

Pengaruh *Strength Reduction* Tanah *Clay-Shale* Akibat Pelaksanaan Pemboran Terhadap Nilai Daya Dukung Pondasi Tiang di Jembatan Suramadu Berdasarkan Analisis Hasil Tes OC

Masyhur Irsyam¹⁾
Andhika Sahadewa²⁾
Atyanto Boesono³⁾
Soebagyo⁴⁾

Abstrak

Jembatan Suramadu yang akan menghubungkan kota Surabaya dengan Madura memiliki bentang total sepanjang 5.438 m. Mengingat lokasi pembangunan yang berada di laut dan beban rencana yang besar pada tiang pondasi, maka uji pembebanan statik konvensional tidak mungkin untuk dilakukan di jembatan utama. Alternatif tes pembebanan tiang yang dapat dilakukan adalah Tes OC yang mengikuti prosedur Osterberg Cell Test. Tes ini dilengkapi dengan load cell, telltale, dan strain gauge sehingga dapat diperoleh kurva load-displacement untuk tahanan ujung dan tahanan selimut pada berbagai kedalaman.

Hasil penyelidikan tanah menunjukkan keberadaan lapisan tanah clay-shale yang mengandung montmorillonite pada lokasi tiang bor. Jenis tanah ini sensitif terhadap berkurangnya tegangan lateral akibat pemboran dan terhadap weathering process sehingga dapat terjadi strength reduction. Strength reduction tanah menyulitkan prediksi tahanan ujung dan tahanan selimut pondasi tiang bor.

Hasil Tes OC digunakan sebagai acuan dalam menentukan pengaruh strength reduction terhadap tahanan ujung dan tahanan selimut dengan cara membandingkan hasil pengukuran dengan hasil prediksi berdasarkan korelasi empiris yang umum dipakai. Untuk tahanan ujung, hasil Tes OC menunjukkan harga yang relatif dekat dengan hasil prediksi sehingga strength reduction untuk tahanan ujung akibat pemboran relatif kecil selama kondisi dasar pondasi bersih. Sedangkan untuk tahanan selimut, hasil pengukuran nilainya jauh lebih kecil dibanding hasil prediksi.

Untuk meningkatkan daya dukung, maka dilakukan grouting melalui ujung tiang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah dilakukan grouting pada pondasi terjadi kenaikan nilai tahanan ujung dan tahanan selimut. Dibandingkan dengan tahanan ujung, tahanan selimut memiliki peningkatan kekuatan yang lebih besar dan setelah dilakukan grouting nilainya mendekati nilai prediksi.

Kata-kata Kunci: Osterberg cell test, pondasi tiang bor, tahanan ujung, tahanan selimut, clay-shale, strength reduction, grouting.

Abstract

Suramadu Bridge, which will connect Surabaya and Madura, is designed to have 5,438 m total span. Considering bridge construction that is above sea and huge design load on its pile foundations, conventional static loading test can not be performed at the main bridge. Alternative pile load test that can be performed is OC Test, which followed Osterberg Cell Test procedure. Equipped with load cell, telltale, and strain gauge, this test can provide load-displacement curve of end bearing and skin friction at any depth.

Soil investigation result shows existence of clay-shale layer, which contains montmorillonite, at bore pile's location. This soil is sensitive to lateral pressure reduction caused by boring and weathering process so that

-
1. Tim Pakar Proyek Pembangunan Jembatan Suramadu, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
 2. Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
 3. Kepala Satuan Kerja Sementara Pembangunan Jembatan Suramadu Bentang Utama.
 4. Kepala Sub. Bidang Perencanaan dan Pengawasan Balai Besar Pelaksana Jalan Nasional Wilayah V.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada 26 Maret 2007 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 12 April 2007 - 4 Mei 2007. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 7 Mei 2007 hingga 28 Mei 2007.

strength reduction can occur. Strength reduction of soil makes end bearing and skin friction difficult to be predicted.

Strength reduction effect toward end bearing and skin friction are determined by means of comparing OC Test result to prediction result based on common empirical correlation. For end bearing, OC Test result shows value that close to prediction result's. Therefore, strength reduction of end bearing caused by boring is relative small. On the other hand, skin friction measurement result shows that its value is much smaller than prediction result's.

For increasing bearing capacity, grouting through the pile base was conducted. Test result shows increasing of value either end bearing and skin friction after grouting through the pile base. Compared to end bearing's value, skin friction's value rise more and close to prediction value.

Keywords: Osterberg Cell Test, Bor pile, end bearing, skin friction, clay-shale, strength reduction, grouting.

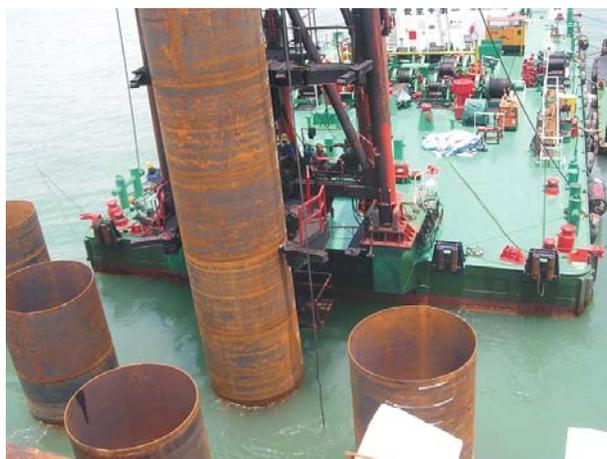
1. Pendahuluan

Jembatan Suramadu merupakan jembatan yang direncanakan menjadi salah satu simpul dalam pengembangan jaringan jalan antara Surabaya dan Madura. Sampai saat ini, jembatan tersebut merupakan jembatan terpanjang di atas laut yang ada di Indonesia. Jembatan dengan bentang total 5.438 m ini terdiri atas beberapa bagian, yaitu *causeway*, jembatan pendekat (*approach bridge*), dan jembatan utama (*main bridge*) berupa *cable stayed bridge*. Pengerjaan pondasi *cable stayed bridge* sepanjang 818 m dilakukan oleh Consortium of Chinese Contractors (CCC). Pelaksanaan pekerjaan pondasi dimulai dengan pemancangan *steel casing* berdiameter 2,7 m yang kemudian digunakan sebagai kaki *platform* lahan kerja (**Gambar 1**). Pelaksanaan pekerjaan pondasi tiang untuk jembatan utama dapat dilihat dalam **Gambar 2**.

Pelaksanaan konstruksi jembatan utama yang dilakukan di atas laut dan kondisi tanah yang khusus memunculkan banyak tantangan geoteknik. Salah satu tantangan yang ada adalah keterbatasan lahan kerja, khususnya dalam pelaksanaan pekerjaan pondasi tiang

untuk *pylon* pada jembatan utama dan pier jembatan pendekat. Akibat keterbatasan area yang tersedia dan beban rencana pondasi yang besar maka uji pembebanan statik tiang konvensional seperti *kentledge system* tidak mungkin untuk dilakukan. Untuk itu dipilih Tes OC untuk pondasi tiang pada jembatan utama dan jembatan pendekat. Adapun pemasangan instrumentasi dan pelaksanaan tes dilakukan oleh College of Civil Engineering, Southeast University, China sesuai prosedur Osterberg Cell Test (Osterberg dan Pepper, 1984).

Masalah geoteknik lainnya yang dihadapi adalah dijumpainya material *clay-shale* seperti yang diperlihatkan dalam **Gambar 3**. Tanah ini sensitif terhadap pengurangan tegangan lateral dan eksposur yang mengakibatkan terjadinya *strength reduction* pada tanah. Oleh karena itu, variasi hasil prediksi teoretis daya dukung pondasi bisa cukup besar dibandingkan dengan hasil Tes OC. Selanjutnya, makalah ini menyajikan tentang prediksi, hasil pengujian dan analisis, serta rekomendasi pengambilan parameter tanah untuk pondasi tiang bor pada tanah *clay-shale*.



Gambar 1. Pemancangan steel casing yang digunakan sebagai kaki platform di lokasi jembatan utama



Gambar 2. Pelaksanaan pekerjaan pondasi tiang untuk jembatan utama



Gambar 3. Material *clay-shale* yang menempel pada mata bor

2. Kondisi Tanah

Kondisi tanah pada lokasi Jembatan Suramadu cukup bervariasi karena bentangnya yang panjang. Namun demikian, pembahasan pada makalah ini difokuskan pada lokasi pondasi untuk *pylon* pada jembatan utama, yaitu pada pier P46 dan P47 yang diwakili oleh tiang bor P46-19 dan P47-31 (Gambar 4). Profil tanah dan nilai N-SPT pada lokasi tersebut dapat dilihat dalam Gambar 5. Untuk P46, dasar laut terletak pada kedalaman 20 m dan dari permukaan tanah dijumpai lapisan pasir setebal 30 m. Di bawah lapisan pasir ini sampai kedalaman 90 m dari dasar laut terdapat lapisan *clay-shale* yang deskripsikan sebagai lanau kelempungan atau lempung kelanauan. Sedangkan untuk P47, dasar laut terdapat pada kedalaman 15 m. Selanjutnya, terdapat lapisan lanau dan lempung

kepasiran sampai kedalaman 23 m. Kedalaman berikutnya sampai 100 m dari dasar laut ditemui lapisan *clay-shale*.

3. Daya Dukung Tiang Bor

Pelaksanaan pembuatan pondasi tiang di jembatan utama dilakukan dengan pembooran metode *Reverse Circulation Drill (RCD)* yang menggunakan *slurry mud*. Oleh karena itu, prediksi kapasitas aksial didasarkan pada daya dukung tiang bor. Daya dukung ultimit pondasi tiang merupakan penjumlahan tahanan ujung dan tahanan geser selimut tiang. Hal tersebut dapat diekspresikan dalam persamaan berikut (Meyerhof, 1976; Vesic, 1977):

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (1)$$

dimana Q_u adalah daya dukung tiang ultimit, Q_p adalah tahanan ujung, dan Q_s adalah tahanan selimut.

3.1 Tahanan ujung

Secara umum, tahanan ujung pondasi tiang bor dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut (Vesic, 1977):

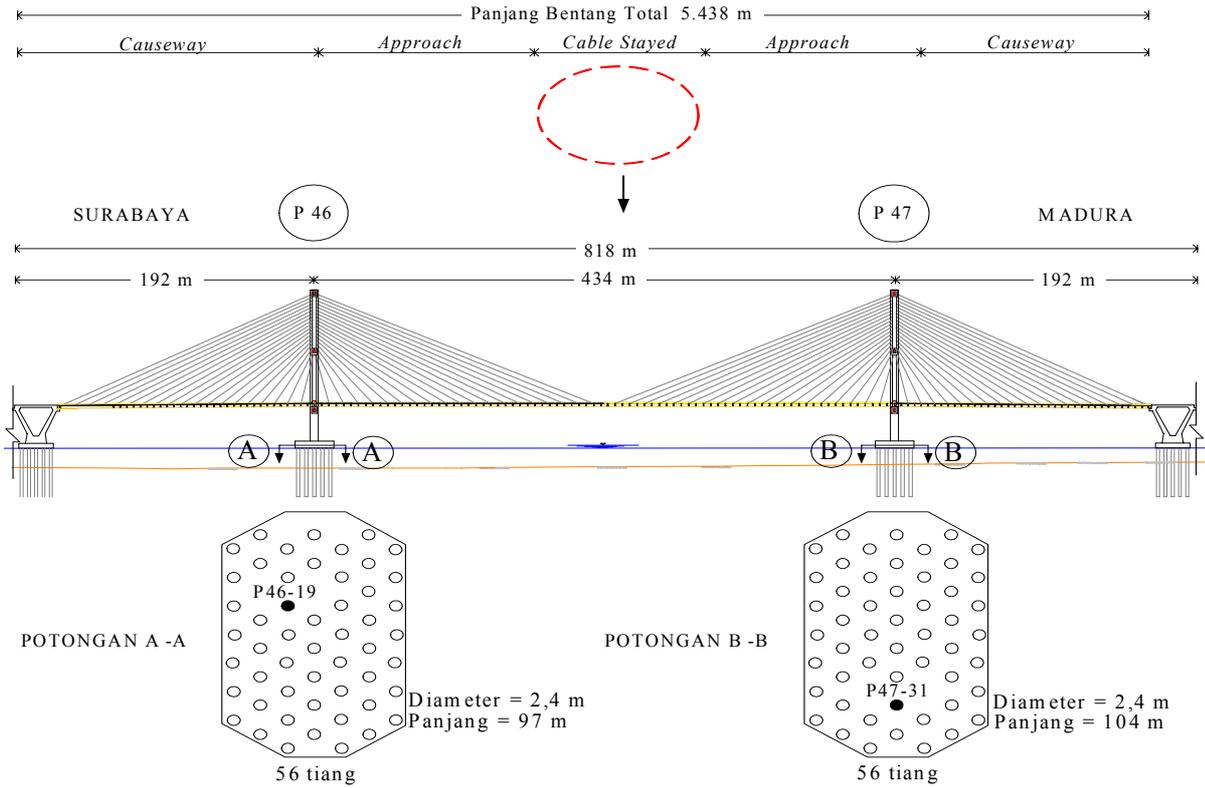
$$Q_p = A_p (cN_c^* + q'N_q^*) \quad (2)$$

dimana A_p adalah luas penampang ujung tiang, c merupakan kohesi tanah pada bagian ujung tiang, q' adalah tegangan vertikal efektif pada daerah ujung tiang, dan N_c^* dan N_q^* merupakan faktor daya dukung pondasi dalam (Meyerhof, 1976; Vesic, 1977).

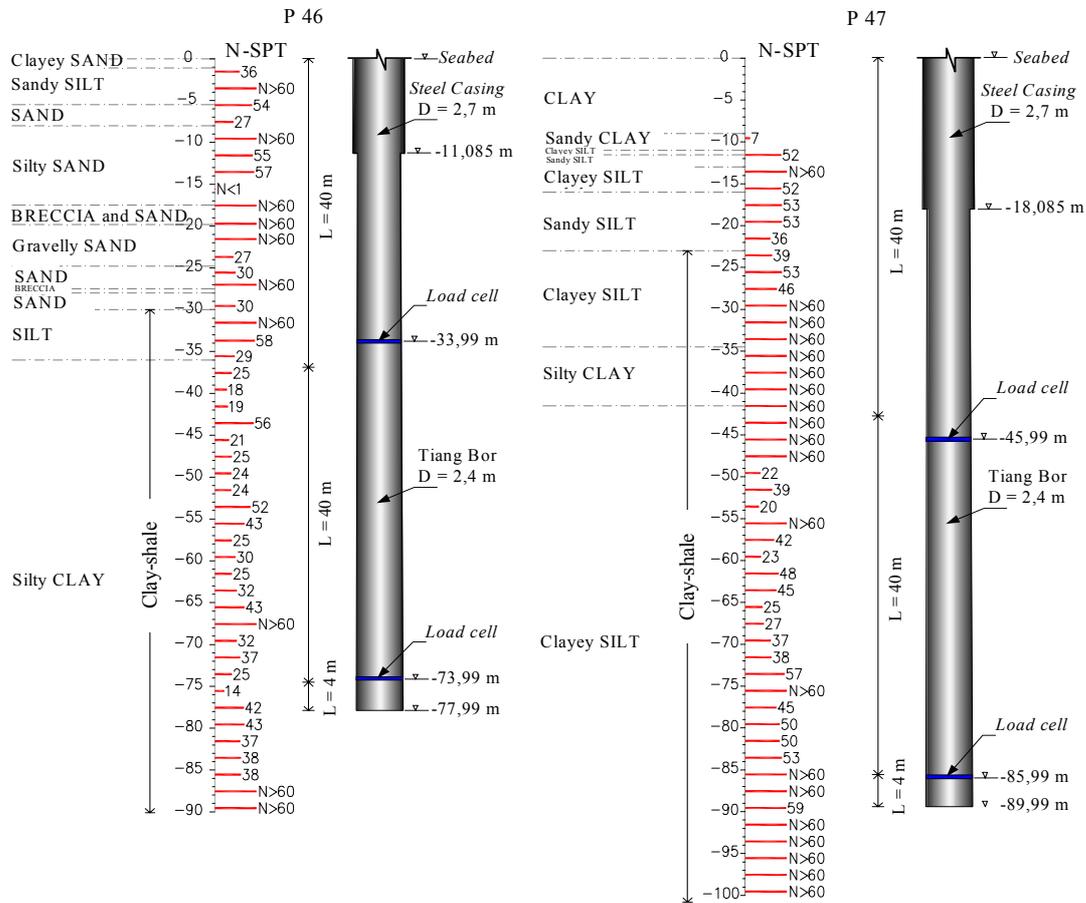
Karena ujung tiang bor berada pada lapisan tanah kohesif sehingga tahanan ujung tiang dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Skempton, 1951).

$$Q_p = 9 \cdot c_u \cdot A_p \quad (3)$$

Pengaruh Strength Reduction Tanah Clay-Shale Akibat Pelaksanaan Pemboran...



Gambar 4. Potongan memanjang jembatan dan konfigurasi pondasi tiang untuk jembatan utama



Gambar 5. Profil tanah, nilai N-SPT, dan lokasi load cell pada tiang P46-19 dan P47-31

3.2 Tahanan selimut

Tahanan selimut tiang ultimit dari tiang bor pada tanah kohesif dan non-kohesif diperoleh dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$Q_s = Q_{sc} + Q_{s\phi} \quad (4)$$

dimana Q_{sc} merupakan kontribusi dari kohesi tanah, c , pada tanah kohesif, dan $Q_{s\phi}$ kontribusi dari sudut geser dalam tanah, ϕ , pada tanah non-kohesif.

3.2.1 Tahanan selimut tiang bor pada tanah kohesif

Kontribusi kohesi tanah untuk tahanan selimut tiang ultimit dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut (Tomlinson, 1970):

$$Q_{sc} = \sum \tau_i \cdot p \cdot l_i \quad (5)$$

$$\tau_i = \alpha \cdot c_{u-i} \quad (6)$$

dimana α merupakan faktor adhesi, c_{u-i} adalah kuat geser tanah *undrained*, p adalah keliling tiang, dan l_i merupakan panjang tiang pada lapisan ke- i .

Nilai c_u , pada **Persamaan (6)**, umumnya ditentukan berdasarkan korelasi empiris terhadap nilai N-SPT yang diajukan oleh Terzaghi dan Peck (1967), yaitu:

$$c_u = 6,55N \text{ kP(a)} \quad (7)$$

Sedangkan nilai α dapat diperoleh menggunakan nilai yang diusulkan oleh beberapa peneliti di bawah ini:

Reese & Wright (1977)

Menurut Reese & Wright (1977), nilai α adalah 0,5 dan tidak bergantung pada nilai c_u .

Reese & O'Neill (1988)

Reese&O'Neill (1988) mengajukan nilai a berdasarkan nilai c_u . Hubungan antara nilai a dengan nilai c_u dapat dilihat dalam able berikut:

Kulhawy (1977)

Kulhawy (1977) mengusulkan nilai a yang bergantung pada nilai c_u sebagaimana terlihat dalam **Gambar 6**.

3.2.2 Tahanan geser selimut tiang bor pada tanah non-kohesif

Kontribusi dari sudut geser dalam, ϕ , untuk perhitungan tahanan selimut dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut (Meyerhof, 1976):

$$Q_{s\phi} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot p \cdot l_i \quad (8)$$

$$f_i = K_{0-i} \cdot \sigma'_{v-i} \cdot \tan \delta_i \quad (9)$$

dimana K_{0-i} adalah koefisien tekanan tanah lateral ($K_{0-i} = 1 - \sin \phi$), σ'_{v-i} merupakan tegangan vertikal efektif, ϕ_i adalah sudut geser, δ_i adalah sudut geser friksi efektif antara tanah dengan pondasi pada lapisan i .

Penentuan tahanan geser selimut tiang umumnya dilakukan berdasarkan korelasi empiris antara tegangan geser selimut tiang dengan nilai N-SPT. Beberapa korelasi empiris tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2**.

4. Estimasi Nilai Kuat Geser Tanah (C_u) Berdasarkan N-Spt untuk Perhitungan Tahanan Ujung dan Tahanan Selimut

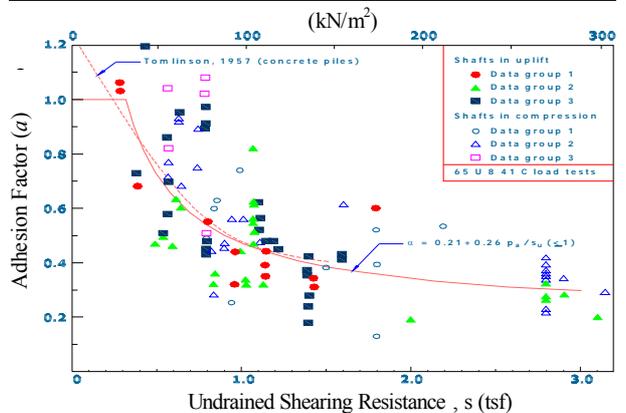
Pada bagian ini dijelaskan mengenai estimasi nilai kuat geser tanah untuk perhitungan tahanan ujung dan tahanan selimut berdasarkan berbagai korelasi empiris yang ada.

4.1 Estimasi nilai kuat geser tanah (c_u) berdasarkan N-SPT untuk penentuan tahanan ujung tiang bor

Pola keruntuhan pondasi dalam menurut Meyerhof (1976) menunjukkan bahwa daerah keruntuhan

Tabel 1. Faktor adhesi berdasarkan nilai parameter kuat geser tanah c_u (Reese & O'Neill, 1988)

Undrained Shear Strength (c_u)	Nilai α
< 2	0,55
2 – 3	0,49
3 – 4	0,42
4 – 5	0,38
5 – 6	0,35
6 – 7	0,33
7 – 8	0,32
8 – 9	0,31
>9	Dianggap sebagai batu



Gambar 6. Hubungan able adhesi dengan parameter kuat geser tanah untuk pondasi bor (Kulhawy, 1984)

Tabel 2. Metoda untuk menentukan tegangan geser selimut tiang (τ) pada lapisan tanah non-kohefif (Ooi et. Al., 1991)

Reference	Description
Touma dan Reese (1974)	$\tau = K\sigma'_v \tan\phi' < 2,5 \text{tsf} (= 27,5 \text{ t/m}^2)$ $K=0,7$ for $D_b \leq 25$ ft $K=0,6$ for $25 \text{ ft} \leq D_b \leq 40$ ft $K=0,5$ for $D_b > 40$ ft
Meyerhof (1976)	$\tau(\text{tsf}) = \frac{N}{100} = 0,11(\text{t/m}^2)$
Quiros and Reese (1977)	$\tau(\text{tsf}) = 0,026N < 2 \text{tsf} = 0,28N(\text{t/m}^2)$
Reese and Wright (1977)	$\tau(\text{tsf}) = \frac{N}{34} = 0,32N(\text{t/m}^2) \quad N < 53$
	$\tau(\text{tsf}) = \frac{N - 53}{450} + 1,6$ for $53 < N \leq 100$
Reese and O'neill (1988)	$\tau(\text{tsf}) = \beta\sigma'_v \leq 2 \text{tsf}$ for $0,25 \leq \beta \leq 12$ Dimana $\beta = 1,5 - 0,135\sqrt{z}$

dimana σ'_v merupakan tegangan vertikal efektif, ϕ' merupakan sudut geser tanah, K adalah faktor transfer beban, sedangkan β adalah koefisien transfer beban.

mencakup daerah seluas dari 4D di bawah ujung tiang hingga 10D di atas ujung tiang dan selebar 8D dari pusat tiang, dimana D adalah diameter tiang. Adanya pemboran mengakibatkan gangguan yang diikuti dengan *strength reduction* tanah. Namun, diperkirakan daerah yang terganggu dan mengalami *strength reduction* ini hanya di sekitar lubang bor dan areanya relatif kecil dibandingkan area keruntuhan secara keseluruhan sesuai Meyerhof. Berdasarkan pertimbangan tersebut, digunakan korelasi c_u dengan N-SPT menurut Terzaghi dan Peck (1967) untuk tanah lempung sesuai **Persamaan (7)**, yaitu nilai c_u adalah 6,5N (kPa).

Dengan demikian, tahanan ujung tiang bor P46-19 dan P47-31 dapat diprediksi menggunakan data tanah pada **Gambar 5** dan mengasumsikan nilai c_u sebesar 6,5N (kPa). Perhitungan tahanan ujung P46-19 dilakukan dengan mengambil nilai N-SPT rata-rata sebesar 32 dan dengan menggunakan **Persamaan (3)** sehingga diperoleh Q_p sebesar 868 ton. Sedangkan tahanan ujung P47-31 dihitung menggunakan nilai N-SPT rata-rata sebesar 40 sehingga didapatkan Q_p sebesar 1085 ton.

4.2 Estimasi nilai kuat geser tanah (c_u) berdasarkan N-SPT untuk penentuan tahanan selimut tiang bor

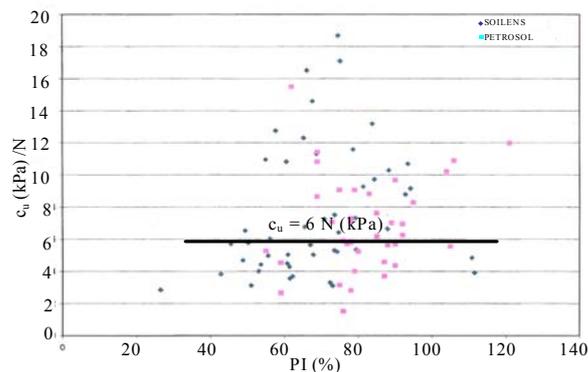
Pemboran mengakibatkan berkurangnya tegangan lateral yang diikuti dengan keretakan massa tanah dan *strength reduction* di sekitar lubang bor. Keretakan massa tanah disekitar lubang bor ini berakibat kepada pengurangan tegangan geser selimut yang nilainya bisa signifikan mengingat zona geser (*shear zone*) lebih terlokalisir disekitar lubang bor. Semakin lama pelaksanaan pemboran dan exposure, akan semakin besar reduksi tegangan geser selimutnya. Oleh karena itu, pemilihan korelasi antara nilai c_u dengan N-SPT harus dilakukan secara cermat. Dalam hal ini, penentuan korelasi tersebut dilakukan menggunakan hasil tes laboratorium dan korelasi yang telah diajukan oleh beberapa peneliti lainnya yang telah memperhitungkan adanya *strength reduction*.

Hasil tes laboratorium dari sampel tanah di lokasi jembatan diperlihatkan dalam **Gambar 7** yang memberikan korelasi antara rasio c_u dengan N-SPT terhadap nilai indeks plastisitas. Hasil tes tersebut

memberikan korelasi c_u sebesar 6N (kPa). Stroud (1974) juga mengajukan korelasi antara c_u dengan N-SPT untuk tanah lempung dengan berbagai nilai indeks plastisitas (**Gambar 8**). Berdasarkan usulan Stroud (1974), nilai korelasi c_u sebesar 4N (kPa) dipilih sesuai dengan nilai indeks plastisitas tanah di lokasi jembatan. Aurora *et al* (1977), untuk tanah *clay-shale*, mengusulkan korelasi c_u sebesar 2N (kPa). Sedangkan, Irsyam dan Kartawiria (2005), untuk pelaksanaan pekerjaan pondasi pada tanah *clay-shale* di Jembatan Ciujung dengan *dry boring* dan waktu pelaksanaan pekerjaan pondasi yang tidak lebih dari 2 jam untuk meminimalkan *strength reduction*, memperoleh nilai korelasi c_u sebesar 4N (kPa). Berdasarkan beberapa korelasi yang telah disebutkan, dipilih nilai korelasi c_u adalah sebesar 4N (kPa) untuk digunakan sebagai estimasi awal.

Penentuan tegangan geser selimut, τ , untuk *clay-shale* dilakukan dengan mengambil nilai a pada **Persamaan (6)** sebesar 0,375 sesuai **Gambar 6**. Oleh karena itu, berdasarkan **Persamaan (6)**, diperoleh nilai prediksi τ sebesar 1,50N.

Penentuan nilai tegangan geser selimut τ untuk tanah pasir ditentukan menggunakan **Tabel 2**. Tabel tersebut

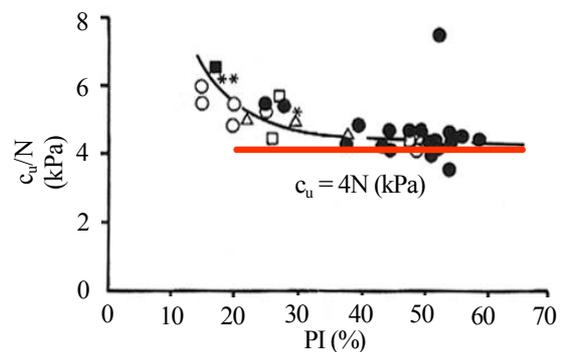


Gambar 7. Hubungan rasio kuat geser dengan nilai N-SPT terhadap nilai indeks plastisitas untuk able tanah di lokasi Jembatan Suramadu

memperlihatkan bahwa nilai τ berkisar antara 0,11N hingga 0,32N (ton/m^2). Dengan demikian, untuk kasus ini diambil nilai rata-rata τ adalah sebesar 0,23N (ton/m^2) atau 2,3N (kPa).

4.3 Pelaksanaan Tes Oc

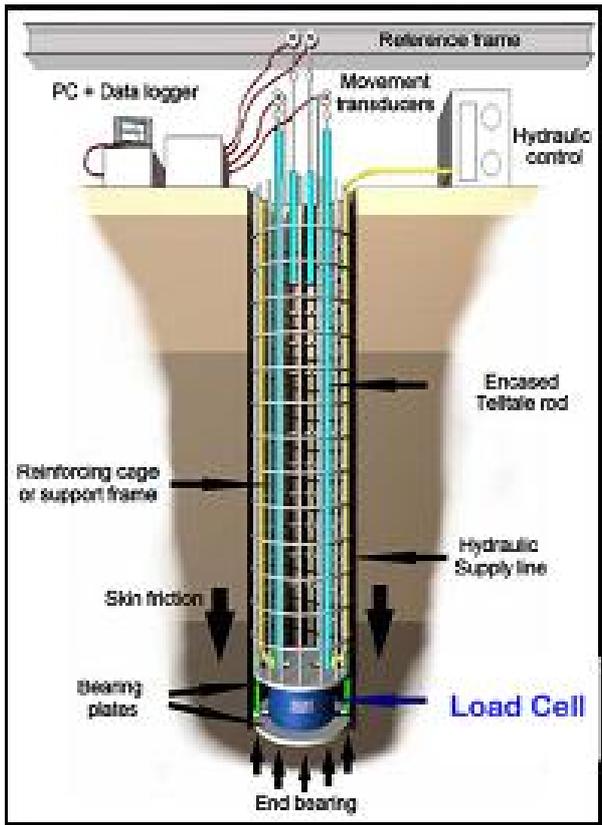
Pada umumnya, Tes OC membutuhkan beberapa peralatan utama, yaitu *load cell* (**Gambar 9**) dan *telltale* yang dihubungkan *electronic displacement transducer*. *Load cell* merupakan peralatan hidrolik untuk menghasilkan beban (**Gambar 10**). Sedangkan *telltale* berfungsi untuk melakukan pencatatan perpindahan pada *load cell* dan *strain gauge* untuk mengukur distribusi gaya tekan sepanjang tiang (**Gambar 11**). Selain kedua peralatan tersebut, tes ini juga dapat dilengkapi dengan pipa untuk melakukan *Sonic Logging Test* maupun *grouting* (**Gambar 11**). *Sonic Logging Test* merupakan pengujian yang digunakan untuk mengetahui kualitas material beton dari tiang. **Gambar 12** menunjukkan pipa yang digunakan untuk pengujian *Sonic Logging* yang ujung bawahnya dilubangi sehingga juga dapat digunakan untuk pelaksanaan *grouting*.



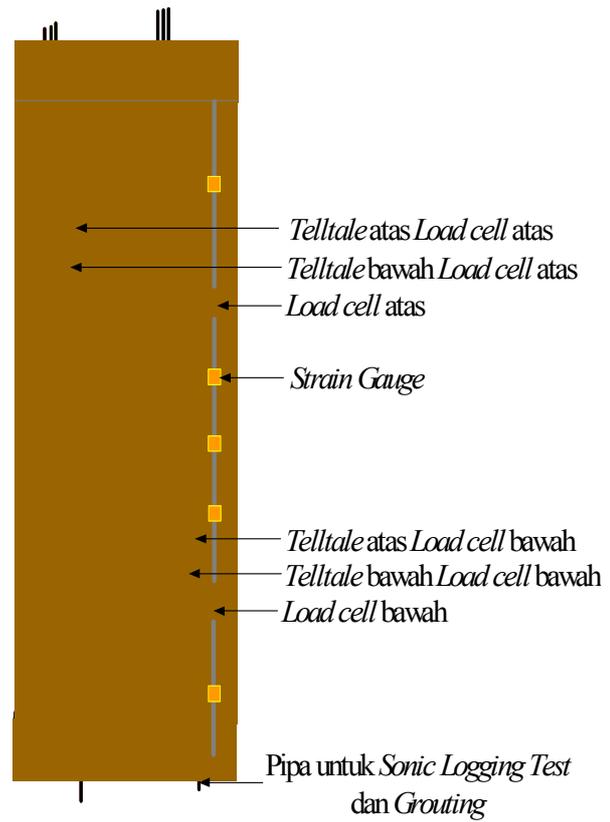
Gambar 8. Hubungan rasio kuat geser tanah dengan nilai N-SPT terhadap nilai indeks plastisitas (Stroud, 1974)



Gambar 9. Load cell yang dipasang pada reinforcement cage



Gambar 10. Tipikal instrumentasi Tes OC (Loadtest, 2005)



Gambar 11. Load Cell, Telltale, Strain Gauge, serta Pipa untuk Sonic Logging Test dan Grouting



Gambar 12. Pipa grouting dan pelaksanaan Sonic Logging Test

Pelaksanaan Tes OC pada Jembatan Suramadu dilaksanakan sebanyak dua kali untuk setiap tiang yang diuji, yaitu sebelum dan sesudah dilakukan *grouting*. Dengan demikian, dapat diketahui efek *grouting* terhadap daya dukung tiang P46-19 dan P47-31. Dalam hal ini, *grouting* diperlukan sebagai antisipasi terhadap terjadinya *strength reduction* pada material *clay-shale* dan antisipasi apabila dasar pondasi tidak bersih. Terlebih lagi, hasil tes ablelogy menunjukkan bahwa tanah pada lokasi Jembatan Suramadu mengandung mineral montmorillonite. Keberadaan material tersebut menambah sensitifitas dari *clay-shale*.

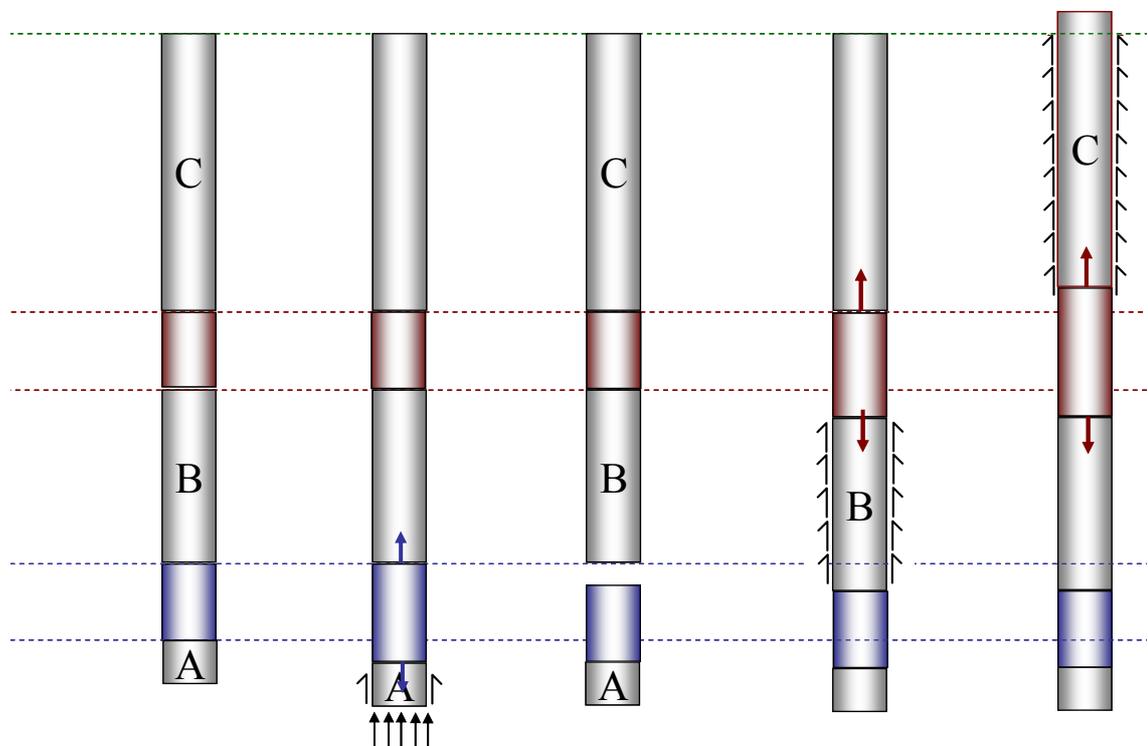
Untuk mengetahui distribusi tahanan ujung dan tahanan selimut sepanjang tiang maka dengan dua buah *load cell* tiang dibagi menjadi tiga segmen, yaitu segmen A, B, dan C (**Gambar 13**). Tahanan tiang segmen A cenderung menggambarkan tahanan ujung tiang. Sedangkan tahanan tiang segmen B dan C menggambarkan tahanan selimut tiang untuk kedalaman yang berbeda.

Pembebanan dalam Tes OC dilakukan secara bertahap dimana dalam setiap tingkat pembebanan dilakukan pencatatan perpindahan dan tegangan yang terjadi. Secara umum, tes dilakukan dengan melakukan pembebanan menggunakan *lower load cell* terlebih

dahulu. Selanjutnya, jika telah dicapai pembebanan maksimal atau terjadi perpindahan yang besar akibat beban dari *lower load cell* maka dilakukan *unloading* pada *lower load cell* dan dilanjutkan dengan pembebanan menggunakan *upper load cell*. Pemasaan *reinforcement cage* dan pelaksanaan Tes OC, secara berturut-turut, dapat dilihat pada **Gambar 14** dan **Gambar 15**.



Gambar 14. Pemasangan *reinforcement cage* pada jembatan utama



Gambar 13. Mekanisme Tes OC pada Jembatan Suramadu

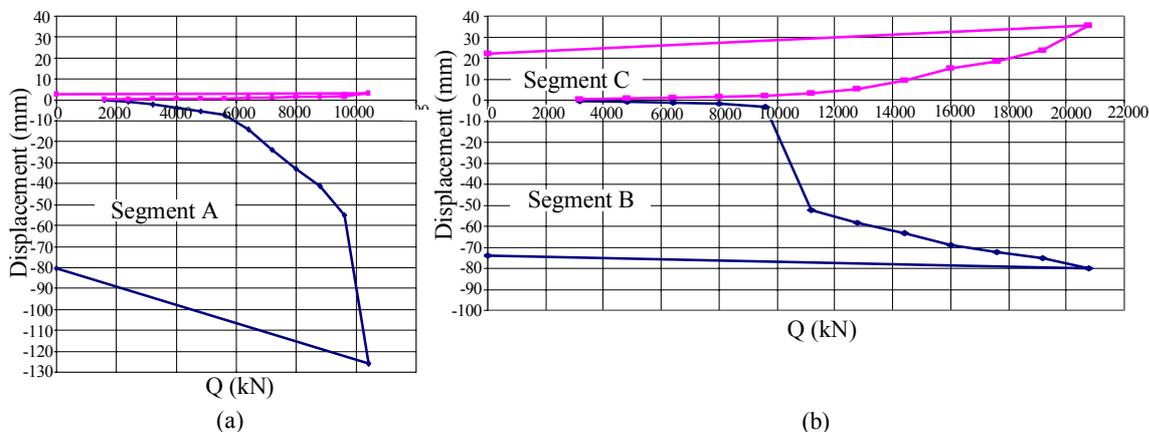


Gambar 15. Proses pelaksanaan Tes OC pada pondasi Jembatan Suramadu

5. Hasil dan Analisis Tes OC

5.1.1 Load-displacement dari load cell

Hasil pencatatan *telltale* dan pengukuran beban pada *load cell* dapat digunakan untuk memperoleh grafik *load-displacement* pada tiang P46-19 dan P47-31. Dalam kasus ini, untuk setiap tiang, didapatkan dua grafik *load-displacement* yang masing-masing berasal dari pembebanan oleh *lower load cell* dan *upper load cell*. Grafik *load-displacement* akibat pembebanan *lower load cell* mencerminkan tahanan ujung tiang. Sedangkan grafik *load-displacement* akibat pembebanan *upper load cell* dapat digunakan untuk mengetahui tahanan selimut tiang. Grafik *load-displacement* untuk tiang P47-31 diperlihatkan dalam Gambar 16. Sedangkan hasil skema pembebanan Tes OC sebelum dilakukan *grouting* pada P47-31 diilustrasikan pada Gambar 17.



Gambar 16. Load-displacement P47-31 sebelum dilakukan *grouting*: lower load cell (a) upper load cell (b)

5.1.2 Distribusi tegangan geser selimut τ

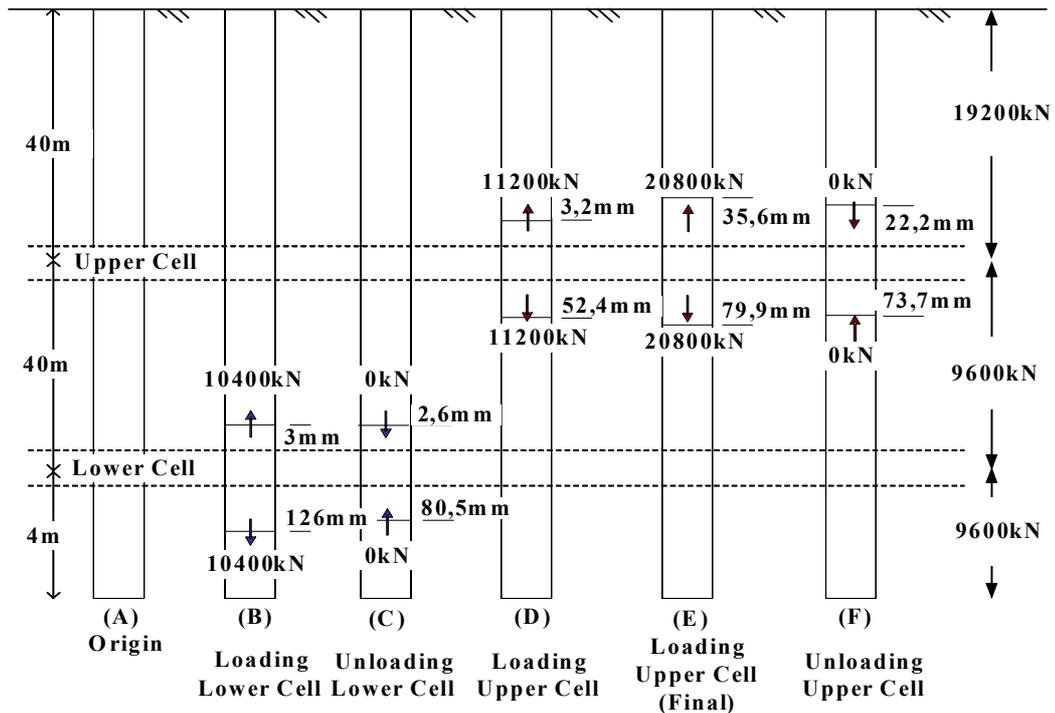
Distribusi tegangan geser selimut tiang pada berbagai kedalaman dapat diperoleh berdasarkan data dari pencatatan *strain gauge*. Distribusi tegangan geser selimut tiang pada berbagai kedalaman untuk tiang P46-19 dan P47-31 diperlihatkan dalam Gambar 18:

5.1.3 Perbandingan antara prediksi dengan hasil pengukuran untuk tahanan ujung tiang

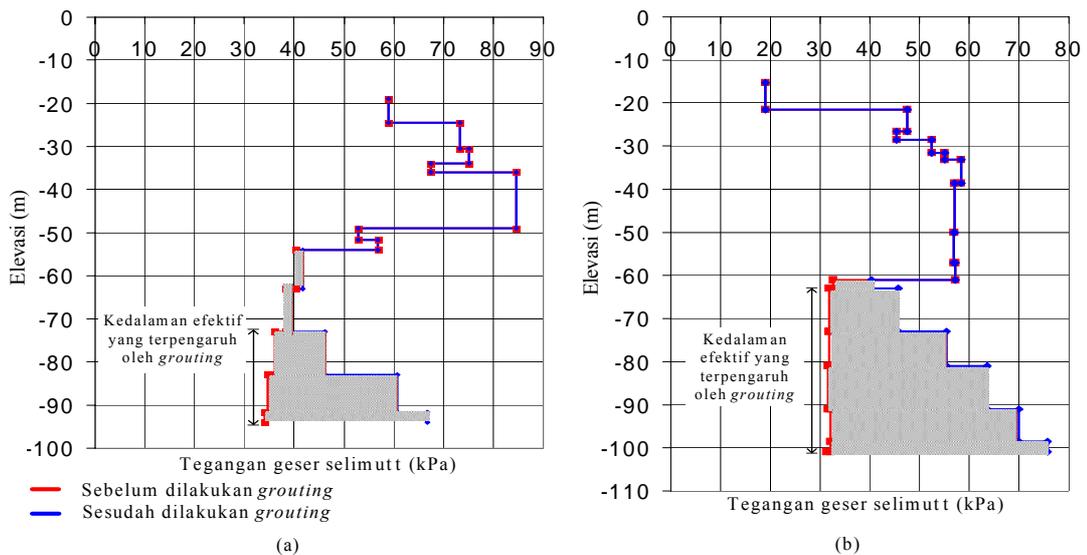
Tahanan ujung tiang hasil Tes OC dapat digunakan sebagai verifikasi terhadap nilai prediksi. Besarnya tahanan ujung tiang hasil Tes OC untuk tiang P47-31 diperoleh berdasarkan grafik *load-displacement* akibat pembebanan *lower load cell* sesuai dengan Gambar 16(a). Perbandingan nilai tahanan ujung tiang dari hasil Tes OC dan nilai prediksi untuk kedua tiang tersebut dapat dilihat pada Table 3.

Tabel 3. Perbandingan nilai tahanan ujung tiang

Sumber		P_{end} (ton) P 46-19	P_{end} (ton) P47-31
Apa Nilai prediksi		868	1085
Hasil Tes OC	Sebelum dilakukan <i>grouting</i>	980	900
	Sesudah dilakukan <i>grouting</i>	1380	1200



Gambar 17. Hasil skema pembebanan Tes OC sebelum dilakukan *grouting* pada tiang P47-31



Gambar 18. Distribusi tegangan geser selimut τ terhadap kedalaman:
(a) tiang P46-19 dan (b) tiang P47-31

Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai tahanan ujung tiang hasil Tes OC cukup dekat dengan nilai prediksinya, terutama untuk P47-31. Hal ini mengindikasikan bahwa pekerjaan tiang bor sudah dilaksanakan secara baik dan kondisi ujung tiang bersih.

5.1.4 Korelasi empiris antara tegangan geser selimut τ dengan Nilai N-SPT berdasarkan hasil tes OC

Secara umum, nilai total tahanan selimut tiang dapat diperoleh dari grafik *load--displacement* saat pembebanan *upper load cell* sesuai dengan **Gambar 16(b)**. Selanjutnya, korelasi antara τ dengan nilai N-SPT dari Tes OC dapat diturunkan dengan menggunakan grafik distribusi tegangan geser selimut τ untuk berbagai kedalaman (**Gambar 18**) serta dengan profil dan nilai N-SPT tanah. Dengan demikian, dapat diperoleh nilai korelasi τ dengan nilai N-SPT untuk kondisi sebelum maupun sesudah dilakukan *grouting*.

Korelasi antara τ dengan nilai N-SPT pada berbagai kedalaman P46-19 dan P47-31, secara berturut-turut, dapat dilihat dalam **Tabel 4** dan **Tabel 5**. Dapat dilihat dalam kedua tabel tersebut bahwa nilai τ/N dari hasil Tes OC sesudah dilakukan *grouting* relatif dekat dengan nilai τ/N prediksi awal. Dalam kasus ini, *grouting* mengisi retakan dan celah-celah pada material tanah yang terganggu akibat pemboran sehingga keadaan tanah tersebut dapat kembali mendekati kondisi awalnya.

5.2 Harga tegangan geser selimut τ yang diusulkan untuk tiang bor pada tanah *clay-shale*

Pada dasarnya, prediksi τ sebesar 1,50 (kPa) untuk tiang bor pada tanah *clay-shale* masih kurang sesuai dibandingkan hasil pengujian di lapangan. Tes OC menghasilkan nilai korelasi yang lebih rendah daripada nilai prediksi tersebut (**Tabel 4** dan **Tabel 5**) akibat terjadinya *strength reduction* dan eksposure yang cukup signifikan pada *clay-shale*. Sehubungan dengan hal tersebut, untuk material *clay-shale* penulis mengajukan nilai τ yang berkisar antara 0,75 N hingga 1,00 N (kPa) bila tidak dilakukan perbaikan tanah.

Irsyam dan Kartawiria (2005), berdasarkan data uji pembebanan pondasi pada Jembatan Ciujung yang juga berada pada tanah *clay-shale* mendapatkan nilai τ yang besarnya sekitar 1,60 N (kPa). Nilai korelasi yang lebih tinggi ini dikarenakan pelaksanaan pekerjaan pondasi tiang bor, pada Jembatan Ciujung dilakukan dalam waktu yang jauh lebih singkat, yaitu hanya dalam waktu 2 jam sejak dari awal pengeboran dengan metode *dry boring* hingga akhir pengecoran beton. Sedangkan untuk Jembatan Utama Suramadu membutuhkan waktu sepanjang 5 hari sehingga lama durasi material *clay-shale* terekspose juga mempengaruhi *strength reduction* yang terjadi.

Bila dilakukan perbaikan tanah dengan menggunakan *grouting*, penulis mengajukan nilai τ sebesar 1,42N (kPa). Dengan demikian, menggunakan nilai α pada **Persamaan (6)** sebesar 0,375 diperoleh nilai c_u yang

Tabel 5. Korelasi τ terhadap N-SPT pada berbagai kedalaman tiang P47-31

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	N rata-rata	t Sebelum Dilakukan <i>Grouting</i> (kPa)	t Sesudah Dilakukan <i>Grouting</i> (kPa)	Nilai Prediksi t/N (kPa)	t/N Sebelum Dilakukan <i>Grouting</i> (kPa)	t/N Sesudah Dilakukan <i>Grouting</i> (kPa)
-0	Clayey SAND to Sandy SILT	48	58,92	58,92	2,3	1,23	1,23
-10	SAND	49	73,39	73,39	2,3	1,50	1,50
-20	SAND	50	81,23	81,23	2,3	1,62	1,62
-30	SAND to SILT	49	54,75	54,75	1,50	1,12	1,12
-40	SILT to Silty CLAY	30	38,11	42,35	1,50	1,27	1,41
-50	Silty CLAY	43	34,70	60,64	1,50	0,81	1,41
-60							
-70							
-80							

Tabel 5. Korelasi τ terhadap N-SPT pada berbagai kedalaman tiang P47-31

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	N rata-rata	t Sebelum Dilakukan Grouting (kPa)	t Sesudah Dilakukan Grouting (kPa)	Nilai Prediksi τ/N (kPa)	t/N Sebelum Dilakukan Grouting (kPa)	t/N Sesudah Dilakukan Grouting (kPa)
-0	CLAY		28,24	28,24		-	-
-10	Sandy CLAY to Clayey SILT	30	19,97	19,97	1,50	0,67	0,67
	Clayey SILT	56	49,80	49,80	1,50	0,89	0,89
-20							
-30	Sandy SILT, Clayey Silt, Silty CLAY to Clayey SILT	54	57,55	57,55	1,50	1,07	1,07
-40							
-50							
-60	Clayey SILT	40	31,44	53,17	1,50	0,79	1,23
-70							
-80	Clayey SILT	48	33,56	73,22	1,50	0,70	1,53

berkisar antara 2,0N (kPa) sampai dengan 2,7N (kPa) bila tidak dilakukan perbaikan tanah. Sedangkan bila dilakukan perbaikan tanah dengan menggunakan *grouting* diperoleh nilai c_u sebesar 3,8N (kPa).

6. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Uji pembebanan statik konvensional pada pondasi tiang untuk Jembatan Utama Suramadu tidak dapat dilakukan sehingga digunakan Tes OC. Menggunakan dua buah *load cell* pada tes tersebut dapat diperoleh distribusi tahanan ujung dan selimut pada tiang.
2. Tes mineralogi menunjukkan adanya mineral montmorillonite pada tanah *clay-shale* di lokasi Jembatan Suramadu. Material *clay-shale* sensitif terhadap pemboran dan *weathering process*. Pemboran dapat mengakibatkan pengurangan tegangan lateral pada material ini yang diikuti keretakan massa tanah di sekitar lubang bor sehingga menghasilkan *strength reduction* yang cukup besar.
3. Besar tahanan ujung tiang bor pada tanah yang mengandung material *clay-shale* dapat diprediksi menggunakan nilai korelasi dari Terzaghi dan Peck (1967), yaitu c_u sebesar 6,5N (kPa) selama kondisi dasar pondasi bersih.
4. Besar tahanan selimut tiang bor pada tanah yang mengandung material *clay-shale* masih terlalu tinggi bila diprediksi dengan korelasi c_u senilai 4N (kPa). Oleh karena itu, penulis mengajukan nilai c_u yang berkisar antara 2N (kPa) sampai dengan 2,7N (kPa) bila tidak dilakukan perbaikan tanah. Sedangkan bila dilakukan perbaikan tanah dengan menggunakan *grouting* diajukan korelasi c_u sebesar 3,8N (kPa).
5. Berdasarkan korelasi c_u terhadap nilai N-SPT pada point 5 di atas dan mengambil nilai α sebesar 0,375 maka dapat ditentukan korelasi antara tegangan geser selimut terhadap nilai N-SPT. Besar tegangan geser dapat diprediksi menggunakan nilai τ yang berkisar antara 0,75N sampai dengan 1,00N (kPa) bila tidak dilakukan perbaikan tanah. Sedangkan bila dilakukan perbaikan tanah dengan menggunakan *grouting*, tegangan geser selimut dapat diprediksi memakai nilai τ sebesar 1,42N (kPa).
6. Terdapat perbedaan korelasi τ terhadap nilai N-SPT yang diperoleh berdasarkan data uji pembebanan pondasi pada Jembatan Ciujuung dan data uji pembebanan pondasi pada Jembatan Suramadu. Perbedaan tersebut diperkirakan akibat

adanya perbedaan jangka waktu material *clay-shale* terekspose. Dalam hal ini, semakin lama material *clay-shale* terekspose maka *strength reduction* yang terjadi akan semakin besar. Perbedaan yang terjadi juga diperkirakan akibat adanya perbedaan dalam metode pemboran yang digunakan, dimana pada Jembatan Ciujung digunakan *dry boring* sedangkan pada Jembatan Suramadu digunakan pemboran dengan metode *Reverse Circulation Drill (RCD)* yang menggunakan *slurry mud*. Metode pemboran yang digunakan diperkirakan dapat mempengaruhi *strength reduction* yang terjadi pada material *clay-shale*.

Daftar Pustaka

- Aurora, Ravi, dan Reese, L.C., 1977, "*Field Tests of Drilled Shafts in Clay-Shales*", Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, July.
- Irsyam, M. dan Kartawiria, A., 2005, "*Permasalahan Geoteknik dalam Desain dan Pelaksanaan Pekerjaan Pondasi, Jembatan Ciujung, Jalan Tol Cipularang Tahap II*", Seminar dan Pameran HAKI, Agustus pp. Z1-Z10.
- Kulhawy, F.H., 1984, "*Limiting Tip and Side Resistance-Fact or Fallacy*", Analysis and Design of Pile Foundations, ed. J.R. Meyer, ASCE, New York, N.Y., pp. 80-98.
- Loadtest, 2005, "Brochure English 2005 02.doc", www.loadtest.com.
- Meyerhof G.G., 1976, "*Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations*", ASCE JGED, Vol. 102, No. GT 3, March, pp. 196-228.
- Ooi, P.S.K., Rojiani, K.B., Duncan, J.M., Barker, R.M., 1991, "*Engineering Manual for Drilled Shaft*", Virginia Tech Blacksburg.
- Osterberg, J.O. dan Pepper, S.F., 1984, "*A New Simplified Method for Load Testing Drilled Shafts*", Foundation Drilling, Association of Drilled Shaft Contractors, August, pp. 9-11.
- Quiros, G.W. dan Reese, L.C., 1977, "*Design Procedures for Axially Loaded Drilled Shafts*", Research Rept. 176-5F, Project 3-5-72-176, Centre for Highway Research, Univ. of Texas, December, 156 pp.
- Reese, L.C. dan O'Neill, M.W., 1988, "*Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*", FHWA Publication No. FHWA-JI-88-042 atau ADSC Publication No. ADSC-TL-4, August, 564 pp.
- Reese, L.C. dan Wright, S.J., 1977, "*Drilled Shaft Manual-Construction Procedures and Design for Axial Loading*", Vol. 1, U.S. Dept. of Transportation, Implementation Division, HDV-22, Implementation Package 77-21, July, 140 pp.
- Skempton, A.W., 1951, "*The Bearing Capacity of Clays*", Proceedings of Building Research Congress, London, 1, pp. 180-189.
- Stroud, M.A., 1974, "*The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Soft Rocks*", Proceedings of The European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Vol. 2.2, 367-375.
- Terzaghi, K. dan R. B. Peck, 1967, "*Soil Mechanics in Engineering Practice*", John Wiley and Sons.
- Tomlinson, M.J., 1970, "*Adhesion of Piles in Stiff Clay*", CIRIA, Report 26, London.
- Touma, F.T. dan Reese, L.C., 1974, "*Behavior of Bored Piles in Sand*", ASCE JGED, Vol. 100, No. GT 7, July, pp. 749-761.
- Vesic, A.S., 1977, "*Design of Pile Foundations*", National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice No. 42, Transportation Research Board Washington, D. C.