

Studi *Retrofitting* Jembatan Komposit Menggunakan *Link Slab* Akibat Beban Gempa pada Berbagai Kondisi Tanah Oprit

Muhammad Farid Nurul Iman, Hidajat Sugihardjo, dan Ananta Sigit Sidharta
Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: hidayat@ce.its.ac.id dan ananta@ce.its.ac.id

Abstrak—Timbunan jalan pendekat jembatan (oprit) adalah segmen yang menghubungkan konstruksi perkerasan dengan abutmen, yang harus didesain sehingga aman terhadap kekuatan dan kestabilan abutmen. Akibat beban seismik pada jembatan nirsambungan, kontribusi tanah urugan oprit terhadap respon struktur jembatan mempunyai peran. Pada studi-studi sebelumnya, telah dikaji akibat beban seismik penggunaan link slab sebagai pengganti expansion joint pada jembatan, tanpa memperhitungkan pengaruh tanah oprit. Atas dasar kajian tersebut, pada tulisan ini distudi secara seismik penggunaan link slab pada jembatan komposit sederhana bentang banyak 4x25 meter. Kontribusi tanah oprit didesain sebagai pegas aktif dan pasif pada abutmen yang memiliki nilai kekakuan bervariasi berdasarkan jenis tanahnya. Analisis seismik yang digunakan adalah Metode Statik Ekuivalen, Analisis Respon Spektrum dan Analisis Riwayat Waktu dengan 5 rekaman gempa dengan kandungan frekuensi yang berbeda, yang PGA nya diskalakan ke zona gempa [1]. Dalam studi ini *Retrofitting* dilakukan dengan 2 alternatif, yaitu yang pertama semua expansion joint diganti dengan link slab, hanya menyisakan satu expansion joint di tengah jembatan dan yang kedua semua expansion joint diganti dengan link slab. Hasil studi menunjukkan bahwa kekakuan tanah pada oprit berkontribusi cukup signifikan terhadap respon struktur jembatan. Terjadi pertambahan gaya horisontal pada abutmen yang mencapai 25%. Pada pilar terjadi pengurangan gaya yang mencapai 27%. Dilain pihak tegangan tarik yang terjadi pada penulangan link slab maksimum 19,89%*f_y*, sehingga masih aman terhadap beban gempa rencana dan retak yang terjadi pada link slab masih memenuhi syarat. Yaitu sebesar 50%*f_y*.

Kata kunci—*expansion joint*, jembatan komposit, link slab, oprit, *Retrofitting*, seismik

I. PENDAHULUAN

TIMBUNAN jalan pendekat jembatan (oprit) adalah segmen yang dibatasi oleh lebar dan tinggi tertentu yang menghubungkan konstruksi perkerasan dengan abutmen jembatan yang harus direncanakan sedemikian rupa sehingga mendukung terhadap kekuatan dan kestabilan abutmen. Terdapat beberapa jenis tanah yang bisa digunakan sebagai oprit. Setiap jenis tanah mempunyai nilai kekuatan yang berkontribusi terhadap kestabilan abutmen. Permasalahan yang muncul ketika tanah oprit merupakan tanah yang kurang baik atau lunak adalah terjadinya ketidakstabilan abutmen, terutama ketika terjadi gempa.

Tanah lunak atau tanah lempung lunak tidak memiliki nilai kekakuan yang baik. Hanya tanah jenis pasir dan lempung keras yang mempunyai nilai kekakuan untuk mendukung kestabilan abutmen atau retaining wall. Dimana tanah tersebut dapat dimodelkan sebagai pegas yang terletak di sepanjang ketinggian abutmen dengan nilai kekakuan masing-masing ketika terjadi gempa [1].

Sebagian besar struktur jembatan yang ada di Indonesia, menggunakan material beton, beton pratekan atau komposit baja dan beton dengan sistem strukturnya juga merupakan sistem struktur sederhana diatas 2 perletakan atau sederhana bentang banyak yang dihubungkan dengan *expansion joint*. Dimana timbul berbagai permasalahan seperti terjadinya kelelahan (*fatigue*) yang berakibat penurunan kekuatan sehingga terjadi retak dan korosi nantinya. Dan penggunaan *link slab* dapat menjadi suatu alternatif penyelesaian masalah yang timbul sebagai akibat adanya kerusakan pada *expansion joint*.

Studi penggunaan *link slab* akibat pembebanan nonseismik maupun seismik telah banyak dilakukan. [2] melakukan penelitian akibat beban statik dengan cara eksperimental pada balok baja dan beton bertulang. [3] telah melakukan eksperimental dan desain *link slab* pada jembatan komposit dengan memperhitungkan daerah paling lemah pada *interface* antara *link slab* dan lantai kendaraan. Rekomendasi penambahan penghubung geser (*shear connector*) pada zona transisi telah meningkatkan kinerja jembatan komposit sederhana bentang-banyak nirsambungan (*jointless*). Hasil studi ini telah diaplikasikan pada desain dan metoda penyambungan jembatan komposit sederhana dengan memperhitungkan variasi bentang antara 12 sampai 30 meter [4]-[6]. Studi tentang penggunaan *link slab* pada jembatan komposit akibat beban seismik dengan menggunakan metoda statik ekuivalen, respon spektrum, dan *Time History Analysis (THA)* juga telah dilakukan [7].

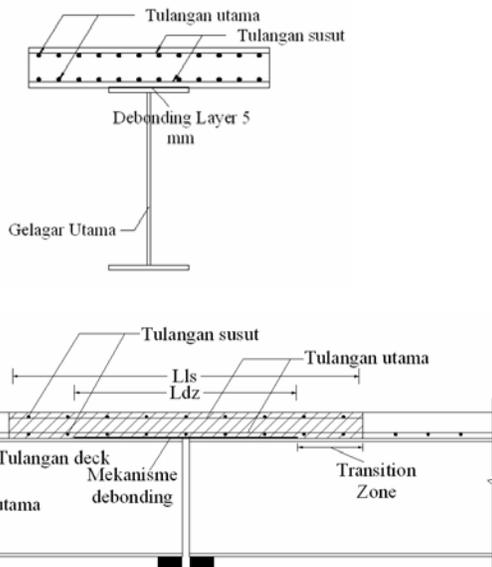
Semua studi tersebut tanpa memperhitungkan pengaruh tanah oprit. Oleh karena itu pada tulisan ini akan distudi secara seismik penggunaan link slab pada jembatan komposit bentang 4x25 m dengan memperhitungkan pengaruh tanah oprit. Kinerja seismik yang akan dilakukan berdasar pada metoda yang telah dilakukan dan merupakan pengembangan dari analisis nonseismik dan analisis seismik [5]-[8].

II. METODE PENELITIAN

Metoda penelitian mengadopsi studi yang telah dilakukan oleh [2], [8], dan [7] dengan mengacu pada peraturan [1]. Modifikasi utama dilakukan pada pemodelan abutmen akibat adanya pengaruh tanah oprit [2]. Hasil analisis dan desain *link slab* untuk pembebanan nonseismik diambil dari studi terdahulu, [5] dan [6]. Analisis seismik dilakukan pada wilayah gempa rencana, yaitu wilayah Gempa 1 (gempa paling kuat) pada kondisi tanah lunak [1]. Metoda analisis seismik mengadopsi studi yang dilakukan [7], menggunakan 3 metoda, yaitu Metoda Statik Ekuivalen, Respon Spektrum dan *Time History Analysis (THA)*. Beban gempa yang digunakan dalam studi ini adalah 5 riwayat gempa dengan kandungan frekuensi yang berbeda.

A. Hasil Analisa Seismik Terdahulu

Dari analisis nonseismik terdahulu diperoleh detail dan penulangan *link slab* seperti pada Gambar 3, [5] dan [6]. Untuk bentang jembatan 25 meter diperoleh tebal *link slab* 195 mm, panjang *debonding zone* (untuk mekanisme *debonding*) 1750 mm, panjang zona transisi 625 mm dan dengan lebar jembatan 9 meter. Tulangan utama (*longitudinal*) yang digunakan D22-100 mm, dari baja dengan $f_y=390$ MPa dan beton $f'_c = 35$ MPa.



Gambar 1. Detail penulangan *link slab* dengan zona *debonding* dan -transisi pada pilar, [5].

B. Perencanaan Struktur Jembatan

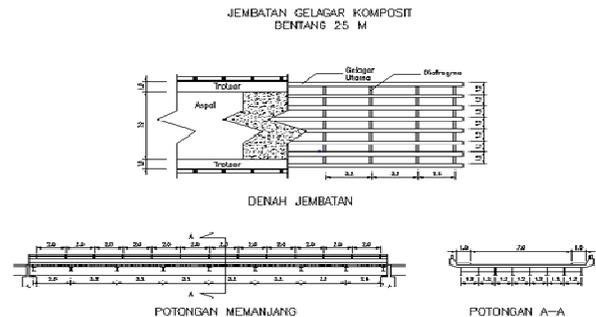
Model jembatan layang yang diteliti mempunyai bentang 4x25 m. Panjang ini masih lebih kecil dari panjang jembatan baja integral yang bisa mencapai panjang 160 m, [9]. Denah dan potongan jembatan seperti terlihat pada Gambar 4, [10]. Perencanaan struktur atas jembatan mengambil dari studi [5] dan [6]. Perencanaan struktur bawah jembatan mengacu pada peraturan [1].

Balok jembatan dari profil WF buatan ukuran 900x400x24x38 mm, lantai kendaraan dari beton bertulang, dengan tebal 200 mm, sedang ukuran *link slab* 1.7x9x0.195

m. Lantai kendaraan dipisah oleh *expansion joint* selebar 50 mm.

Penampang abutmen sebesar 1 x 11 m, pilar terdiri dari 2 kolom bulat dengan diameter 1.7 m. Tinggi teoritis pilar dan abutmen sama yaitu 7 meter (dihitung dari permukaan pile cap ke titik berat balok pilar) terjepit didalam tanah sedalam 1 meter. Ukuran balok pilar 1.3x1.3 meter dengan bentang 8.4 meter as-as kolom. Perencanaan dan kontrol dimensi bangunan bawah jembatan yang terdiri dari abutmen dan pilar dapat dilihat pada [11].

Perletakan yang digunakan adalah bantalan elastomer (*elastomeric bearing pads*) tipe tetap (*fix*) dan geser (*expansion*) ukuran 300x200x26 mm, dengan tinggi elastomer diantara pelat baja 14 mm, tebal pelat baja dan pembungkus masing-masing 6 mm dengan kekerasan 600, [12].

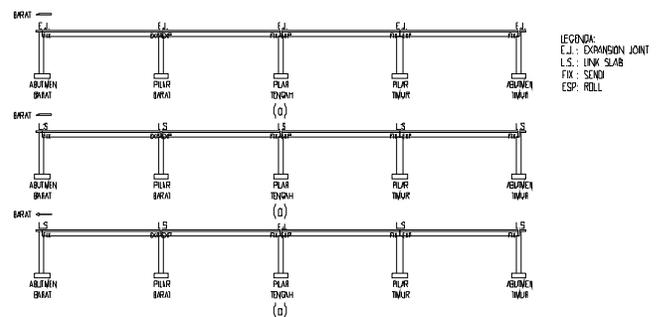


Gambar 2. Denah dan potongan jembatan, [10].

C. Desain Retrofitting

Material bangunan bawah, lantai kendaraan dan *link slab* menggunakan mutu beton dengan $f'_c=35$ MPa, tulangan dengan $f_y=390$ MPa. Sedang untuk balok baja jembatan digunakan material Bj 41 dengan $f_y=250$ MPa dan untuk perletakan elastomer diasumsikan besarnya modulus geser $G=0.96$ MPa, SNI (2008); [8].

Retrofitting dilakukan dengan 2 metoda. *Retrofitting-1* yaitu mengganti semua *expansion joint* dengan *link slab*, kecuali pilar tengah. Sedangkan *Retrofitting-2* mengganti semua *expansion joint* dengan *link slab*. Dengan konfigurasi perletakan setiap baloknya tidak berubah, seperti terlihat pada Gambar 3.

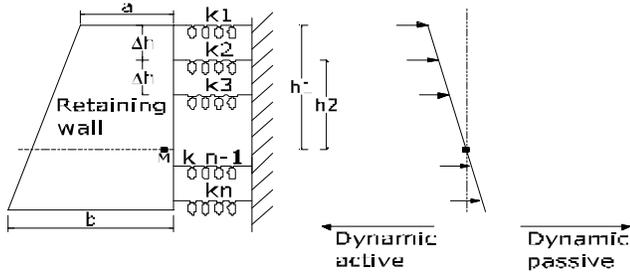


Gambar 3. Potongan memanjang jembatan layang: (a) Struktur Asli; (b) *Retrofitting-1*; (c) *Retrofitting-2*, [11].

D. Pemodelan Tanah Oprit

Tanah oprit dimodelkan sebagai pegas yang dipasang dengan interval $\Delta_h = 1$ meter sepanjang abutmen. Perilaku

pegas dimodelkan sebagai pegas aktif dan pegas pasif. Dimana setiap jenis pegas memiliki nilai kekakuan yang berbeda. Konfigurasi pemodelan tanah oprit terlihat seperti



Gambar. 4. Konfigurasi pemodelan tanah oprit, [11].
pada Gambar 4.

Untuk menghitung nilai kekakuan pegas translasi aktif atau pasif digunakan persamaan (1) sampai (5).

$$k_1 = \frac{1}{6} \eta_h (\Delta h)^2 \tag{1}$$

$$k_2 = \eta_h (\Delta h)^2 \tag{2}$$

$$k_3 = 2\eta_h (\Delta h)^2 \tag{3}$$

$$k_i = (i - 1)\eta_h (\Delta h)^2 \tag{4}$$

$$k_n = \frac{1}{6} (3n - 4)\eta_h (\Delta h)^2 \tag{5}$$

Dimana k_1 adalah kekakuan pegas paling atas, dan k_n adalah kekakuan pegas paling bawah, n adalah jumlah banyak pegas yang akan dipasang dan Δh interval tinggi pegas. η_h adalah

Tabel 1.
Interval nilai modulus reaksi tanah dasar η_h [1]

SOIL	η_h (KN/M ³)	
	ACTIVE	PASSIVE
LOOSE SAND	200-300	400-600
MEDIUM DENSE SAND	400-600	800-1200
DENSE SAND	800-1200	1600-2400

modulus reaksi tanah dasar yang didapat dari Tabel 1 berdasarkan jenis tanah dan sifatnya.

Dengan nilai modulus reaksi tanah dasar seperti pada Tabel 1, akan dibuat 3 desain berdasarkan jenis tanah oprit. Desain-1 menggunakan oprit dengan jenis tanah pasir lepas, desain-2 dan desain-3 masing-masing menggunakan jenis tanah pasir medium dan padat. Didapatkan nilai kekakuan pegas setiap desain, yang dapat dilihat pada [11].

E. Langkah-langkah Retrofitting

Metode *Retrofitting* akibat beban dinamik mengadopsi cara yang dilakukan oleh [3] dan [7] Langkah pertama menghitung retak yang terjadi pada *link slab*. Kemudian menghitung displesmen perletakan pada sistim jembatan sederhana, dimana besarnya tidak boleh lebih besar dari displesmen ijin, jika tidak dikehendaki *Retrofitting*. Cara sederhana untuk menghitung beban gempa statik pada *link slab* dapat digunakan Metode Simpilkasi. Metode ini akan dibandingkan dengan Metode Respon Spektrum dan Analisis Riwayat

Waktu. Dalam Analisis Riwayat Waktu, nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) gempa diperoleh dengan cara menyamakan intensitas gempa tersebut dengan respon spektrum redaman 5% [1]. Langkah terakhir mengontrol ulang tegangan-tegangan pada setiap unsur struktur jembatan seperti abutmen, pilar dan balok jembatan akibat adanya redistribusi gaya yang disebabkan oleh adanya *link slab*.

III. DISKUSI HASIL

A. Desain dan Analisa Nonseismik

Dari perencanaan struktur jembatan sesuai dengan [1] didapatkan berat satu bentang jembatan, yang terdiri dari berat balok, diafragma, lantai kendaraan, aspal, trotoar dan pagar sebesar 3563,5 kN.

Dengan tulangan *link slab* D22-100 mm, maka untuk $\beta=2$ (asumsi), tegangan tulangan pada *link slab* $40\%f_y=156$ MPa, tebal selimut beton $d_c=50$ mm dan $A=10000$ mm² (asumsi tinggi luas efektif sebesar 2 kali selimut beton), didapat lebar retak $\omega=0,272$ mm lebih kecil dari lebar retak ijin $=0,33$ mm. Retak selebar 82,5% dari retak ijin ini dapat diatasi dengan penggunaan beton *Engineered Cementitious Composite* (ECC) yang mempunyai kekuatan tarik 350 kali beton normal, [13].

Dengan asumsi struktur bangunan bawah terjepit penuh didapat kekakuan lateral kolom pilar didapat 106591 kN/m dan abutmen 238323 kN/m, sehingga kekakuan efektif untuk satu sistim jembatan sederhana $k_{eff}=172457$ kN/m (rata-rata dari jumlah kekakuan abutmen dan kekakuan kolom). Jembatan direncanakan dibangun pada Daerah Gempa-1 dan di atas tanah lunak. Sehingga didapat koefisien geser dasar 0,23, [1]. Dengan asumsi jembatan untuk jalan raya utama dan struktur jembatan masih dalam keadaan elastis jika terjadi gempa (tidak ada plastifikasi), sehingga didapat faktor keutamaan 1.2 dan faktor tipe bangunan 3. Didapatkan displesmen longitudinal perletakan elastomer tipe geser sebesar $\delta_{perletakan}=17,11$ mm Nilai ini bisa jauh lebih besar jika diasumsikan bangunan bawah dalam kondisi retak.

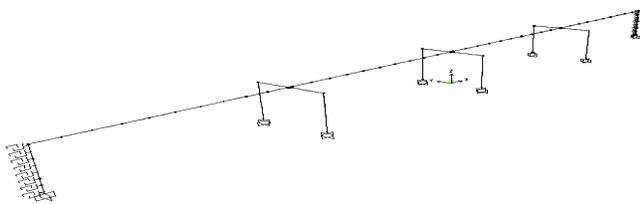
Sesuai dengan desain perletakan di atas, didapat luas permukaan perletakan 60000 mm². Dengan tinggi elastomer diantara pelat baja 14 mm dan modulus geser 0,96 MPa, diperoleh $k_{perletakan}=4114,3$ kN/m. Dengan jumlah balok 8 untuk 1 bentang, besarnya reaksi vertikal tiap perletakan balok didapat 1377 kN. Sehingga tegangan tekan pada perletakan yang terjadi $\sigma=3,712$ MPa. Besarnya tegangan geser yang terjadi diasumsikan $20\%\sigma$, didapat $\tau=0,7424$ MPa dan didapat besarnya kemampuan displesmen longitudinal perletakan sebelum slip $\delta_{ijin}=10,53$ mm. Kemampuan geser perletakan ini lebih kecil dibandingkan dengan displesmen longitudinal yang terjadi akibat gempa 17,11 mm. Balok-balok jembatan dapat terlepas dari perletakannya atau bahkan jatuh ke bawah, sehingga perlu dilakukan *Retrofitting*, untuk menyediakan kekakuan lateral yang cukup.

B. Desain dan Analisa Seismik

Dengan Metoda Simplikasi, besarnya gaya gempa statik yang bekerja pada link slab pada satu pilar didapatkan $T_{LS}^* = 2950,83$ kN. Untuk jembatan dengan $CIS = 0,828$ dan berat satu bentang $3563,5$ kN, didapat . Dengan luas tulangan $38000 \text{ mm}^2/\text{m}$, tegangan yang terjadi pada link slab dengan anggapan retak terjadi penuh pada ketebalannya, didapat $77,6$ MPa. Nilai ini jauh lebih kecil dari tegangan $50\%f_y = 195$ MPa.

Untuk analisis dinamik menggunakan program bantu untuk analisa struktur. Model struktur jembatan mengacu pada studi [8], dimana balok jembatan dimodelkan dengan satu balok pengganti yang mempunyai properti fisik delapan kali balok aslinya, dan dimodelkan sebagai elemen balok 2D. Bangunan bawah dimodelkan 3D. Modifikasi utama pada studi ini dibandingkan dengan studi terdahulu [7], terletak pada pemodelan abutmen yang diberi pegas aktif dan pasif di posisi per 1 meter di sepanjang ketinggian abutmen dengan dengan kekakuan diperoleh dari persamaan 1 sampai 5. Abutmen diasumsikan terjepit pada tiang pancang, sehingga titik gulingnya berada pada jepit tersebut.

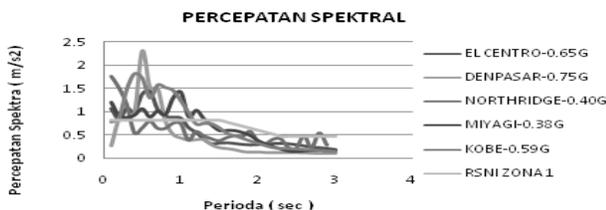
Perletakan dimodelkan sebagai balok 2D, dengan beberapa konstrain sesuai fungsinya sebagai perletakan tetap atau bergerak (bergeser), dimana kekakuan gesernya sebesar 4114.3 kN/m untuk tiap perletakan. Model struktur jembatan 3D dengan kekakuan pegas horisontal pada abutmen seperti ditunjukkan Gambar 5.



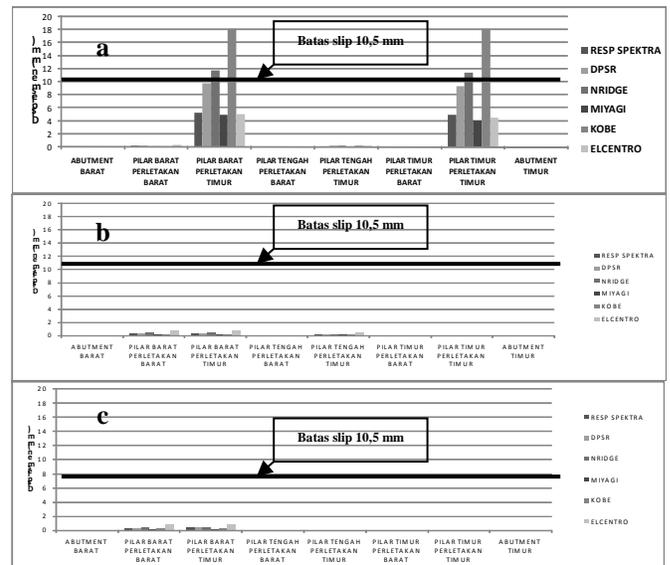
Gambar. 5. Model 3D struktur jembatan layang 4 bentang dengan pegas horisontal. [11].

C. Desain dan Analisa Seismik

Sebagai kontrol Metoda Simplikasi, dilakukan Analisis Respon Spektrum untuk Daerah Gempa-1 [1], dan Analisis Riwayat Waktu linier dengan 5 riwayat gempa El Centro-1940 PGA 0,65, Denpasar-1976 PGA 0,75, Miyagi-1978 PGA 0,38, Northridge-1994 PGA 0,4, dan Kobe-1995 PGA 0,59 untuk menghitung tegangan tulangan pada *link slab*. Analisis gempa hanya dilakukan dalam arah longitudinal. Nilai PGA gempa diperoleh dengan cara menyamakan intensitasnya dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4, untuk Faktor Keutamaan $I = 1.2$ dan Tipe Struktur $S = 3$; dan redaman 5%.



Gambar. 6. Skala lima rekaman gempa terhadap spektra desain RSNI 2005 Zona-1 (gempa terkuat), $I = 1.2$ dan $S = 3$; redaman 5%, [11].



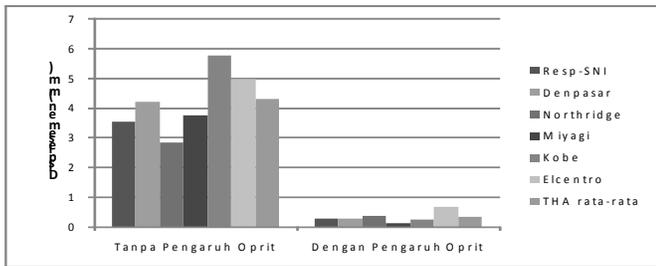
Gambar. 7. Displasemen pada kondisi oprit pasir padat (desain-3): (a) Struktur asli; (b) *Retrofitting-1*; (c) *Retrofitting-2*

Pada Gambar 7 (a) terlihat bahwa pada struktur asli (sebelum diretrofit) nilai displasemen perletakan tipe gesernya sebesar 18 mm , melebihi displasemen ijin $10,53 \text{ mm}$. Hal ini menunjukkan bahwa struktur jembatan bisa slip atau lepas akibat displasemen yang melebihi kapasitas. Tetapi nilai 18 mm ini jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan studi tanpa memperhitungkan kontribusi tanah oprit, yaitu sebesar 70 mm [7]. Hal ini diakibatkan kontribusi kekakuan tanah oprit. Terlihat juga bahwa displasemen tertinggi diakibatkan oleh gempa Kobe, sehingga kontrol dengan beban beberapa gempa dengan kandungan frekuensi yang berbeda diperlukan.

Pada Gambar 7 (b), setelah *Retrofitting* dan dengan oprit pasir padat, terlihat bahwa displasemen yang terjadi hanya kurang dari 1 mm jauh dibawah $\delta_{ijin} = 10.53 \text{ mm}$. Nilai 1 mm ini juga lebih kecil dari displasemen pada analisis yang tidak memperhitungkan kontribusi kekakuan tanah oprit, yaitu sebesar $3,5 \text{ mm}$ [7]. Hal ini menunjukkan bahwa struktur yang telah diretrofit dengan *link slab* menjadi lebih kaku dan adanya kontribusi tanah oprit yang cukup signifikan.

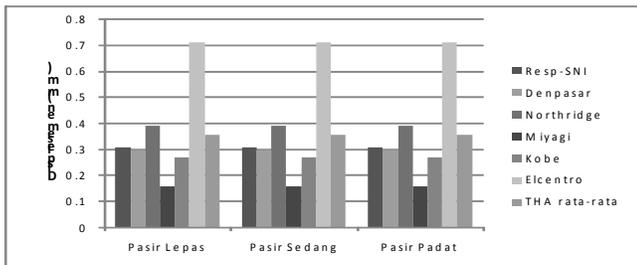
Pada Gambar 7 (c) terlihat nilai displasemen yang terjadi juga di bawah δ_{ijin} atau batas slip, dan memiliki nilai displasemen yang relatif lebih kecil daripada *Retrofitting-1*. Hal ini menunjukkan struktur *Retrofitting-2* lebih kaku. Untuk oprit pasir lepas (desain-1) dan pasir medium (desain-2) menunjukkan perilaku yang hampir sama (tidak ditampilkan). Dimana setelah *Retrofitting*, displasemen yang terjadi di seluruh perletakan jauh di bawah batas slip.

Pada kondisi yang memperhitungkan kekakuan oprit pasir padat, yang biasa digunakan di lapangan (desain-3), besarnya displasemen setelah *Retrofitting* $0,5 \text{ mm}$, jauh lebih kecil dari keadaan tanpa memperhitungkan kekakuan tanah, $3,5 \text{ mm}$ [7], seperti terlihat pada Gambar 8. Nilai dan perilaku yang hampir sama ditunjukkan pada *Retrofitting-2* [11]. Dari perbandingan tersebut terlihat juga nilai displasemen untuk dengan Metode *Time History Analysis* (rata-rata) lebih konservatif daripada Metode Respon Spektrum.



Gambar. 8. Perbandingan displesmen pada pilar barat perletakan barat pada kondisi oprit pasir padat (desain-3): *Retrofitting-1*

Hal menarik dari pemodelan pegas untuk tanah oprit dalam analisis seismik ini adalah: adanya respon yang sama untuk pasir lepas, medium dan padat. Mulai dari displesemen, gaya horizontal, periode dan partisipasi massa, dan tegangan tulangan *link slab* [11]. Ini disebabkan gaya yang timbul pada pegas tanah pasif, dimana kekakuannya 2 kali tanah aktif, besarnya menyesuaikan gaya yang timbul pada tanah aktif. Dari keadaan ini resultan akibat gaya pegas aktif dan pasif selalu nol.



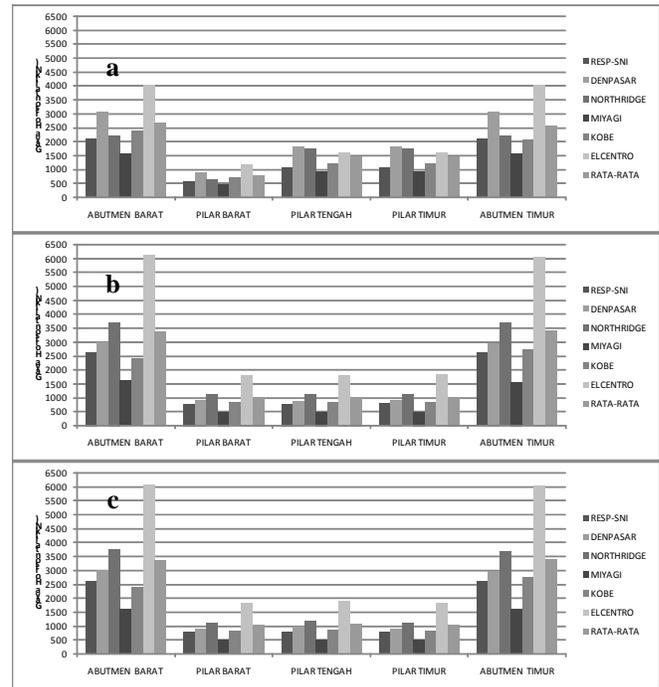
Gambar. 9. Perbandingan displesmen pada pilar barat perletakan barat pada

Gambar 9 merupakan perbandingan nilai displesemen antara ketiga jenis tanah oprit, yang diambil contoh pada pilar barat perletakan barat untuk *Retrofitting-1*. Terlihat bahwa nilai displesemen pada semua jenis tanah oprit menunjukkan angka yang sama, hal ini menunjukkan bahwa respon spektrum ketiga jenis tanah oprit adalah sama dengan alasan yang telah disebut di atas. Perilaku yang hampir sama pada *Retrofitting-2* [11].

Tabel 2.

Perbandingan gaya horizontal pada bangunan bawah, dengan dan tanpa pengaruh oprit (Metode Respon Spektrum)

		Gaya Horizontal (%)				
		Abutm Barat (%)	Pilar Barat (%)	Pilar Tengah (%)	Pilar Timur (%)	Abutm Timur (%)
Oprit Pasir Padat	<i>Retrofitting-1</i>	25,37	32,14	-29,07	-27,24	24,94
	<i>Retrofitting-2</i>	24,84	31,47	-25,88	-28,03	24,42
Tanpa Oprit (Sugihardjo, 2011)	<i>Retrofitting-1</i>	85,71	8,88	-45,45	-59,37	116,67
	<i>Retrofitting-2</i>	80,95	4,44	-36,36	-56,25	111,11



Gambar. 10. Gaya horisontal oprit pasir padat (desain-3): (a) Struktur asli; (b) *Retrofitting-1* ; (c) *Retrofitting-2*

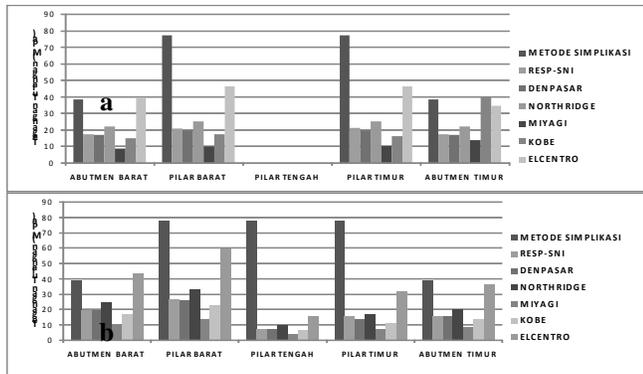
Pada Tabel 2 dan Gambar 10 (tanda negatif merupakan pengurangan gaya) terlihat bahwa penambahan dan pengurangan gaya horisontal pada bangunan bawah lebih merata pada analisis dengan memperhitungkan pengaruh oprit pada ke-2 *Retrofitting*. Penambahan gaya pada abutmen maksimum 25,37% jauh lebih kecil dari analisis tanpa kekakuan tanah oprit, 116,67% dan pengurangan gaya pada pilar maksimum 29,07% jauh lebih kecil dari 59% [7]. Perubahan gaya horisontal pada bangunan bawah pada analisis pasir lepas (desain-1) dan pasir medium (desain-2), besarnya sama seperti pada pasir padat, dengan alasan sama seperti di atas.

Tabel 3

Periode dan partisipasi massa oprit pasir lepas (desain-1)

Ragam	Periode			Partisipasi Massa		
	Struktur Asli (detik)	<i>Retrofitting-1</i> (detik)	<i>Retrofitting-2</i> (detik)	Struktur Asli (detik)	<i>Retrofitting-1</i> (detik)	<i>Retrofitting-2</i> (detik)
1	0.2309	0.20870	0.20767	0.41851	0.00004	0.00005
2	0.22631	0.20267	0.20190	0.41851	0.00278	0.00078
3	0.21008	0.19588	0.19572	0.41851	0.00465	0.00271
4	0.20430	0.19350	0.19291	0.41851	0.00469	0.0153
5	0.19817	0.19091	0.19040	0.41851	0.89578	0.89593
6	0.19545	0.06906	0.06927	0.41851	0.89578	0.89593
7	0.16566	0.06341	0.06332	0.89866	0.89578	0.89593
8	0.06891	0.05584	0.05601	0.89866	0.89578	0.89593
9	0.06311	0.05546	0.04971	0.89866	0.89579	0.89594
10	0.05596	0.04983	0.04219	0.89866	0.89579	0.89594
11	0.05018	0.04208	0.03699	0.89866	0.89579	0.89594
12	0.04845	0.03705	0.03318	0.89866	0.89579	0.89594
13	0.04212	0.03321	0.03292	0.89866	0.89579	0.90917
14	0.03703	0.03280	0.03067	0.89866	0.90911	0.90917
15	0.03330	0.03064	0.02733	0.89866	0.90911	0.90919
16	0.02484	0.02310	0.02302	0.89866	0.90911	0.90919
17	0.02331	0.02227	0.02222	0.89866	0.90911	0.90919
18	0.02254	0.02170	0.02170	0.89866	0.90911	0.90919
19	0.02224	0.02075	0.02073	0.95267	0.95045	0.95412
20	0.02174	0.02070	0.02064	0.95267	0.95438	0.95521
21	0.02102	0.01954	0.01933	0.95267	0.95438	0.95521
22	0.01978	0.01848	0.01563	0.95267	0.95562	0.96243

Terlihat pada Tabel 3 untuk analisis dengan oprit tanah lepas (desain-1), periode struktur yang telah diretrofit lebih kecil daripada struktur aslinya. Hal ini menunjukkan bahwa struktur yang diretrofit menjadi lebih kaku. Sedangkan partisipasi massa telah mencapai 90% pada ragam atau *mode* ke-19. Artinya semua bagian struktur telah berpartisipasi sehingga menghasilkan respon yang valid. Nilai-nilai periode ini lebih



Gambar. 11. Tegangan pada penulangan link slab pada analisis oprit pasir padat (desain-3): (a) *Retrofitting-1*; (b) *Retrofitting-2*

kecil dari analisis tanpa kekakuan tanah oprit [7].

Dari Gambar 11 terlihat tegangan tulangan *link slab* yang terjadi maksimum 19,89% f_y (Metode Simplikasi), masih di bawah nilai maksimum 50% f_y (195 MPa). Pada *Retrofitting-2* terlihat pada pilar tengah tegangan tulangan *link slab* kecil, karena sebagian besar gaya pada pilar tengah terdistribusi ke abutmen. Terlihat juga pada Metode Simplikasi menghasilkan nilai yang jauh konservatif dari 2 metode yang lain, yaitu Respon Spektrum dan Analisis Riwayat Waktu. Hal ini disebabkan adanya penyederhanaan pada Metode Simplikasi, bahwa besarnya tegangan tulangan pada *link slab* sama dengan gaya gempa statik dibagi luas tulangan, tanpa memperhitungkan adanya redistribusi gaya-gaya dalam pada *link slab*. Sedang nilai-nilai tegangan yang terjadi pada Metode Respon Spektrum dan Analisis Riwayat Waktu lebih menunjukkan kesamaan (jika dirata-rata, tidak ditampilkan).

IV. KESIMPULAN

- 1) Pada jembatan tanpa *Retrofitting* dengan analisis memperhitungkan kontribusi kekakuan tanah oprit, dispersemen perletakan melebihi dispersemen ijin perletakan tipe geser. *Retrofitting* dengan *link slab* dengan menyisakan 1 *expansion joint* di tengah panjang jembatan, sudah cukup menghasilkan dispersemen di bawah nilai ijinnya sehingga mencegah balok-balok jembatan terlepas dari perletakannya akibat beban gempa.
- 2) Kontribusi kekakuan tanah oprit cukup signifikan memperkecil dispersemen perletakan jembatan, apabila diasumsikan sebagai bagian dari sistim struktur jembatan.
- 3) Perbedaan jenis tanah oprit menghasilkan respon seismik yang hampir sama, karena nilai kekakuan pegas pasif yang selalu menyesuaikan nilai kekakuan pegas pasif, sehingga tidak ada nilai gaya resultan diantara keduanya.

- 4) Perubahan gaya horisontal pada bangunan bawah lebih kecil dan merata dibandingkan dengan analisis tanpa memperhitungkan kekakuan tanah oprit. Terjadi penambahan gaya pada abutmen sekitar 25% dan pengurangan gaya pada pilar maksimum 27%.
- 5) Penulangan *link slab* desain nonseismik masih aman jika diaplikasikan pada *Retrofitting* jembatan terhadap beban seismik. Tegangan tarik yang terjadi pada tulangan *link slab* akibat beban mati dan gempa hanya maksimum 19,89% f_y , lebih kecil dari persyaratan akibat beban seismik sebesar 50% f_y .
- 6) Pada perhitungan tegangan tulangan link slab, Metode Simplikasi jauh lebih konservatif dibandingkan dengan Metode Respon Spektrum dan Analisa Riwayat Waktu. Karena pada Metode Simplikasi hanya memperhitungkan gaya gempa statik dibagi dengan luas tulangan *link slab*.
- 7) Analisis seismik dengan memperhitungkan kontribusi kekakuan tanah oprit diperlukan untuk mengetahui respon struktur yang lebih mendekati kenyataan dan analisis seismik dengan pembebanan beberapa gempa dengan kandungan frekuensi yang berbeda diperlukan, untuk mengetahui perilaku struktur jembatan pada kondisi yang paling tidak menguntungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saran, S., Reddy, R.K. dan Viladkar, M.N. 1985. Prediction of Displacement of Retaining Wall Under dynamic Conditions, Bull of Indian Soc. Earth Tech., paper no. 239, vol 22, No.3.
- [2] RSNI. 2005. Draf Standar Nasional Indonesia T-02-2005. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- [3] Caner, A and Zia, P. 1998. PCI Journal May-June. *Behavior and design of link slab for jointless bridge decks*: 68-80.
- [4] Qian, S., Michael, D., Lepech, Y. Kim, Y. and Li, V.C. 2009. ACI Structural Journal. *Introduction of Transition Zone Design for Bridge Deck Link slabs Using Ductile Concrete*, 1, V. 106, No. 1, January-February 2009: 96-105.
- [5] Irawan, F. 2010. Studi Penggunaan, Perbaikan dan Metoda Sambungan untuk Jembatan Komposit Menggunakan *Link slab*. Surabaya: Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.
- [6] Sugihardjo, H., Piscesa, B. dan Irawan, F. 2010. Prosiding Kolokium Jalan dan Jembatan: Peningkatan Penerapan Teknologi Jalan dan Jembatan untuk Keselamatan dan Kenyamanan Pengguna Jalan, Bandung 11-12 Mei 2010, ISBN 978-602-8256-16-2. Studi Penggunaan *Link slab* pada Jembatan Komposit.
- [7] Sugihardjo, H. dan Sidharta, A.S. 2011. Kinerja dan Perilaku Seismik Jembatan Balok Komposit Sederhana Bentang Banyak Nirsambungan yang Diretrofit Link Slab. Surabaya: Penelitian Produktif LPPM-ITS No. 0750.155/12.7/PM/2011.
- [8] Caner, A., Dogan, E. and Zia. P. 2002. Journal of Bridge Engineering. *Seismic Performance of Multisimple-Span Bridges Retrofitted with Link slab*, Vol. 7, No. 2: 85-93.
- [9] Diceli, M. and S.M. Albhaisi. 2003. Engineering Structures. *Maximum length of integral bridges supported on steel H-piles driven in sand*, Vol. 25, Oct.: 1491-1504.
- [10] Direktorat Bina Program Jalan. 1993. *Standar Jembatan Komposit*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- [11] Iman, M. F. N. 2012. Studi *Retrofitting* Jembatan Komposit Menggunakan *Link Slab* Akibat Beban Gempa pada Berbagai Kondisi Tanah Oprit. Surabaya: Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.
- [12] Honel. 2011. Elastomeric Bridge Bearing, Honel Structural Products Ltd., Pinetown.
- [13] Kim, Y., Fischer, G. and Li, V.C 2004. ACI Structural Journal. *Performanced of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite*, V.101, No.6. November-December 2004: 792-801.