

ま え が き

本プロジェクトは、名城大学理工学部建設系3学科「建設システム工学科」、「建築学科」、「環境創造学科」の教員12名による共同提案によるもので、文部科学省の平成19年度私立大学ハイテク・リサーチ・センター整備事業に採択されたプロジェクトです。このたび、大学の支援のもと開所式、ならびに斯界の権威者である福和伸夫教授（名古屋大学大学院環境学研究科）および堀宗朗教授（東京大学地震研究所）をお招きして記念講演会を開催することができたことは大変喜ばしいことであります。

本プロジェクト提案の背景および目的は次のようです。詳細については付録をご参照頂ければと思います。東海地方では東海・東南海・南海地震の発生が危惧されており、特に東海地震は今後30年間の発生確率が86%にも達し明日起こってもおかしくない地震と言われています。最悪のシナリオでは、東海・東南海・南海地震が同時に発生する場合で、被害は関東地域から九州の広域に及び、死者約24,700人（阪神淡路大震災の約4倍）、被害額は国家予算にも匹敵する（阪神淡路大震災の約8倍）といわれています。これらの巨大地震から住民や社会資本の安全を守り、高密度化した現代都市の機能を維持していくためには、構造物の効率的な耐震補強が不可欠であることは言うまでもありません。しかも、最近の地震に見られるような上限および発生地域が定まらない大地震あるいは本震に匹敵する余震に対する余剰耐震性の担保という観点から、制震構造化を初め、高度な解析および実験に裏付けされた構造物—地盤系の新しい耐震性能向上技術の開発が喫緊の課題です。

プロジェクトの研究のため、**施設概要**に示すハイパフォーマンス・コンピュータシステム、三次元地震波震動台、大型構造実験装置、精密中空ねじりせん断試験装置を整備致しました。これらの最新の装置・設備を十分に活用し、最先端であると同時に社会に役に立つ成果を上げるため、プロジェクトメンバー一同全力で研究に取り組んでいきたいと思っています。開所式を機に、本プロジェクトにご理解をいただき、皆様方から一層のご支援、ご指導、ご鞭撻を頂ければ幸甚に存じます。

研究プロジェクト代表者

理工学部建設システム工学科 宇佐美勉

目 次

記念講演概要

超大規模数値計算を使う構造物地震応答解析手法の開発と課題 堀 宗朗 (東京大学)	1
大地震を前に我々の実力を点検し耐震研究の役割を考える 福和伸夫 (名古屋大学)	3

施設概要

ハイパフォーマンス・コンピュータシステム	5
三次元地震波震動台	8
大型構造実験装置	11
精密中空ねじりせん断試験装置	13

付録 [文部科学省に提出した応募書類の抜粋]

構想調書の概要	15
構想調書	16
プロジェクト調書	20

記念講演1: 超大規模数値計算を使う構造物地震応答解析手法の開発と課題

東京大学地震研究所 堀 宗朗

1. はじめに

E-Defense は世界最大の震動台であり、阪神淡路大震災クラスの地震動を実構造物モデルに与え、崩壊過程を実験することができる。E-Defense で得られる構造物崩壊過程の実験結果を活かす手段の一つとして、数値震動台(E-Simulator)の開発が進められている。これは超大規模数値計算を使う構造物地震応答解析手法である。

超大規模数値計算を使う E-Simulator は、非線形応答を超え崩壊過程も含む地震応答解析である。崩壊過程は、材料の局所的損傷や部材の局部座屈から構造物全体の倒壊に至るマルチスケールの現象である。超大規模数値計算が可能とする離散化の細かさを活かし、詳細かつ精緻に崩壊過程を数値解析する。

計算機の進歩と数値計算技術の発展により、超大規模数値計算の目標は、1 億~10 億自由度の計算である。単に計算するだけではなく、計算結果の妥当性の検証も必要であり、これには参照できる実験が必要である。1000 のオーダーのチャンネルで時系列データが得られる E-Defense の実験を再現する E-Simulator の開発はこの意味でも重要である。

2. E-Simulator の開発目標

前述のように、E-Defense を補完する E-Simulator の第一の開発目標は構造物崩壊過程の解析である。局所的な材料不均一性に起因する破壊や倒壊のばらつきも含めて計算できる解析手法を開発する。解析手法はソリッド要素を使う有限要素法をベースとし、1 億自由度を超える超大規模計算を実行する(図1参照)。構造物の超大規模数値計算技術に関しては我が国が世界の最先端である。ばらつきを含めた崩壊過程の計算も新しい研究分野である。

建築・土木のさまざまな構造物の数値震動実験を行うため、E-Simulator の第二の開発目標は汎用性の高い解析手法とすることである(図2参照)。構造形式の他、鋼・コンクリート・地盤といった材料や、

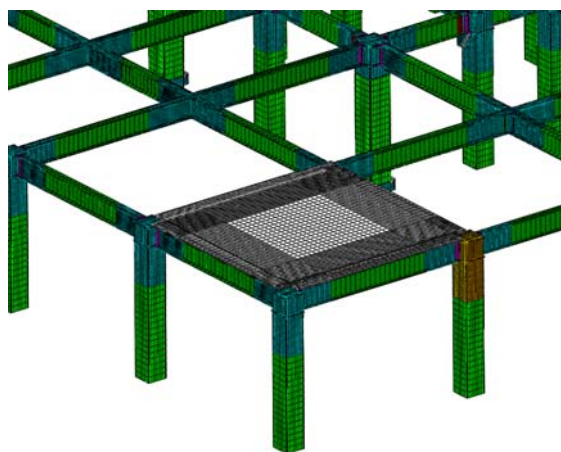


図1 超大規模計算用の解析モデル

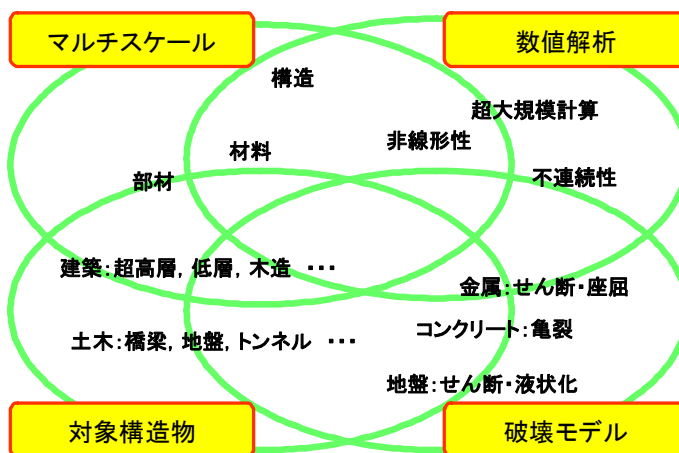


図2 E-Simulator の構成

延性破壊と脆性破壊といった破壊様式にも対応できることが目標である。

E-Simulator は学術研究であり、特殊な場合を除き、直ちに設計等の実務に使われることはない。しかし、E-Simulator を地震被害予測の高度化に利用することが第三の開発目標となっている。具体的な高度化の方向として、地震動による二次部材（非構造部材）の損傷や構造物の機能障害の計算が考えられている。また、都市内の全構造物の地震応答を E-Simulator で計算し、従来とは桁違いの分解能で地震被害を予測する都市被害推定も考えられている（図 3 参照）。

3. E-Simulator の課題

E-Simulator の開発の最大の課題は超大規模数値計算の実行である。自由度が大きいことは勿論、崩壊過程には繰り返しを含む非線形解析が必要である。これは現状のスーパーコンピュータを使って実際に数値計算が実行できるか否かの規模の計算である。次世代のスーパーコンピュータであるペタマシンのような最先端計算機の利用や、より効率的な数値計算技術の開発が必要である。

崩壊過程とそのばらつきを計算することは E-Simulator の開発目標である。このような複雑な現象の数値解析そのものにさまざまな課題はあるが、特に、ばらつきの計算には材料レベルでの破壊現象の理解を一步進めることも課題となっている。E-Defense も含め、材料・部材の実験との共同研究を進めることが望まれている（図 4 参照）。

具体的な開発目標として挙げられている二次部材の損傷や機能障害の数値計算をするために、二次部材や設備の解析モデルを構築し、地震応答解析を行うことも E-Simulator の課題である。広い意味で構造物の損傷を計算するために、新しい数値計算技術を開発するのである。

4. おわりに

ライフライン・材料・情報・環境と比較すれば、地震工学や建設系工学を取り巻く研究開発の状況は決して明るくはない。その一方で、巨大地震の発生が危惧される今日、より高度な防災・減災技術の開発に対する社会の期待は高い。超大規模数値計算を使う構造物地震応答解析手法がその一助になることが期待されているが、これには先端的な材料・部材・破壊実験との共同研究は不可欠である。建設系工学分野の中で実験と計算の包括的かつ重層的な研究体制を敷くことが望まれる。

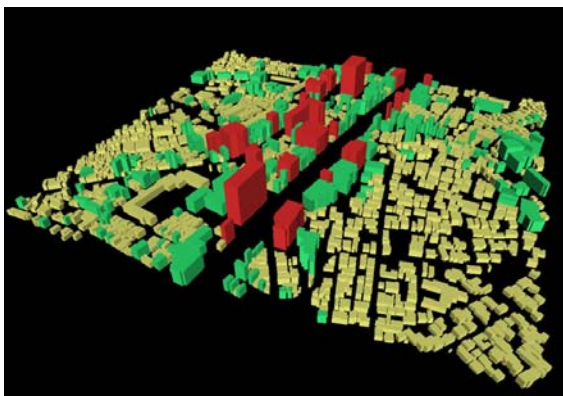


図 3 E-Simulator の都市モデル

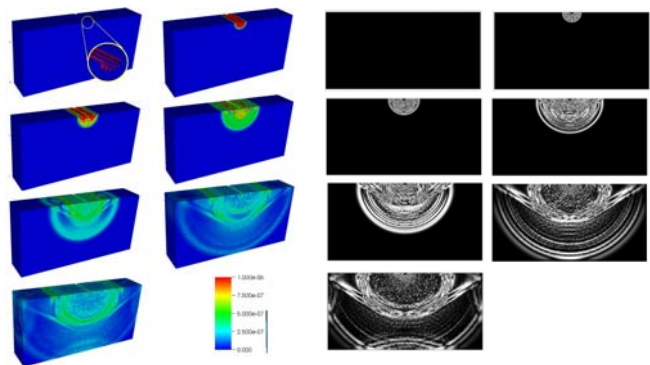


図 4 破壊実験との比較シミュレーション

記念講演2：大地震を前に我々の実力を点検し耐震研究の役割を考える

名古屋大学大学院環境学研究科 福和伸夫

1. はじめに

今世紀前半に複数の大地震が発生し、我が国社会の破綻につながるような甚大な被害が予測されている。それにもかかわらず、私たちの社会は、この問題を他人事のように扱い、減災対策は遅々として進んでいない。これは、私たちがバーチャルな現代社会に犯され、社会の脆さや目の前に迫る危機に対して感受性を失ってしまっていることに原因があるように感じる。私たちが探求する建設技術においても多くの落とし穴があるのではないだろうか。耐震強度偽装問題を始め、建設技術に対する社会の目は厳しい。本来、災害を予測し、それを回避するために全力を尽くすべき耐震研究者が、小さな殻に閉じこもり、目の前に迫る危機に目をつむって、評論家になってはいけない。多くの耐震研究者が、自宅の家具固定すらしていな現況は、社会に対して恥ずべきだと思う。この状況を何とか打破し、真に必要な減災研究を先導し、率先市民として我が身の防災対策を推進するよう変身したい。可能であれば、市民を防災行動に誘導するようなボランティアな活動にも加わることも望まれる。大地震の切迫性が高まる中、耐震研究に携わる私たちの実力を点検し、素直に反省した上で、次の世代にこの豊かな社会を受け継ぐため、何をすべきか一緒に考えてみたい。

2. 過去と現代を対比し現代社会の脆さを考える

東海・東南海地震が切迫していると言う。理由は単純である。過去に繰り返し起きてきているからである。1498年、1605年、1707年、1854年、1944年と、90年～150年の間隔で発生している。政府地震調査委員会によると、今後30年での地震発生確率は東海地震が87%（参考値）、東南海地震が60～70%とされている。

これらの地震が起きると、西日本が広域に被災する。地震発生の前後には、内陸での地震活動も活発になるようだ。このため、地震の活動期は時代の転換期になりやすい。大正末期から戦後にかけて見てみると、1923年に関東地震が発生、その後、1925年北但馬地震、1927年北丹後地震、1930年北伊豆地震、1933年三陸地震津波、1943年鳥取地震、1944年東南海地震、1945年三河地震、1946年南海地震、1948年福井地震と続いた。この間に、1925年治安維持法、1927年金融恐慌、1931年満州事変、1936年2.26事件、1937年日中戦争、1941年太平洋戦争、1945年敗戦と、様々な出来事が発生した。関東地震と、金融恐慌や軍国主義化、東南海地震や三河地震と、戦争の終結など、地震と歴史は無縁とは思えない。

予見できている災害に対し、被害軽減のための行動をとることは、現代に生きる私たちの責務である。しかし、減災対策は進んでいない。多くの人たちは、今の社会は戦前戦後の時代と比較して安全だと誤解している。耐震研究者・技術者の中にもそう言った考えの人は多い。現実には、現代社会の実態は災害に極めて脆いのではないだろうか。都市への人口集中による軟弱地盤への都市の拡大と、建物の高層化・密集化により災害危険度が増している。揺れがより強くなり、延焼危険度や同時被災危険度が増した。都市の中では、高速電車や地下鉄・自動車が横移動を、エレベータが縦移動を高速化し、まちの拡大と高層化を支えた。オフィスや家庭には、電化製品が溢れ、コックをひねれば加熱や給水・給湯ができ、便所も水洗で暖房便座・洗浄機付き、電話・携帯・メールで通話・通信をし、インターネットで情報検索、という便利な時代になった。都市の人工環境で暮らし自然の怖さを感じなくなった国民は、生きる力を減退させている。防災力を上回る被害が発生すれば、ライフラインに頼りきった社会は、効率重視で冗長性（リダンダンシー）の無さや、地域力の減退で、被害を拡大・波及させる。

戦前には、まちは揺れの小さい洪積台地に位置し、建物も平屋が多く、隣棟間隔も離れていた。高速の移動手段がないので、まちはコンパクトで、建物も低層だった。このため、帰宅困難問題もないし、地下鉄やエレベータへの閉じ込めの危険もない。蒸気機関車は電気がなくても走れる。電化製品は電灯だけ。風呂や煮炊きは薪、井戸水や汲み取り便所を使い、ガスや上下水道に頼ることもない。電気・ガス・上下水・通信・交通網に頼った現代社会とは異なる。効率重視の「中央集約型」の現代社会は、かつての「自律分散型」の社会と比べ、災害に対して脆くなっている。このことを認識し、高機能高効率な社会の耐震性能を考える必要がある。

3. 耐震研究の実力と研究者の役割

建築物の耐震性を考えるに当たって、十分に解明されていないことは多い。兵庫県南部地震以降に発生した各地での地震において、震度7の揺れに対しても、震度6強の下限程度に対して終局強度設計をしていた中低層RC建物の多くが無被害であった。これは、設計用地震力と建物耐力の両者を過小に評価していたことを示している。一方、耐震強度偽装問題をきっかけとして、技術的明快さを理由に、耐震壁にスリットを多用する設計が急増している。これは、耐震的余力を著しく低下させるものである。また、大規模堆積平野での長周期地震動の懸念が高まっているにも関わらず、この種の揺れを十分に配慮せずに設計されている高層建物も多い。このような現況下、分かっていることと不明な点を分別すると共に、懸念されることを正直に社会に伝えることが、耐震研究者の責務であると感じる。

建物・地盤系の地震時挙動に関してだけでも、筆者が十分に理解できていないこととして、図1に示すように、①地震時の動的地震力と設計用地震力の乖離、②設計用地震動と建物耐力の過小評価、③地震動の強さ・周期・継続時間(震源&伝播&堆積盆地&不整形地盤&地盤改良効果)、④強地震動時の地盤の非線形性状(Site Nonlinearity、深部のG~ γ)、⑤基礎-地盤間の接触非線形や接地地盤の緩み(浮上り・滑動・剥離、Local Nonlinearity)、⑥建物への有効入力と逸散減衰、⑦各種基礎(独立Footing/帯/Mat基礎、群杭、根入れ、異種基礎、隣接基礎)の抵抗機構、⑧上部構造の剛性&耐力(開口、袖&垂&腰壁、スラブの効果)と減衰、⑨上部構造の立体振動挙動と終局挙動、などを挙げることができる。

本来、これらの問題を解決するには、地盤調査、強震観測、振動実験など、地道な調査・観測・実験が基礎となる。しかし、近年、この種の研究を実施する研究者は減少気味である。また、研究者や技術者の地震時挙動(揺れと倒壊)に対するイメージ力不足が、社会への説明力不足を招いている。さらに、耐震化の推進が叫ばれる中、耐震研究者は、耐震化誘導への解決策の提示や、耐震化の先導役が不十分なようにも感じられる。

筆者は、筆者の所属する環境学研究所の設立理念である「Think Globally, Act Locally.」を大事にしなが、地域の災害軽減のため、建築構造を専門とする地方大学の人間として研究・教育・減災活動を実践すると共に、水平展開可能な地域モデル作りをしていきたいと思っている。私たちにできることは、耐震化のための啓発・人材育成と地域での住民運動作り、地域の災害軽減に必要な基礎的な研究と総合的かつ実践的な研究、そして研究成果を地域に還元することである。中でも、地域における研究拠点である大学に籍を置く身としてできることは、研究者の一人として、地域(地盤・地理・歴史)を知ること、敵(地震・揺れ)の強さを知ること、己の実力(建物の耐震性・地域社会の対応力)を知り、災害軽減のための具体的な方法論を提案することだと思っている。研究成果を地域防災に還元するための新たな方策を考え、これを地域防災モデルとして国内外へと展開できるモデルに普遍化し、我が国及び世界の災害を軽減していく必要がある。

講演の場では、このような問題意識の下で進めている様々な活動について紹介を予定している。忌憚のない意見を頂戴できると幸いである。

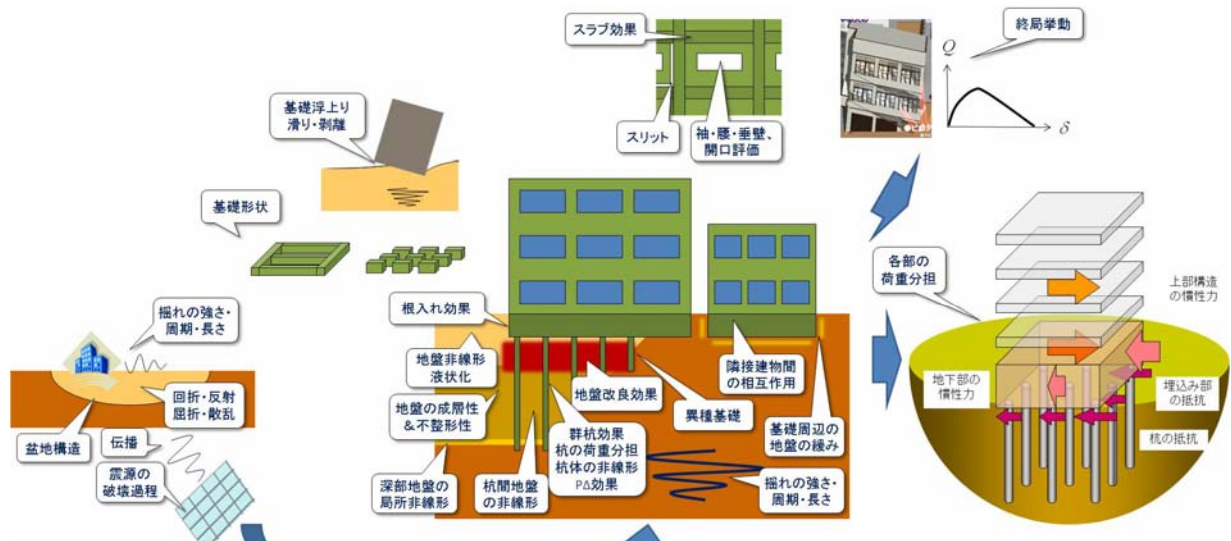


図1 筆者が当面の検討課題と考えている事項

ハイパフォーマンス・コンピュータシステム

1. 施設概要

本施設にはプロジェクトの主要課題を研究するために必要とされる高速演算専用のハイパフォーマンスコンピュータシステムが設置されている (図-1 参照)。

(1) 本プロジェクトの研究に適する HPC—PC クラスタ方式の採用

本プロジェクトが実施するような大規模な構造物—地盤系の地震応答解析では、1 台でもある程度の処理能力を有するコンピュータを数～十数台程度に並列に配置する方法 (低並列処理) が実用的であり、設備費用的にも有利である。そのため、一つの CPU はそれほど速くはないがネットワークを組んでトータルで高速となってコストパフォーマンスに優れた PC クラスタ方式を採用した。

並列処理する PC クラスタの性能向上は、PC クラスタを構成する一つのコンピュータ (計算ノード) の高速演算と共に、高速なネットワークも重要である。本システムでは転送速度が 10Gbps という超高速ネットワークを採用した。これにより、ワークステーションで採用されている高性能な CPU とこの超高速ネットワークを組合せた PC クラスタは、従来のミニスパコンのレベルに達している。

(2) 研究者に利用しやすいコンピュータ環境—Windows 環境の採用

従来型のスパコンおよび PC クラスタは、UNIX や Linux での利用環境であったが、本研究設備では、Windows 環境でシステムを構築することにし、多くの研究者が利用しやすい環境にした。

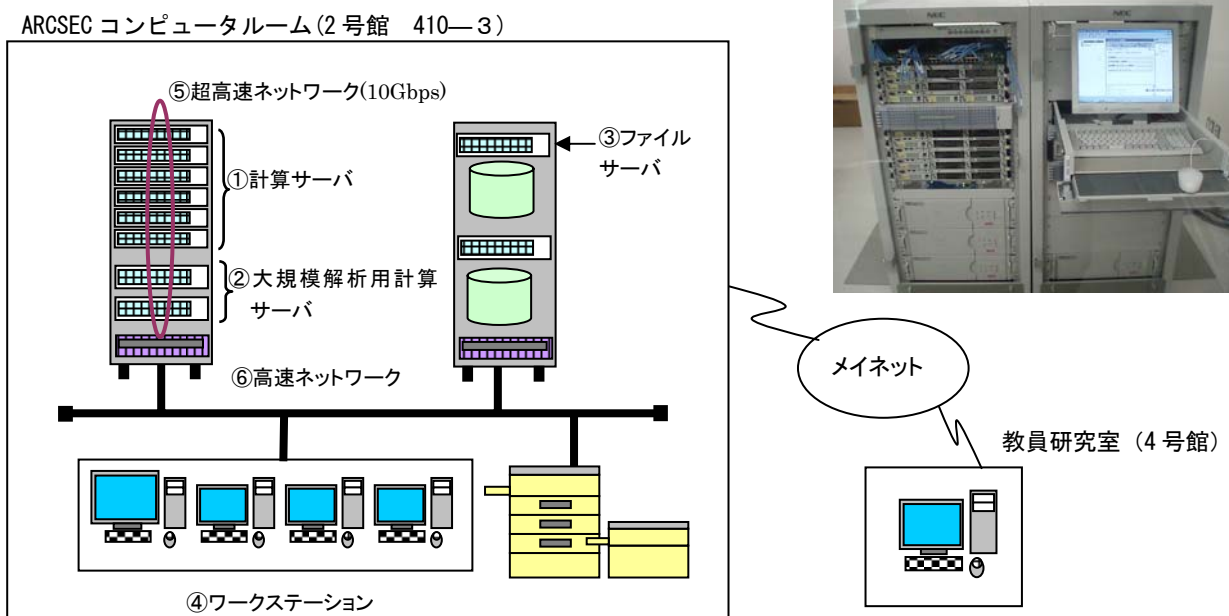


図-1 ARCSEC の HPC システム構成

装置の仕様概要 (①, ②・・・は図-1 中の番号に対応)

- ・ Windows ベースのクラスターシステム (OS: Windows Compute Cluster Server 2003)
- ・ 計算サーバ①, ②: 8 ノード (CPU 32 台) で理論性能は 348GFlops, Linpack ベンチマークでは 270GFlops
- ・ メモリー: 116GBites
- ・ 計算ノード間通信: ⑤最大 10Gbps の超高速通信と低い遅延の InfiniBand, および⑥1Gbps の高速通信 Gigabit Ethernet
- ・ 大規模な計算結果保持のための大容量のファイル: ファイルサーバ③ (2 台) で 3TBites
- ・ ユーザーエントリーおよびプログラム開発: ワークステーション④ (4 台)

2. どのような研究を行うか

本施設を利用する研究の例を挙げると以下のようである。

(1) 広域的な表層地盤—基礎—構造物—制震ダンパー系の地震応答解析による耐震検討

想定している震源断層から得られる地震動をもとに、広域的な表層地盤—基礎—構造物—制震ダンパー系の複合非線形地震応答解析を実施する。例えば、**図-2**のような長大橋に対して、地盤のモデル化、地盤と基礎の間のモデル化、基礎と橋梁を含めた全体系のモデル化、および橋梁に付加する制震ダンパーのモデル化を行い、それらを組合せて一貫したモデルとして複合非線形地震応答解析を行う。

(2) 進行性破壊を考慮した地震応答解析法の研究

設計地震動以上の想定外の大規模地震が発生したときに、橋梁の崩壊や崩壊に至るまでのプロセス—破壊メカニズムを求める。主部材も含めて破壊と判定された部材を除去（構造系を変更）しながら、橋梁システムとしての崩壊を求める方法、すなわち進行性破壊を考慮した地震応答解析の手法について考究する。例えば、**図-3**に示すように、トラス橋のような橋梁を対象にして複合非線形地震応答解析を実施し、対象橋梁の崩壊に至るまでのシナリオを解明する。

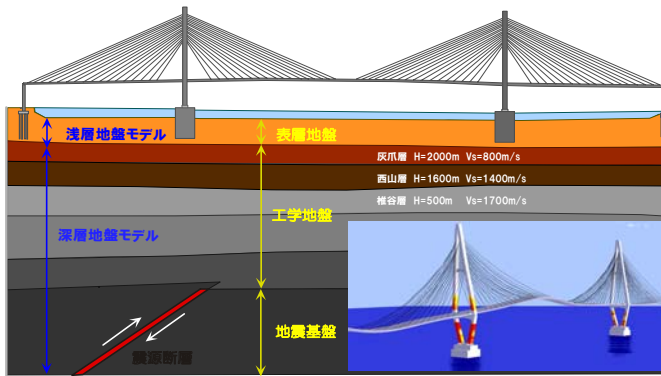


図-2 長大橋を対象とした構造物—地盤系の地震応答解析

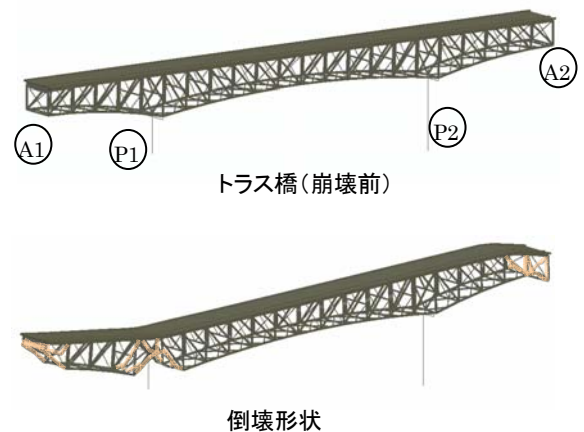


図-3 進行性破壊を考慮したトラス橋の解析

(3) 浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型液体貯槽の地震時スロッシング応答解析法の研究

長周期地震動を受ける浮屋根式大型液体貯槽のスロッシング応答の予測を目的として、液体をポテンシャル流体と仮定し、浮屋根を大たわみや塑性化が考慮できる有限要素に、液体を要素分割数が縮小できる境界要素にモデル化することによって（**図-4** 参照）、浮屋根と液体の非線形領域における応力・損傷過程の追跡を可能にする非線形構造・流体連成解析プログラムを開発し、2003年十勝沖地震で多発したシングルデッキ型浮屋根の損傷・沈没（**図-5** 参照）のメカニズムを解明する。

(4) コンクリート系の空間構造や容器構造物の地震時挙動の評価に関する研究

コンクリート系の連続体をベースとする各種の空間構造物や産業用の容器構造における振動特性の評価～想定する大地震時の挙動評価に関する研究を実施する。具体的には、基礎実験や解析手法の検討に加え、**図-6～8**に示すような実規模での検討を、非線形領域を含めて数値解析により実施する。

(5) 海溝型巨大地震時の自然堆積粘土地盤の破壊挙動の予測解析

詳細な鋭敏粘土の実験データに基づき構築される自然堆積粘土地盤の弾塑性構成モデルを組み込んだ有限変形水～土連成動的有限要素解析を用いて、長周期かつ継続時間の長い海溝型地震時において

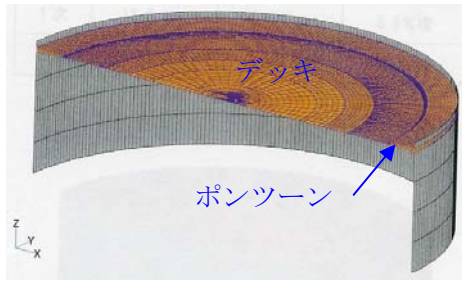


図-4 浮屋根式大型液体貯槽のスロッシング
応答解析モデル

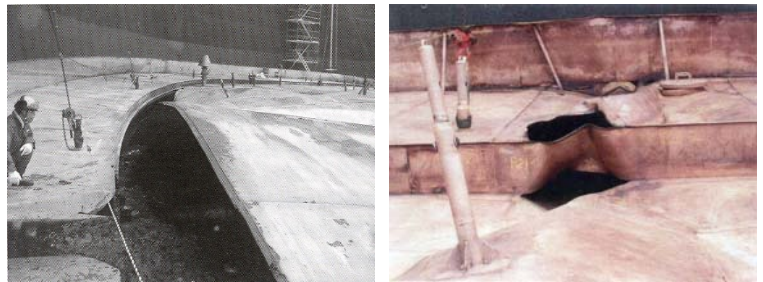


図-5 2003年十勝沖地震で多発したシングルデッキ型浮屋根のデッキ部の破断とポンツーン部の座屈

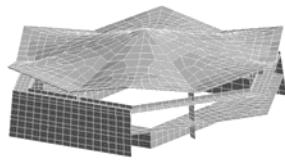


図-6 体育館の振動特性評価

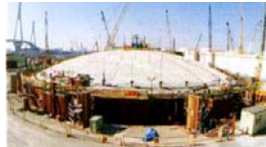


図-7 容器の耐震設計

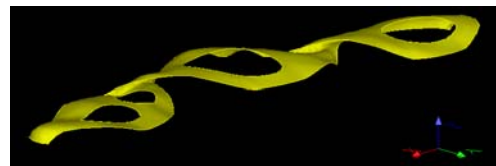


図-8 大規模公園施設の耐震性能評価

の自然堆積粘土地盤の変形・破壊メカニズムを解明するとともに、盛土などの地盤構造物や地盤一上部構造物系の被害予測シミュレーションを行う。

3. 期待される成果

本施設を利用する研究に期待される成果は以下のようである。

(1) 広域的な地盤一構造物の連成を考慮した橋梁構造物の耐震安全性を検証すると共に、耐震性向上のための効率的な制震ダンパーの設置方法を見いだす。この成果により、現在模索が続いている動的挙動が複雑な橋梁構造物の効率的耐震補強法が見いだされる。

(2) 構造物の破壊に至るまでのシナリオが解明され、構造物の崩壊に基礎を置いた耐震性能の検証法への道が拓ける。

(3) 浮屋根と液体の非線形性を考慮した大型液体貯槽のスロッシング応答解析プログラムを開発することにより、図-5に示したようなシングルデッキ型浮屋根のデッキ部の破断やポンツーン部の座屈など、線形理論では説明できなかった浮屋根の損傷・沈没のメカニズムを解明することができ、合理的な浮屋根の耐震強度評価法や耐震補強法の提案に結びつく成果が期待できる。

(4) 想定される大地震時における安全性や損傷レベルの推定、2次部材への影響の評価、などを定性的・定量的に評価可能とし、耐震設計手法の高度化に寄与する。

(5) 高精度の自然堆積粘土地盤の動的解析法の整備により、関東地震や安政南海地震時の自然堆積粘土地盤における甚大な被災事例のメカニズムが明らかとなるとともに、今後の海溝型地震時の自然堆積粘土地盤上の構造物の適正な被害想定が可能となる。

三次元地震波震動台

1. 施設概要

本施設はプロジェクトの主要課題を研究するために必要とされる三軸（水平二軸／垂直一軸）方向同時加振が可能な地震波震動台である。本プロジェクトで研究対象とする橋梁、大空間建築物や石油タンクなどの大規模構造物では、地震動の多方向からの同時入力効果が地震時の挙動に大きな影響を及ぼすことから、その効果を検証するために設置したものである。

本震動台は駆動方式として永久磁石方式を採用しているため、広い周波数帯域にわたって振動波形の精度が高く、実地震波も忠実に再現することができる。また冷却装置を必要としないため、無騒音・省スペース・省電力化が実現でき、メンテナンスにも費用がかからないという利点がある。

施設の外観を写真-1に、主要装置構成と総合仕様を表1と表2に示す。



写真-1 三次元地震波震動台

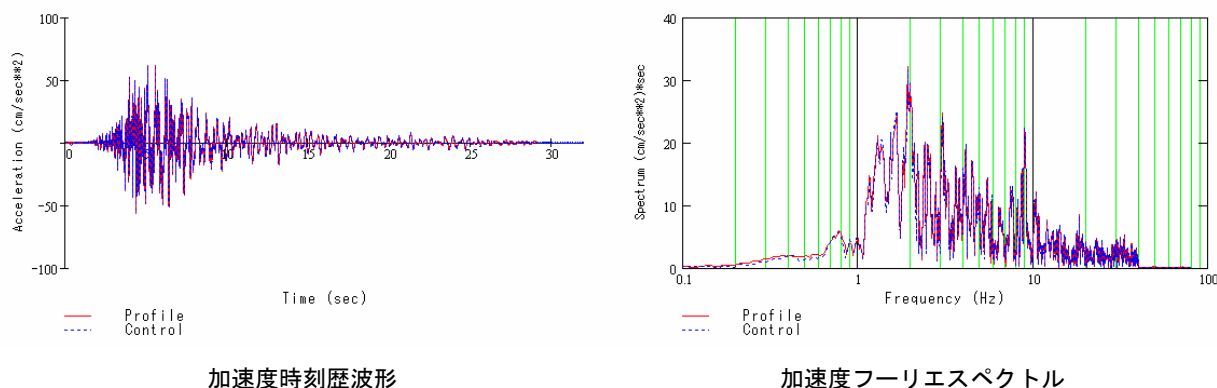
表-1 主要装置構成

永久磁石振動加振器(水平)	SSV-850LL	2台
永久磁石振動加振器(垂直)	SSV-850MM	2台
電力増幅器(プリアンプ内蔵)	SVA-ST-30KD	3台
地震波振動台	TBH-20K-3D-70T	1台
デジタル振動制御装置	DSC20-LASER	1台
1. 正弦波振動制御装置システム	DCS-SINE	1式
2. 衝撃波制御装置システム	DCS-SHOCK	1式
3. 地震実波形再現制御装置システム	DCS-TTH-SM	1式
三次元同時制御システム	DSC20-Dse3	1式
サーボ型加速度検出器	V405-BR	3台

表-2 総合仕様

加振方向	単軸方向(水平／垂直方向), 二軸同時, 三軸同時		
最大加振力		水平方向(X, Y)	垂直方向(Z)
	地震波	1.5tf (14.7kN)	2.0tf (19.6kN)
	正弦波(連続波)	0.75tf (7.35kN)	1.0tf (9.8kN)
地震波最大加速度		水平方向(X, Y)	垂直方向(Z)
	無負荷時	1.50G (14.7m/s ²)	1.50G (14.7m/s ²)
	1ton 載荷時	0.75G (7.3m/s ²)	0.86G (8.5m/s ²)
地震波(連続波)最大加速度		水平方向(X, Y)	垂直方向(Z)
	無負荷時	0.75G (7.3m/s ²)	0.76G (7.5m/s ²)
	1ton 載荷時	0.37G (3.6m/s ²)	0.43G (4.2m/s ²)
最大変位	水平方向: 400mm ^{P-P} 垂直方向: 150mm ^{P-P}		
最大速度		水平方向(X, Y)	垂直方向(Z)
	地震波	100cm/s	100cm/s
	正弦波(連続波)	50cm/s	40cm/s
周波数範囲	0.1Hz～60Hz		
振動台可動部質量	水平方向: 1.0ton	垂直方向: 1.3ton	
最大積載質量	7ton		
振動台寸法	2.0m×2.0m		

実地震波を再現した例を図-1に示す。目標波形（Profile）と再現波形（Control）が時刻歴上および周波数軸上で良い一致を示しており、所要の地震波が精度良く再現されていることがわかる。



加速度時刻歴波形

加速度フーリエスペクトル

図-1 実地震波の再現例（2003年十勝沖地震 K-NET 苫小牧 EW 波の時間軸を 1/10 に縮小）

2. どのような研究を行うか

本施設を利用する研究の例を挙げると以下のようなものである。

(1) 浮屋根と液体の連成を考慮した大型液体貯槽の耐震設計法/補強法の開発

2003年十勝沖地震では、大型石油タンクの浮屋根がスロッシング（液面動揺）により沈没し全面火災に至るといった甚大な被害が発生した（写真-2 参照）。本研究では、浮屋根と内部液体との動的連成作用を考慮した地震応答解析および震動台による縮小模型実験を実施し、浮屋根の損傷・沈没のメカニズムを解明するとともに、浮屋根の効果的な耐震補強法を提案し設計法として確立することを目的とする。

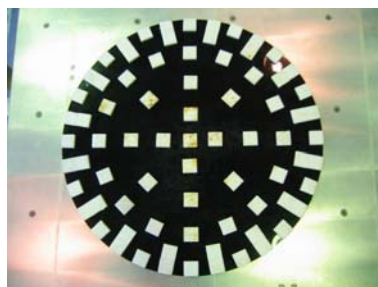
具体的には、浮屋根と液体との動的連成を考慮したスロッシング解析理論を整備する。線形ポテンシャル理論を基本とするが、必要に応じて構造・流体の非線形性を考慮する。平行して円筒貯槽浮屋根模型（写真-3, 4 参照）の震動台実験を実施し、理論および数値解析の妥当性を検証する。解析結果と実験結果を照合しながら解析精度を向上させ、実現象を再現できる解析手法として完成させる。以上の成果をもとに、浮屋根の損傷・沈没に至るメカニズムの解明を試みるとともに、浮屋根の効果的な耐震補強法を提案し設計法として確立する。



写真-2 2003年十勝沖地震における浮屋根の沈没とタンク全面火災



写真-3 円筒貯槽模型



ダブルデッキ型



シングルデッキ型

写真-4 浮屋根模型（浮力確保のため発泡スチロールを貼付）

(2) コンクリート系大空間構造物の耐震性能評価/耐震設計手法の高度化に関する研究

コンクリート系の“むくり”のある構造（アーチ、シェル）に対しては、従来からその変形・損傷・耐力・破壊モード等に関して多くの実験的・解析的な検討が試みられているが、殆どが静的な荷重に対するものである。近年、同種の大規模な構造物も建設される機会が増えているが、動的な特性に関する実験的研究は殆ど無く、上下動の影響の解明は未着手のままとなっている。本研究では、これらの構造物に対して、地震時特性及び動的な破壊までの現象解明と数値解析の検証を目的として実験的に検証し、分析を試みる。写真-5、写真-6、図-2は、予備的研究として行った静荷重下でのRCアーチの実験および解析結果を示したものである。



写真-5 静的加力実験装置



写真-6 RCアーチ試験体の例



図-2 数値シミュレーションの例

3. 期待される成果

本施設を利用する研究に期待される成果は以下のようなものである。

(1) 浮屋根貯槽模型の地震応答実験を実施することにより、解析手法の妥当性を実験によって検証しながら実現象を再現できる解析理論として完成させることが可能になり、写真-2に示したようなシングルデッキ型浮屋根の損傷・沈没メカニズムの解明や合理的な浮屋根の耐震設計法/補強法の提案に結びつく成果が期待できる。

(2) 一般に高い耐荷力を有するものの座屈や初期不整の影響が指摘され、設計に際しての耐力予測や安全率の設定に際しては多くの不確定要素があることが問題とされる“むくり”のある構造に対して、地震時挙動の解明と耐震性能の評価や、耐震設計法の高度化に有益な情報を得ることが期待できる。

大型構造実験装置

1. 施設概要

本施設にはプロジェクトの主要課題を研究するために必要とされる構造物耐震性能評価実験を行うための、大型フレームおよびアクチュエータを設置している (図-1 参照)。

(1) 実験目的に合わせて組み換え可能なフレームと油圧アクチュエータシステムの採用

構造物のライフサイクルに渡って取り替え不要な高機能制震ダンパー等の制震性能を実験によって、確認するため、実大サイズに近い供試体を設置し、実験可能な载荷フレームおよびアクチュエータを有する。载荷フレームは、梁柱をボルト接合によって剛結した自定式構造となっており、実験目的に合わせて組み換えすることで様々な载荷形式に対応可能である。アクチュエータ (加力装置) は、32bit CPU を搭載したコントローラによる高精度な制御が可能である。さらにコンピュータとのネットワークによるオンラインハイブリッド地震応答実験に対応するための基本的な装備を実装しており、制御ソフトウェアのアップデートによるシステム拡張に柔軟に対応可能である。

また、実験システムは油圧源を含め移動可能で低騒音であり、設置場所の制約条件が少ない。

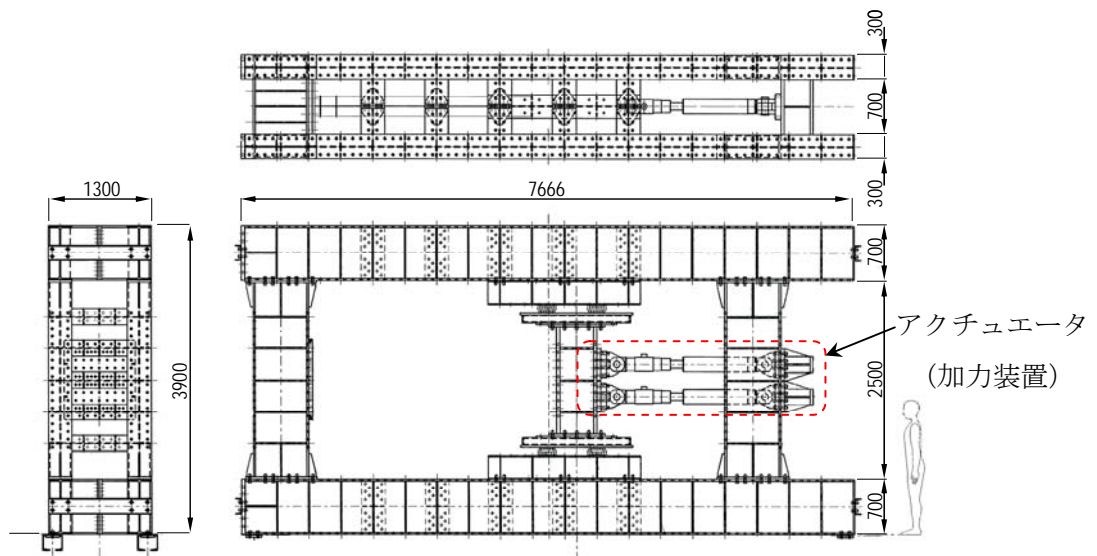


図-1 载荷フレーム概要

サーボアクチュエータ仕様 (1基あたり)

- ・ シリンダストローク (可動範囲) 500mm (± 250 mm)
- ・ 载荷能力 供試体に対して圧縮 1000kN, 引張 500kN
- ・ 载荷速度 圧縮 1.75mm/sec, 引張 3.5mm/sec
- ・ シリンダの変位制御精度 1/100mm

※上記サーボアクチュエータの並列設置により、実験供試体に対する载荷能力として、圧縮力最大 2000kN, 引張力最大 1000kN を可能としている。押し引きの交番载荷時では、 ± 1000 kN の加力が可能である。

(2) 研究者に利用しやすい制御環境

サーボアクチュエータの制御装置は、ジョグダイヤルによる直観的な操作系を採用しており、供試体の設置、実験、取りはずしまでの一連の作業が安全に、かつ容易に実施できる環境を構築している。さらに、制御プログラムによるサイン波形などの単純载荷を行うことが可能である。(図-2, 図-3)



図-2 アクチュエータ



図-3 制御コントローラ

2. どのような研究を行うか

本施設を利用する研究の例を挙げると以下のようなものである。

(1) 制震デバイスの性能実験

制震ダンパーの実用的設計手法および、複合非線形地震応答解析に必要な構成則を開発するための性能実験を行う。(図-4)

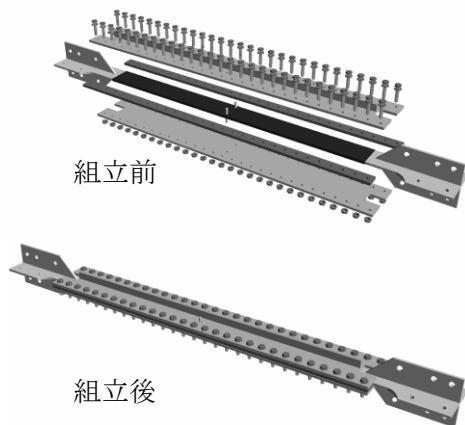


図-4 座屈拘束ブレース供試体概念図(左)と実験状況(右)

(2) 構造物-制震ダンパー系のハイブリッド地震応答実験

設計地震動以上の想定外の大規模地震が発生したときに、橋梁の崩壊や崩壊を制震デバイスによって損傷を最小限に留め、橋梁の機能保持するシステムを求める方法を考究する。

3. 期待される成果

本施設を利用する研究に期待される成果は以下のようなものである。

(1) 新設・既設橋梁に対する各種形状、材質の制震デバイスを開発・設計するために必要な信頼性の高い実験データを得ることができる。

(2) 実際の橋梁部材として実装した場合の地震時応答特性を数値解析とオンライン実験によってシミュレートすることで、最適な制震デバイスの選定・設置検討を行うことができる。

精密中空ねじりせん断試験装置

1. 設備概要

本設備は地盤材料の地震時挙動を把握するための中空ねじりせん断試験装置である（写真-1、図-1参照）。中空円筒供試体を採用することで、自然堆積地盤内の異方的な初期有効応力状態を忠実に再現した上で、純粋な繰り返し単純せん断応力を精密に載荷することが可能である。



写真-1 試験装置全景

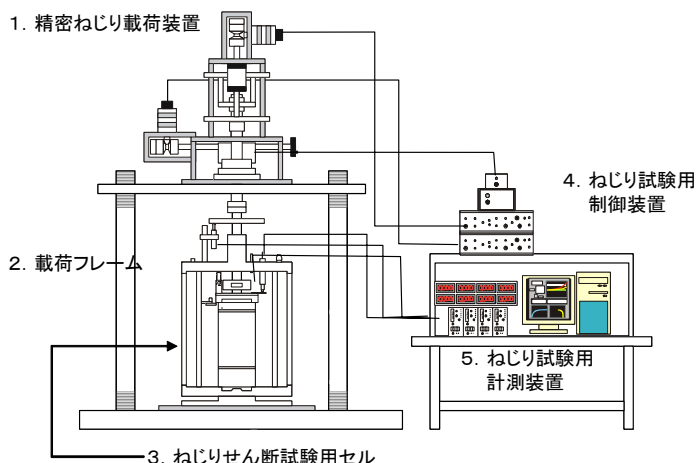


図-1 試験システム構成

以下に本機の特長を示す。

(1) 精密な繰り返し可能な載荷機構

AC サーボモータの駆動を2つの電磁クラッチならびに電磁ブレーキを用いた特殊機構によって、瞬時に正転、反転を切り替えて精密予圧ボールねじに駆動力を伝達する機構となっている。そのため、反転時のバックラッシュは全くなく、微小ひずみレベルから大ひずみレベルまでをカバーして精密な繰り返し載荷が可能である（写真-2参照）。さらに、載荷速度は0.0005～1.0mm/minの範囲で制御することができ、粘性土の繰り返し載荷試験に必須の極低速での繰り返し載荷が可能である。

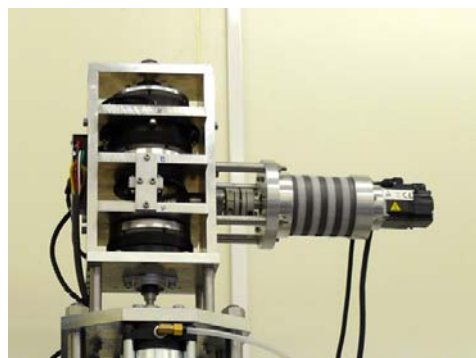


写真-2 繰り返し載荷機構

軸圧縮容量は10kN，トルク載荷容量は150N・mである。

(2) 拡張性の高い三軸セル

無駄を省いたシンプルな設計の三軸セルは、ロードセル、非接触変位計、回転角計等の各種の計測センサーをセル内部に設置するためのポートが多数準備されており、複雑かつ測定項目の多い試験に対応である（写真-3参照）。さらに、キャップ、ペダスタルを交換することにより、中空ねじりせん断試験の他、三軸試験も実施できる。荷重計測には、せん断時の偏心や耐圧、防水性にすぐれた平行平板型トルク・軸荷重兼用の2方向ロードセルを設置しており、微小荷重から大荷重まで広範な荷重レベルで線形性が極めて高く、高精度の荷重計測が可能である。



写真-3 三軸セル

2. どのような研究を行うか

自然堆積鋭敏粘土の動的挙動の解明と構成モデルの構築

中空ねじりせん断試験装置の最大の特長は、地盤内の常時応力状態を負荷した上で、地震時の繰り返し応力を純粋なせん断力として負荷できることである(図-2 参照)。そのため、図-3 に示すように、繰り返しせん断中に計測される応力～ひずみ関係や有効応力経路は両せん断方向に対して対称な挙動を示しており、本試験が精密に地盤材料の動的特性を把握できることがわかる。

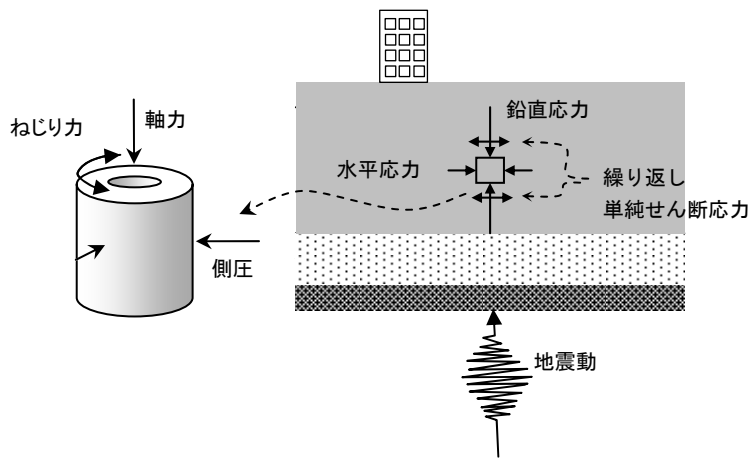


図-2 地震時の地盤挙動と中空ねじりせん断試験

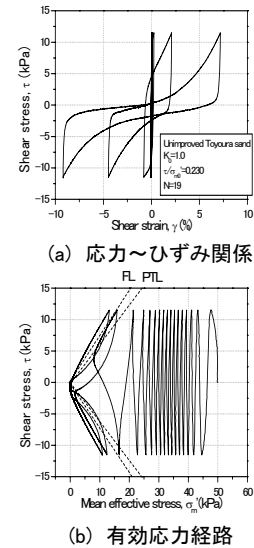


図-3 中空ねじり試験結果の例

本研究では、海溝型地震が発生した際に作用する長周期かつ継続時間が長い地震動を想定した地盤挙動の解明を行う。安政南海地震における東大阪、関東大震災における中川低地など鋭敏粘土を有する地盤では、過去の海溝型地震によって多くの建造物倒壊の被害が報告されているが、その原因は明確ではない。現時点において鋭敏粘土の動的性質はほぼ未解明なままであり、大変形が見込まれる海溝型地震時の地盤挙動を解明することは、上部構造物の耐震設計用の入力地震動を検討するためにも必須である。

具体的には、自然堆積粘土地盤から、乱れの少ない良質の不攪乱鋭敏粘土を採取し、精密中空ねじりせん断試験機を用いて各種の地盤材料実験を実施し、微小ひずみレベルから大ひずみレベルまでをカバーした鋭敏粘土地盤の動的特性を明らかにする。さらに、中空ねじりせん断試験から得られたデータを用いて、高精度構成モデルの構築を行う。

3. 期待される成果

粘土地盤の動的解析においては、有効応力解析はほとんどなされておらず、それに供する性能の構成モデルの開発も進んでいない。そのため、本研究の実験結果を反映した鋭敏粘土の構成モデルの構築を行う。その結果を組み込んだ動的水-土連成有限要素解析を実施することにより、海溝型巨大地震による長周期かつ継続時間が長い地震動に対する地盤の動的挙動の解明を行い、被害予測シミュレーションを実施する。さらに、一連の解析で得られた鋭敏粘土地盤の表層での地震応答を用いて、上部の地盤構造物への耐震設計用入力地震動について詳細検討を行う。