

## ABSTRACT

At present, the infrastructures of Indonesia, mainly highways and railways, are developed rapidly to enhance economic growth. Pile-supported slab viaduct (PSSV) with pre-stressed hollow concrete (PHC) piles is widely used to create both infrastructures. The structural configuration contains a pile as a pier, pile head, and slab. So that, quick construction time and lower cost are amongst the consideration of that type of selection. Previous research showed that PHC piles without additional treatment have low ductility, energy dissipation, and brittle failure behavior. Considering that the Indonesian country is mainly in the earthquake zone, developing the high seismic performance of PSSV structures becomes necessary. Application of shear panel damper (SPD) and steel bracing was proposed as energy dissipation devices in the PSSV structure to enhance the structure's seismic performance. Several nonlinear numerical simulations had been performed utilizing SAP2000 and OpenSees to evaluate and investigate the structural behavior and seismic performance of the ordinary and the enhanced PSSV structure. There were two pre-designed common PSSV structures, i.e., PSSV A and PSSV B. Then, steel bracing and SPDs were installed to the PSSV B and so-called PSSV C.

An experimental work of spun pile cyclic loading test was simulated numerically before the primary analysis to validate and evaluate the software's accuracy in modeling and analyzing spun pile elements. Modal analysis result of PSSV structures shows that steel bracing and SPDs application significantly improve the rigidity of the structures. Based on the damping ratio resulting from cyclic loading analysis using OpenSees, both PSSV A and PSSV B structures had a maximum damping ratio of around 5%. In contrast, the PSSV C structure achieved a higher damping ratio of 10%-19% and 7%-8% in X and Y-direction, respectively. Overall, PSSV A structure had good performance under seismic motions. On the contrary, the PSSV B structure response exceeded the Life Safety Protection limit under mostly all earthquakes. The seismic responses of PSSV C under all earthquake motions were much smaller than PSSV B response and below the Minimal Damage limit except the response in transversal direction under Darfield earthquake resulted by OpenSees. Further, the hysteresis loops of observed SPDs under earthquake motions showed that the SPDs worked and dissipated the energy when seismic excitations were subjected to the PSSV structure after the SPDs yielded without exceeding the ultimate capacity of the SPDs.

This study drew that the SPD and steel bracing application significantly reduces the structural response of PSSV structure instead of using too many spun piles as PSSV A structure. It had an excellent opportunity as a dissipator device in PSSV structures to protect the structure from severe damage due to earthquake excitations. Moreover, the NLTH analysis results showed that using a large modification response factor for designing an ordinary PSSV structure is not recommended since spun pile has brittle failure behavior. Elastic design using  $R$  value of 1-1.5 is still acceptable to design an ordinary PSSV structure, particularly under seismic load. However, further research is needed to refine the numerical analysis and confirm the performance of SPD and steel bracing applications as energy dissipation devices for PSSV structure.

**Keywords:** pile-supported slab viaduct, PHC pile, shear panel damper, seismic evaluation, nonlinear analysis

## INTISARI

Saat ini, infrastruktur Indonesia, terutama jalan raya dan kereta api, sedang berkembang pesat untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi negara. Struktur *pile-supported slab viaduct* (PSSV) dengan spun pile banyak dikonstruksi dalam kedua infrastruktur. Konfigurasi struktur cukup sederhana yakni terdiri dari tiang pancang sebagai pilar, *pile head*, dan pelat beton. Waktu konstruksi yang cepat dan biaya yang lebih rendah menjadi salah satu pertimbangan dalam pemilihan jenis tersebut. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa tiang PHC tanpa perlakuan tambahan memiliki daktilitas dan disipasi energi yang rendah serta memiliki perilaku keruntuhan getas. Mengingat negara Indonesia sebagian besar berada di zona gempa dengan risiko tinggi, pengembangan desain struktur PSSV dengan kinerja seismik tinggi menjadi suatu kebutuhan. Penerapan *shear panel damper* (SPD) dan *bracing* baja diusulkan sebagai perangkat disipasi energi dalam struktur PSSV untuk meningkatkan kinerja seismik struktur. Beberapa simulasi numerik nonlinier telah dilakukan menggunakan SAP2000 dan OpenSees untuk mengevaluasi dan menyelidiki perilaku struktural dan kinerja seismik dari struktur PSSV biasa dan struktur PSSV usulan. Ada dua struktur PSSV biasa yang telah dirancang sebelumnya, yaitu PSSV A dan PSSV B. Kemudian, *bracing* baja dan SPD dipasang ke PSSV B dan disebut PSSV C.

Sebuah uji eksperimental beban siklik spun pile disimulasikan secara numerik sebelumnya untuk memvalidasi dan mengevaluasi akurasi SAP2000 dan OpenSees dalam pemodelan dan analisis numerik elemen spun pile. Hasil analisis modal struktur PSSV menunjukkan bahwa *bracing* baja dan aplikasi SPD secara signifikan dapat meningkatkan kekakuan struktur. Berdasarkan rasio redaman yang dihasilkan dari analisis pembebanan siklik menggunakan OpenSees, baik struktur PSSV A maupun PSSV B memiliki rasio redaman maksimum sekitar 5%. Adapun struktur PSSV C mencapai rasio redaman yang lebih tinggi masing-masing 10%-19% dan 7%-8% dalam arah X dan Y. Secara keseluruhan, struktur PSSV A memiliki kinerja yang baik di bawah gerakan seismik. Sebaliknya, respon struktur PSSV B melebihi batas *Life Safety Protection* akibat hampir semua gempa. Respon seismik PSSV C di akibat semua gerakan gempa jauh lebih kecil daripada respon struktur PSSV B dan di bawah batas *Minimal Damage* kecuali respon dalam arah transversal akibat gempa Darfield yang dihasilkan oleh OpenSees. Selanjutnya, kurva histeresis dari SPD yang diamati di bawah gerakan gempa menunjukkan bahwa SPD bekerja dan dapat mendisipasi energi ketika eksitasi seismik dikenai kepada struktur PSSV C setelah SPD mengalami kondisi leleh tanpa melebihi kapasitas maksimum SPD.

Studi ini menggambarkan bahwa aplikasi SPD dan *bracing* baja secara signifikan dapat mengurangi respon struktur PSSV alih-alih menggunakan terlalu banyak tiang pancang seperti pada struktur PSSV A. SPD memiliki peluang yang sangat baik sebagai perangkat disipator energi dalam struktur PSSV untuk melindungi struktur dari kerusakan parah akibat eksitasi gempa. Selain itu, hasil analisis NLTH menunjukkan bahwa penggunaan faktor modifikasi respon yang besar untuk merancang struktur PSSV biasa tidak direkomendasikan karena spun pile memiliki perilaku keruntuhan getas. Desain elastis dengan nilai R sebesar 1-1,5 masih dapat diterima untuk desain struktur PSSV biasa, terutama terhadap beban gempa. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengkonfirmasi secara lebih detail kinerja aplikasi SPD dan *bracing* baja sebagai perangkat disipasi energi untuk struktur PSSV.

**Kata kunci:** *pile-supported slab viaduct*, *spun pile*, *shear panel damper*, evaluasi seismik, analisis nonlinier