

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Metode Perbaikan Tanah Lempung Ekspansif dengan Menggunakan Teknik Kolom Kapur

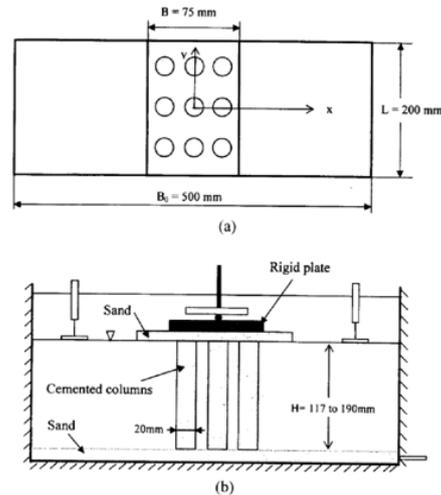
Tanah ekspansif merupakan tanah lempung yang memiliki kembang susut yang tinggi (Muntohar, 2014). Besarnya pengembangan dan penyusutan yang tidak merata dari satu titik ke titik yang lain dapat mengakibatkan retak pada struktur di atasnya (Muntohar, 2014). Beberapa metode perbaikan tanah yang dapat dilakukan berupa stabilisasi fisik dan kimia, mengganti material tanah ekspansif, manajemen drainase baik vertikal maupun horizontal, maupun dengan menggunakan teknik kolom (Diana dkk., 2017). Muntohar (2015) menyebutkan beberapa metode perbaikan tanah ekspansif yang dapat dilakukan antara lain dengan cara mengganti atau mencampur tanah, pemakaian cerucuk bambu, mengubah sifat kimiawi tanah, dan penggunaan geosintetik. Namun, metode tersebut dianggap masih belum efektif karena kurang praktis dan membutuhkan biaya yang mahal.

Muntohar (2014) mengungkapkan bahwa pemilihan kapur merupakan metode yang cepat dan ekonomis untuk memperbaiki sifat-sifat tanah lempung dalam kondisi basah sehingga dapat digunakan untuk perkerasan jalan. Kapur akan bereaksi dengan mineral *montmorillonite* atau bahan *pozzolan* halus lainnya seperti *hydrous silica* membentuk gel keadap air yang tersusun atas *calcium silicate* yang mengikat partikel-partikel tanah (*cementing agent*). Reaksi *physicochemical* kapur-lempung terjadi akibat pertukaran kation (Abiodun dan Nalbantoglu, 2015).

Metode lain yang cukup efektif untuk mengurangi *settlement* dan deformasi pada tanah ekspansif yaitu dengan menggunakan teknik kolom kapur. Prinsip penerapan metode ini adalah reaksi modifikasi yang berlangsung cepat dan reaksi stabilisasi yang berlangsung dalam jangka waktu yang lama. Perbaikan tanah dengan menggunakan sistem kolom kapur telah dilakukan oleh Buoassida dan Porbaha (2004), Larsson dkk. (2009), Charbit (2009), Muntohar dkk. (2013), Liu dkk. (2013), Farouk dan Shahien (2013), Carvajal dkk. (2013), serta Malekpoor dan Poorebrahim (2014).

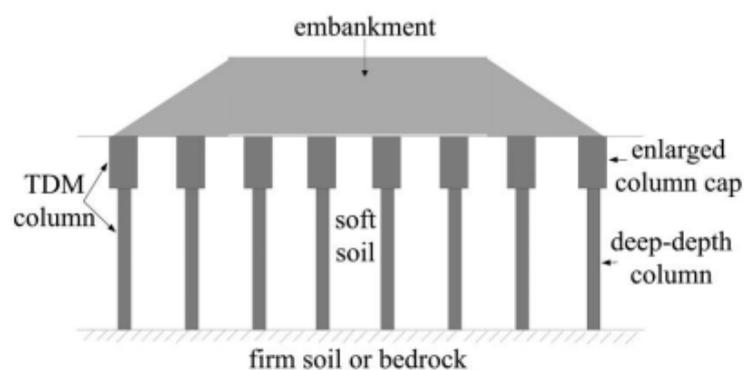
Tafalas (2016) melakukan penelitian perkuatan tanah ekspansif dengan menggunakan kolom kapur berbentuk O dan T untuk mengurangi deformasi pada sistem pelat *flexiglas*. Pengujian dilakukan dalam 3 kondisi, yaitu drum berisi tanah ekspansif tanpa perkuatan kolom, drum berisi tanah ekspansif dengan perkuatan kolom SiCC bentuk O (polos), dan drum berisi tanah ekspansif yang diperkuat kolom SiCC bentuk T. Dari hasil pengujian, didapat bahwa tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC dapat mengurangi deformasi akibat pengembangan dan pembebanan yang terjadi pada tanah ekspansif, sedangkan tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom berbentuk T dapat mengurangi deformasi sebanyak 4 kali dibanding dengan kolom SiCC berbentuk O (polos).

Buoassida dan Porbaha (2004) melakukan penelitian terhadap tingkat kapasitas dukung ultimat tanah lempung lunak menggunakan metode *deep mixing column*. Analisis yang digunakan yaitu analisis dengan pendekatan kinematis dan statis dengan *yield design theory* (YDT) untuk pemodelan kolom. Model skala laboratorium menggunakan skala box berukuran 500 mm x 200 mm yang diisi tanah kaolin *remolded* serta pelat *rigid* berukuran lebar 75 mm dan panjang 200 mm di atasnya. Ukuran kolom yang digunakan memiliki diameter 20 mm dan tinggi 75 mm yang berupa campuran dari lempung Kawasaki dan 12% semen portland (PC). Kemudian hasil pengujian dibandingkan dengan metode Brom. Sebelum diberi beban, tanah dibiarkan dalam keadaan jenuh selama dua hari. Hasil dari penelitian ini yaitu penggunaan kolom *deep mixing* mampu meningkatkan kapasitas dukung tanah lempung lunak dan metode *yield design theory* (YDT) dapat digunakan untuk menentukan kapasitas dukung tanah lunak yang diperkuat dengan kolom dan sedikit lebih baik dibanding menggunakan metode Brom untuk tanah dengan rasio kohesi lebih dari 30.



Gambar 2.1. Skema pemodelan perkuatan tanah dengan metode *deep mixing* (Buossida dan Porbaha, 2004).

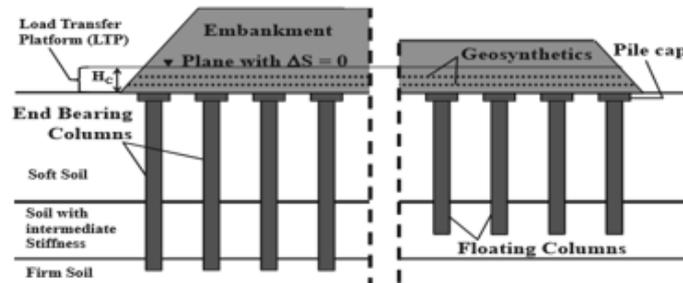
Liu dkk. (2012) melakukan pengujian dengan membandingkan efektifitas penggunaan kolom *deep mixing* (DM) dengan bentuk konvensional (*O-shape*) dan modifikasi dengan pembesaran kepala kolom (*T-shape*) pada timbunan di atas tanah lunak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan kolom *T-shape* mampu mengurangi *deformasi* dan *settlement* pada tanah lempung lunak arah vertikal dan horizontal, dapat membuat tanah lebih kaku pada kedalaman dangkal, serta dapat menghemat penggunaan semen dan waktu pelaksanaan konstruksi dibanding dengan kolom konvensional (*O-shape*).



Gambar 2.2. Ilustrasi penggunaan kolom *T-shape* pada timbunan di atas tanah lunak (Liu dkk., 2012).

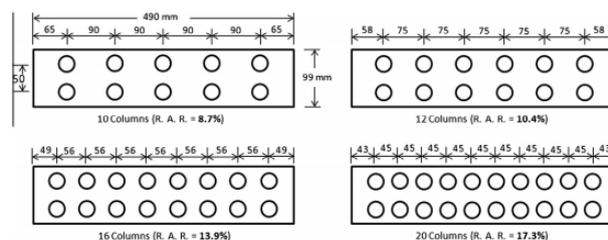
Carvajal dkk. (2013) melakukan analisis penggunaan kolom *rigid* untuk perkuatan timbunan jalan pada tanah lunak. Kolom yang digunakan terbuat dari campuran pasir-batu dan mortar-semen. Di atas susunan kolom diletakkan tanah

granuler yang diperkuat dengan geosintetik sebagai *Load Transfer Platform (LTP)* untuk memindahkan beban timbunan ke kepala kolom. Hasil dari kajian menunjukkan bahwa pemilihan material kolom memengaruhi proses konsolidasi yang terjadi pada tanah lunak dan kekakuan kolom dapat mengurangi *differential settlement* pada tanah dasar, serta material dan tinggi timbunan memengaruhi ukuran kolom yang disarankan.



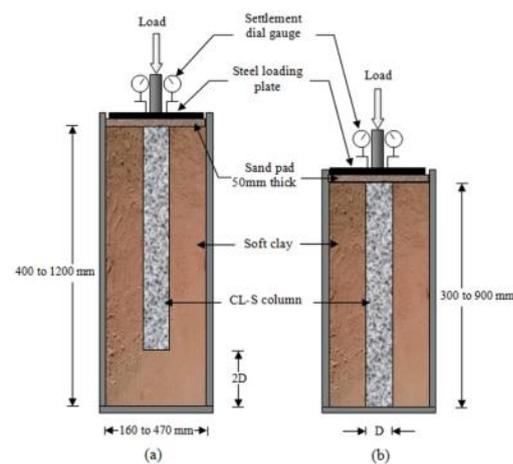
Gambar 2.3. Timbunan yang didukung oleh *group column* (Carvajal dkk., 2013).

Farouk dan Shahien (2013) melakukan pengujian terhadap kuat tekan kolom untuk perbaikan tanah lunak. Kolom berupa campuran semen yang divariasikan faktor air semennya. Variable pengujian yang digunakan yaitu panjang kolom, ukuran kolom, jumlah dan susunan kolom, serta waktu perawatan kolom. Hasil yang didapat dari penelitian tersebut antara lain seiring dengan meningkatnya faktor air semen maka dapat mengurangi kuat tekan dan dapat menambah daktilitas tanah. Meningkatnya kadar campuran semen akan menambah kekuatan dan kekakuan pada tanah. Kuat tekan dan kekakuan tanah berkurang dengan bertambahnya ukuran butir halus dalam tanah. Ukuran kolom dan lama masa perawatan mempengaruhi nilai kuat dukung tanah, sementara panjang dan jumlah kolom memengaruhi nilai *settlement* yang terjadi.



Gambar 2.4. Susunan kolom yang digunakan dalam penelitian (Farouk dan Shahien, 2013).

Malekpoor dan Poorebrahim (2014) mengkaji perilaku *compacted lime-soil* (CL-S) *rigid* yang terbuat dari susunan kolom batu pada tanah lunak. Variabel pengujian antara lain diameter kolom (D), panjang kolom (L), kelangsingan (L/D), dan rasio area (Ar). Percobaan skala laboratorium dimana kolom dalam kondisi menyentuh lapisan keras (*end-bearing columns*) dan melayang pada lapisan lunak (*floating columns*). Beban diaplikasikan pada seluruh area untuk menentukan kekakuan tanah yang diberi perkuatan. Hasil secara umum menunjukkan bahwa penambahan kolom menambah kapasitas beban yang dapat bekerja di atas tanah lunak serta mengurangi *settlement*.



Gambar 2.5. Skema pengujian laboratorium : (a) *floating column model*, (b) *end-bearing column model* (Malekpoor dan Poorebrahim, 2014).

Aplikasi teknik kolom kapur merupakan metode yang efektif dan merupakan teknik modifikasi jangka panjang pada perbaikan tanah dasar untuk berbagai masalah tanah seperti tanah ekspansif, lempung lunak, *sensitive clay*, dan lain-lain (Larsson dkk., 2009). Perbaikan dengan kolom kapur menghasilkan *strong interparticle bonds* dan *unconfined compressive strength* tanah yang diakibatkan oleh perpindahan ion Ca^{2+} dan ion Mg^{2+} dari kolom kapur ke tanah, proses flokulasi, dan reaksi pozzolan (Abiodun dan Nalbantoglu, 2015). Bahan yang digunakan untuk membuat kolom kapur atau kolom semen atau kolom kapur-semen akan menyebar melalui pori-pori tanah sehingga terjadi reaksi sementasi dengan tanah di sekitar kolom, sehingga teknik ini dapat meningkatkan kuat dukung tanah dan mengurangi deformasi pada tanah (Muntohar, 2016).

2.2. Pemodelan Numerik Sistem Pelat pada Tanah Ekspansif

Pemodelan numerik telah banyak dilakukan di bidang teknik sipil karena dapat memberikan pendekatan numerik terhadap sistem yang sangat kompleks (Gray, 2013). Pemodelan numerik membagi suatu model ke dalam bagian-bagian terkecil yang disebut elemen yang dihubungkan dengan *nodes*. Pemodelan numeris di bidang geoteknik dapat dilakukan dengan menggunakan program Plaxis, SAP2000, Abaqus, dan lain-lain.

Muntohar dkk. (2013) melakukan analisis numerik pada perbaikan tanah gambut dengan menggunakan teknik kolom kapur/semén dengan menggunakan program Plaxis 2D. Penelitian ini membandingkan hasil analisis numerik pada perbaikan tanah gambut dengan kolom PFA (*Pulverized Fuel Ash*) dengan hasil pembebanan di lapangan. Dalam analisis ini digunakan dua model yaitu (a) blok (model A), dan *column group* (model B). Hasil dari pemodelan didapat bahwa pada model A (sistem blok) dan model B (*group column*) memiliki persamaan bentuk pada kurva penurunan dengan hasil di lapangan. Sedangkan nilai *safety factor* pada model A lebih kecil dari model B.

Muntohar dan Nugraha (2015) melakukan pemodelan lapis perkerasan lentur di atas tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC berbentuk T dengan menggunakan *software* Plaxis 2D. Penampang jalan dimodelkan pada potongan melintang dengan panjang 15 m dan ketebalan 10 m. Pemodelan ini difokuskan pada pengaruh pembesaran kepala kolom, diameter mini kolom, dan jarak pemasangan mini kolom pada tanah ekspansif untuk mengurangi deformasi akibat pengembangan dan pembebanan pada tanah ekspansif. Diameter kolom (D_{col}) yang dimodelkan adalah 30 cm dengan panjang kolom (L_{col}) 1 m. Diameter kepala kolom (D_{ch}) divariasikan menjadi $1xD_{col}$, $2xD_{col}$, $3xD_{col}$, dan $4xD_{col}$ dengan panjang kepala kolom 30 cm, serta jarak kolom divariasikan $4xD_c$, $5xD_c$, $6xD_c$, dan $8xD_c$. Dari hasil pemodelan didapat penggunaan kolom kapur dapat mengurangi *differential settlement* pada sistem perkerasan lentur di atas tanah ekspansif. *Differential settlement* cenderung berkurang dengan berkurangnya jarak antar kolom. Semakin kecil jarak antar kolom, maka tanah semakin kaku sehingga deformasi semakin berkurang.

Selain penggunaan program Plaxis, analisis numerik di bidang geoteknik juga dapat dilakukan menggunakan program Abaqus. Abaqus merupakan program analisis elemen hingga yang digunakan untuk menganalisis masalah di bidang teknik. Program Abaqus terbagi dalam 3 prosedur, yaitu *pre-processing*, simulasi, dan *post-processing* (Charbit, 2009). Pada prosedur *pre-processing*, dilakukan pembuatan model sebagai *file input* pada Abaqus. Abaqus akan mengidentifikasi informasi yang diperlukan untuk mendeskripsikan sistem dan model akan dianalisis. Pada prosedur simulasi, Abaqus akan menganalisis model numerik yang telah dibuat. Proses *running* terjadi sebagai *background process*. Pada prosedur *post-processing*, Abaqus akan memberikan hasil analisis dalam bentuk visualisasi atau *postprocessor* lain. Beberapa pilihan untuk menampilkan hasil antara lain dengan kontur warna, animasi, bentuk deformasi, dan *x-y plot data*.

Charbit (2009) melakukan analisis numerik pada pembebanan lateral pada kolom kapur/semen dengan menggunakan program Abaqus. Pemodelan ini bertujuan untuk menentukan nilai parameter yang digunakan mensimulasikan retakan pada kolom kapur-semen yang digunakan untuk perbaikan tanah tanah lempung dan kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium. Tanah dan kolom kapur-semen dimodelkan dalam model *elasto-plastic Mohr Coulomb*. Berdasarkan hasil pengujian, pada nilai parameter tanah dan kolom semen kapur perlu dilakukan simulasi untuk beberapa data sehingga dapat diperoleh hasil analisis numerik yang sama atau mendekati hasil pengujian laboratorium. Nilai parameter yang dibutuhkan dalam *Mohr Coulomb plasticity model* antara lain *meridional eccentricity* ϵ , *friction angle* φ , *dilation angle* ψ , dan *cohesion yield stress* c sebagai fungsi tabulasi dari *plastic strain* ϵ^p . Sedangkan parameter beton yang dibutuhkan antara lain *dilation angle* ψ , *eccentricity* ϵ , *ratio* σ_{b0}/σ_{c0} , *ratio* K_c , *compressive yield stress* σ_c , *tensile postfailur stress* σ_1 , dan *tensile damage parameter* d_1 .

Khodair dan Mohti (2013) melakukan analisis numerik pada interaksi tiang-tanah dibawah beban aksial dan beban lateral dengan menggunakan *finite difference* (FD) menggunakan program LPILE dan *finite element model* (FEM) menggunakan program SAP2000 dan Abaqus untuk mengetahui pengaruh beban lateral pada tiang yang tertanam pada tanah lempung. Dari hasil pemodelan didapat bahwa semakin

meningkat jumlah lempung disekeliling tiang dapat mengurangi *momen bending* dan penurunan lateral pada tiang dan dapat meningkatkan kapasitas kolom untuk menahan beban lateral.

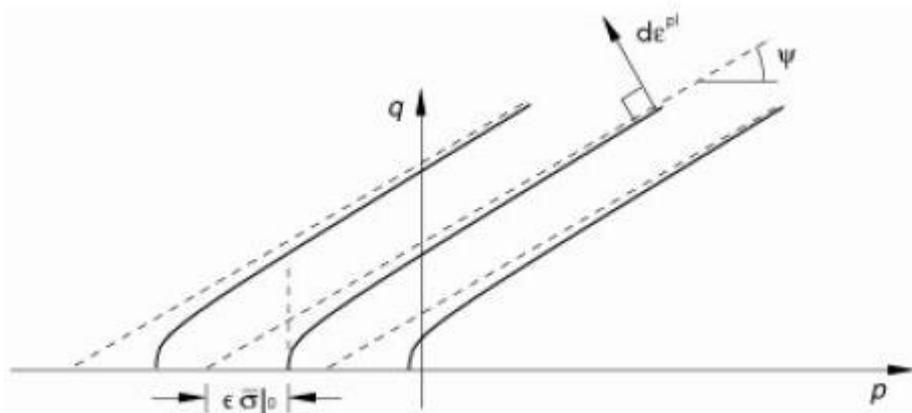
Chenary dkk. (2017) melakukan pemodelan numerik untuk menganalisis perilaku *stone column* pada *loose sand*. Pemodelan dilakukan dengan analisis *axisymmetric*. Parameter yang menjadi fokus pada penelitian ini adalah pengaruh jumlah kolom dan panjang kolom. Variasi jumlah kolom yang digunakan adalah 4, 5, dan 9. Sedangkan variasi panjang kolom yang digunakan yaitu 30, 40, dan 50. Hasil pengujian yang diperoleh dari penelitian ini adalah teknik *stone column* merupakan metode yang dapat digunakan dalam perbaikan pasir karena dapat mengurangi deformasi dan kekuatannya. Selain itu, teknik *stone column* ini dapat meningkatkan nilai *bearing capacity ratio* (BCR) dan mengurangi nilai *settlement reduction factor* (SRF).

2.3. Parameter Material

Tanah dimodelkan dengan model *undrained Hardening Soil (HS)*. *Hardening Soil model* merupakan model pada simulasi perilaku tanah seperti pada model *Mohr-Coulomb*. Parameter tekanan digambarkan oleh *friction angle*, kohesi, dan sudut dilatasi. Sedangkan pelat serta kolom dimodelkan dalam *linear-elastic model*. Model ini meliputi 2 parameter *elastisitas* dasar meliputi *Modulus Young* dan *Poisson Ratio*.

Pemodelan ini menggunakan model keruntuhan tanah *Drucker Prager*. Model *Drucker Prager* telah diperkenalkan oleh Drucker dan Prager pada 1952 (Jiang dan Fei-Wu, 2012) dan telah digunakan secara luas untuk analisis elemen hingga dibidang geoteknik (Fattah dkk., 2015). *Drucker Prager* dapat mendeskripsikan dengan baik pada tekanan dan sensitivitas material seperti batuan, tanah, dan beton. Selain itu, model pada *strain-hardening Drucker-Prager* dapat mendeskripsikan perilaku penggeseran tanah dengan baik (Liu dan Chen, 2017). *Drucker Prager* digunakan untuk simulasi material geologi dengan memperlihatkan hasil yang tergantung pada tekanan yang terjadi (Fattah dkk., 2015). Penggunaan *Drucker Prager* dalam analisa juga diharapkan dapat meningkatkan tingkat akurasi pada hasil yang diperoleh (Charbit, 2009).

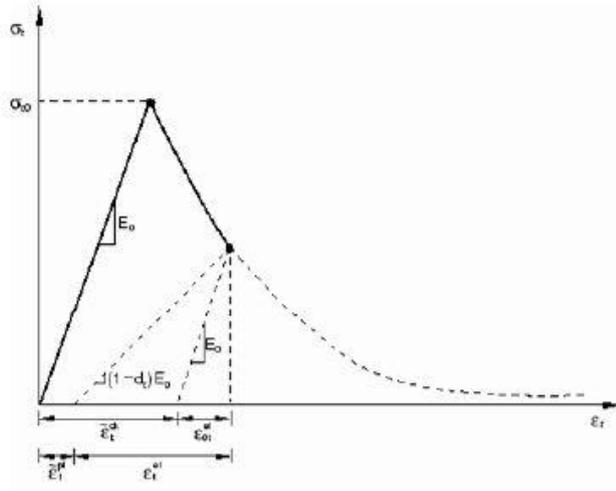
Model plastis dengan tipe keruntuhan *Drucker-Prager* berhubungan dengan *friction angle* dan kohesi yang berpengaruh pada *yielding* dan *hardening criteria*, dimana parameter tersebut berhubungan dengan *plastic dilation* (Jiang dan Fei-Wu, 2012). Model *Drucker Prager* merupakan penyederhanaan bentuk keruntuhan *hexagonal* pada model *Mohr-Coulomb* (R. Rani dkk., 2014). Prediksi keruntuhan pada model *Drucker Prager* sama seperti tipe keruntuhan *Mohr-Coulomb*, namun model *Drucker Prager* menganalisis keruntuhan pada kekakuan yang lebih besar pada deformasi yang rendah. Kurva hiperbolik pada *Drucker Prager model* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. *Drucker Prager hyperbolic plastic* pada Abaqus (Charbit, 2009).

Kolom kapur atau semen dimodelkan sebagai material beton karena pola retakan pada kolom kapur atau semen digambarkan sama seperti beton, namun kolom kapur atau semen memiliki material yang lebih lemah dan lebih kaku dibanding beton (Charbit, 2009). Sehingga, dalam pemodelan ini *concrete damage plasticity* digunakan untuk mensimulasikan kolom kapur atau semen. Selain itu, kolom disimulasikan pada *uniaxial tensile behavior* yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, dengan respon tegangan-regangan merupakan *linear elastic* hingga *failure stress* tercapai. Perilaku plastis ditunjukkan sebagai *strain softening* yang berkaitan dengan pola *microcracks*. Kerusakan pada material dianggap sebagai *isotropic reduction* pada kekakuan elastis. Ketika material terbebani dari berbagai titik pada cabang *strain softening*, kekakuan elastis akan menurun. Pada saat deformasi plastis meningkat, maka material akan mengalami kerusakan di sepanjang penurunan pada kekakuannya. Karena hubungan antara *fracture energy* dan *tensile yield stress* pada

kolom kapur atau semen jarang terjadi, maka sifat ini diperoleh dari nilai yang biasanya digunakan oleh beton.



Gambar 2.7. Respon beton pada *uniaxial loading in tension* dari Abaqus 6.6, 2009 (dalam Charbit, 2009).

Besar penurunan yang diperoleh pada pemodelan dipengaruhi oleh kekakuan material yang digunakan pada pemodelan, sehingga perlu dilakukan *input data* berulang-ulang hingga didapat nilai yang sama atau mendekati hasil pengujian laboratorium. Kemiripan dari hasil pengujian dan prediksi model menunjukkan keakuratan dan efektifitas dari model (Jiang dan Fei-Wu, 2012). Perbedaan atau selisih yang diperoleh antara hasil pengujian dan hasil pemodelan disebabkan oleh tingkat kesulitan untuk memperoleh nilai parameter yang tepat dalam memodelkan hasil pengujian laboratorium (Muntohar, 2013).

Larsson dkk. (2012) mensimulasikan retak pada kolom kapur-semen yang digunakan untuk perbaikan tanah lempung lunak menggunakan *software* Abaqus. Tanah dimodelkan dalam *Drucker Prager*, dan pasir dimodelkan dalam *linear-elastic model*, serta kolom kapur-semen sebagai *plasticity model*. Pemodelan dilakukan pada *single column* dan *rows column*. Hasil dari pemodelan ini menunjukkan bahwa *rows column* memiliki nilai kuat geser yang lebih tinggi dari model *single column* di bawah deformasi yang kecil.