

Trase jalan tol dapat melewati area dengan kondisi tanah lunak dengan karakteristik penurunan berlebih dan memiliki stabilitas yang rendah. Perbaikan tanah menggunakan *stone column* merupakan salah satu metode untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah. *Stone column* harus dirancang berdasarkan dimensi dan jarak yang optimal untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah lunak. Pertimbangan kecepatan waktu analisis dan kemudahan dalam pemodelan, analisis dalam model 2D dengan ekuivalensi parameter dan geometri lebih sering digunakan dengan hasil yang terlalu konservatif. Oleh karena itu, model 2D perlu divalidasi menggunakan model 3D yang dianggap mewakili kondisi sebenarnya di lapangan. Tujuan dalam analisis ini adalah mengetahui perilaku deformasi timbunan di atas tanah lunak akibat adanya variasi konfigurasi pemasangan *stone column* guna memperoleh desain yang optimum.

Lokasi penelitian berada pada STA 50+600 pembangunan Jalan Tol Yogyakarta – Bawen. Data analisis berasal dari pengujian 2 titik bor dan 1 titik sondir. Perilaku deformasi timbunan dianalisis sesuai kondisi tanpa perkuatan *stone column*. Optimasi dilakukan dengan analisis variasi beberapa parameter, seperti variasi jarak pemasangan *stone column*, diameter *stone column*, serta kedalaman penetrasi *stone column*. Analisis numeris menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga digunakan sebagai metode untuk memprediksi perilaku timbunan akibat adanya variasi parameter. Analisis 2D *stone column* menggunakan metode ekuivalensi parameter *column wall* (CW) dan *equivalent area* (EA). Hasil analisis menggunakan pemodelan 2D dibandingkan dengan hasil analisis 3D untuk memperoleh hubungan hasil analisis.

Hasil optimasi dilakukan pembebanan statik, pseudostatik, dan *transient* gempa untuk mengetahui respon perilaku *pore water pressure* pada tanah dasar yang diperkuat *stone column*. Hasil analisis menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan terhadap perilaku deformasi timbunan dengan adanya variasi parameter konfigurasi pemasangan *stone column*. Pengaruh penggunaan *stone column* memberikan dampak pada penurunan timbunan yang lebih kecil dibandingkan tanpa adanya *stone column*. Peningkatan jarak pemasangan *stone column* menyebabkan peningkatan deformasi pada badan timbunan. Perubahan jarak pemasangan *stone column* dari 1,6 m menjadi 2,4 m meningkatkan deformasi timbunan sebesar 11,21% untuk model CW. Penurunan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya diameter *stone column*. Perubahan diameter dari 0,4 m menjadi 0,8 m menyebabkan penurunan tereduksi sebesar 12,80% pada pemodelan CW. Reduksi penurunan juga terjadi pada kondisi peningkatan panjang penetrasi *stone column*. Peningkatan panjang *stone column* dari 6 m ke 12 m mereduksi penurunan sebesar 4,90%. Stabilitas lereng akibat beban statik 15 kPa dan beban dinamik pseudostatik meningkat seiring peningkatan *area replacement ratio* pada tanah dasar. Analisis penurunan EA menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan model 3D, sedangkan model CW menunjukkan hasil yang lebih besar. Hasil analisis CW menunjukkan kedekatan hasil dengan analisis 3D. Faktor reduksi hasil analisis stabilitas EA ke hasil CW sebesar 0,97. Analisis pembebanan *transient* dilakukan pada model L10 D0.8 S2.4 menunjukkan kelebihan tekanan air pori maksimum sebesar 4,4 kPa, deformasi lateral sebesar 22,59 cm, dan deformasi vertikal 3,27 cm. Hasil analisis numeris menggunakan model 2D dan 3D menunjukkan bahwa *stone column* dapat diaplikasikan pada tanah dasar untuk mereduksi penurunan dan meningkatkan stabilitas timbunan. Hasil penurunan dan angka aman pemodelan 3D *stone column* dapat diprediksi menggunakan model 2D dengan faktor koreksi tertentu.

Kata kunci: *tanah lunak, column wall, equivalent area, model 3D, beban transient*

ABSTRACT

The construction of a toll road entails traversing areas characterized by soft soil conditions with excessive settlement and low stability. Soil improvement using stone columns is one method to enhance the soil's bearing capacity. Stone columns should be designed based on optimum dimensions and spacing to improve the bearing capacity of soft soil. Analyzing the time speed and simple of modeling, 2D analysis using parameter and geometry equivalence is commonly employed but often yields overly conservative results. Therefore, the 2D model needs validation using a 3D model that is considered to represent the actual field conditions. The objective of this analysis is to understand the deformation behavior of embankments on soft soil due to variations in the configuration of stone column installation to obtain an optimum design.

The research location is at STA 50+600 of the Yogyakarta-Bawen Toll Road construction. The analysis data is derived from testing 2 boreholes and 1 cone penetration test point. The deformation behavior of the embankment is analyzed under the condition without stone column reinforcement. Optimization is performed by analyzing various parameters, such as the spacing of stone column installation, stone column diameter, embankment slope, cohesion of the stone column filling material, and stone column penetration depth. Numerical analysis using finite element-based software is used as a method to predict the embankment's behavior due to parameter variations. The 2D analysis of stone columns employs the column wall (CW) and equivalent area (EA) parameter equivalence methods. The analysis results using 2D modeling are compared with the results obtained from 3D analysis to establish a correlation.

The optimization results involved static, pseudo-static, and transient seismic loading to investigate the response of pore water pressure behavior in the ground reinforced by stone columns. The analysis results demonstrated a fairly significant influence on the deformation behavior of embankments with variations in the configuration parameters of stone column installation. The use of stone columns had an impact on reducing embankment settlement compared to scenarios without them. Increasing the spacing between stone columns led to an increase in deformation in the embankment body. Changing the spacing of stone column installation from 1.6 m to 2.4 m increased embankment deformation by 11.21% for the CW model. Settlement decreased with increasing stone column diameter. Changing the diameter from 0.4 m to 0.8 m resulted in a reduced settlement by 12.80% in the CW modeling. Reductions in settlement also occurred with an increase in the length of stone column penetration. Increasing the length of the stone column from 6 m to 12 m reduced settlement by 4.90%. Slope stability due to static load of 15 kPa and pseudo-static dynamic load increased with the increase in area replacement ratio in the ground. Settlement analysis indicated lower results compared to the 3D model, while the CW model yielded higher results. The CW analysis closely approximated the outcomes of the 3D analysis. The reduction factor from EA stability analysis to CW results was 0.97. Transient loading analysis was performed on model L10 D0.8 S2.4, showing a maximum excess pore water pressure of 4.4 kPa, lateral deformation of 22.59 cm, and vertical deformation of 3.27 cm. Numerical analysis results using 2D and 3D models indicated that stone columns could be applied to the ground to reduce settlement and improve embankment stability. The outcomes of settlement and safety factor for 3D stone column modeling can be predicted using a 2D model with specific correction factors.

Keywords: *soft soil, column wall, equivalent area, 3D model, transient seismic loading*