (L) zona kegagalan masing-masing sekitar $0,1\text{m}$ dan $1,7\text{m}$ yang pada $D/L \approx 6\%$ berarti bahwa kegagalan dapat diklasifikasikan sebagai kegagalan translasi menurut Abramson et al. (2002) dan Hansen (1984).

Kemiringan tanah difoto setelah setiap pengujian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Foto lereng tanah setelah pengujian: (a) kasus 1: tanpa stabilisasi; (b) kasus 2: dengan stabilisasi.

Lereng yang tidak distabilkan (menggunakan metode konvensional) telah gagal total setelah pengujian, tetapi lereng yang distabilkan GCCM tetap stabil.

5. Kesimpulan

Uji model fisik lereng berpasir dengan metode konvensional dan metode GCCM dilakukan dalam kondisi rembesan, dan teknik PIV (*Particle Image Velocimetry*) bekerja dengan baik untuk mengukur deformasi lereng.

Dalam penelitian saat ini, akurasi PIV (*Particle Image Velocimetry*) adalah 0,13mm, yang lebih kecil dari diameter efektif ($D_{10} = 0,16\text{mm}$) butiran pasir. Hasilnya menunjukkan bahwa GCCM menstabilkan lereng dengan cara pemerataan perpindahan dan penerapan gaya gesek dan gaya normal pada permukaan lereng. Akibatnya, deformasi lereng yang distabilkan dengan GCCM jauh lebih kecil daripada yang tanpa GCCM.

Dalam penelitian saat ini, GCCM bekerja dengan baik dalam memperkuat lereng berpasir dengan adanya aliran rembesan. Namun, efektivitas stabilisasi GCCM untuk lereng jenis tanah lain (misalnya lanau, lempung berpasir, lempung, dll.) dan kondisi lain (misalnya rembesan, curah hujan, dll.) belum dipelajari.

Masalah ini harus diselidiki dan di evaluasi dalam pekerjaan mendatang yang melibatkan model fisik, model sentrifus, simulasi numerik, dan/atau studi lapangan

Referensi

- Tan Phong Ngo, Suched Likitlersuang, Akihiro Takahashi, 2019, Performance of a geosynthetic cementitious composite mat for stabilising sandy slopes, Geosynthetics International.
- Abramson, L., Lee, T., Sharma, S. & Boyce, G. (2002). Slope Stability and Stabilization Methods, John Wiley, New York.
- Ahn, T. B., Cho, S. D. & Yang, S. C. (2002). Stabilization of soil slope using geosynthetic mulching mat. Geotextiles and Geomembranes.
- Akay, O., Özer, A. T., Fox, G. A., Bartlett, S. F. & Arellano, D. (2013). Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow. Geotextiles and Geomembranes.
- Andrawes, K. Z. & Butterfield, R. (1973). The measurement of planar displacements of sand grains. Géotechnique.
- ASTM D3080-98. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D5199-06. Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D5993-14. Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit of Geosynthetic Clay Liners, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D6768. Standard Test Method for breaking force and elongation of textile fabrics. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D8173-18. Site Preparation, Layout, Installation, and Hydration of Geosynthetic Cementitious Composite Mats, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bouazza, A. (2002). Geosynthetic clay liners. Geotextiles and Geomembranes.

- BS-EN-12467. Fibre-cement flat sheets - Product specification and test methods, BSI.
- Bush, D. I., Jenner, C. G. & Bassett, R. H. (1990). The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft grounds. *Geotextiles and Geomembranes*.
- Day, R. W. & Axten, G. W. (1989). Surficial stability of compacted clay slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Evans, D. A. (1972). Slope Stability Report, Slope Stability Committee, Department of Building and Safety, Los Angeles, CA.
- Fowler, J. & Koerner, M. (1987). Stabilization of very soft soils using geosynthetics. *Proceedings of Geosynthetics*.
- Gilbert, R. B. & Wright, S. G. (2010). Slope stability with geosynthetic clay liners. *Geosynthetic Clay Liners for Waste Containment Facilities*, CRC Press.
- Jirawattanasomkul, T., Kongwang, N., Jongvivatsakul, P. and Likitlersuang, S. (2018). Finite element modelling of flexural behaviour of Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM). *Composites Part B: Engineering*.
- Jirawattanasomkul, T., Kongwang, N., Jongvivatsakul, P. and Likitlersuang, S. (2019). Finite element analysis of tensile and puncture behaviours of geosynthetic cementitious composite mat (GCCM). *Composites Part B: Engineering*.
- Jongvivatsakul, P., Ramdit, T., Ngo, T. P. & Likitlersuang, S. (2018). Experimental investigation on mechanical properties of geosynthetic cementitious composite mat (GCCM). *Construction and Building Materials*.
- White, D. J., Take, W. A. & Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique*.
- Wu, K. J. & Austin, D. N. (1992). Three-dimensional polyethylene geocells for erosion control and channel linings. *Geotextiles and Geomembranes*.
- Wu, T. H. (1994). Slope stabilization using vegetation. *Geotechnical Engineering: Emerging Trends in Design and Practice*.
- Wu, T. H., Kokesh, C. M., Trenner, B. R. & Fox, P. J. (2014). Use of live poles for stabilization of a shallow slope failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Yan, S. W. & Chu, J. (2010). Construction of an offshore dike using slurry filled geotextile mats. *Geotextiles and Geomembranes*.
- Zhang, G., Hu, Y. & Zhang, J. M. (2009). New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests. *Measurement*