

[設計法概要]

土木構造物の耐震設計の動向と対応技術

松田 隆
大内 一

1. まえがき

1995年兵庫県南部地震における土木構造物の被害は旧耐震設計基準に基づき建設された構造物に多く見られたが、比較的最近の設計による構造物にも被害は及んだ。そのため、早急の復旧に用いられる仕様^{2)~4)}には、これまでの「関東大震災並みの揺れに耐えられる」から「兵庫県南部地震クラスの地震に対して余裕を持って耐えられる」あるいは「大地震にあっても最低限の機能を確保する」とした設計基本方針が打ち出された。具体的な耐震設計の変化としては、耐震設計の対象となる地震動の設定・構造物の機能保持と重要度の設定・構造物の地震時の破壊メカニズムの把握と予測、などに現れた。このような耐震設計の動きとしては、土木学会による耐震基準全般にかかわる基本姿勢^{5),6)}提示と、コンクリート標準示方書⁷⁾・トンネル標準示方書⁸⁾の改訂、各監督官庁による道路橋・鉄道構造物・港湾の施設などの構造種別ごとの耐震設計基準の改訂、さらに各自治体独自の既存あるいは新設構造物の耐震性の見直し⁹⁾などがある。

特に、耐震設計の基本姿勢として大きく変わったのは、2段階あるいは3段階の地震動の設定と、それぞれの耐震検討段階における機能保持の明確化である。このうち、大

きな地震動(レベル2)に対する耐震性の評価には、これまでの震度法を基本とした静的な地震力と躯体あるいは支持地盤の応力度の照査から、構造物と地盤の非線形性を考慮した動的応答解析による応力度と変形の予測法が用いられることになった。これらの耐震性評価に用いる技術の多くは兵庫県南部地震以前から開発されたもので対応はとれるが、想定する地震動の強さが大きくなったことから、それぞれの評価手法の適用性に関しては慎重な検討が必要である。

本文では、これらの新しい耐震設計法の動向を概説し、耐震設計に用いる種々の評価技術のうち、大林組が開発してきた固有の手法を中心に対応技術を紹介する。

2. 主な耐震設計基準類の改訂の動向

1995年1月17日の地震発生約1カ月後の2月27日に、早くも建設省が「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧にかかわる仕様」²⁾の通達を出した。これを皮切りに、運輸省が「鉄道の被災した再構築構造物の復旧仕様」³⁾(1995年4月)、「鉄道新設構造物の耐震設計にかかわる当面の措置」(1995年7月26日)、「港湾の施設の耐震設計にかかわる当面の措置」⁴⁾(1995年11月)の通達が出された。

Table 1 各種の復旧仕様の特徴
Tentative Specification for the Reconstructions

工種	道路	鉄道	港湾
基準の名称	兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関わる仕様	新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料	港湾の施設の耐震設計にかかわる当面の措置
設計基本方針	兵庫県南部地震クラスの地震に対して余裕をもって耐えられる橋梁とすることを目標とする。	兵庫県南部地震規模の地震が構造物の近傍で発生しても崩壊しない耐震性能を保有するように設計する。	大地震に遭った場合、ある程度の変形は許容するが、最低限の機能は確保する。
想定地震力	兵庫県南部地震において地震で最大の加速度が観測された地点の地震動を用いる。	検討に用いる設計想定地震は、兵庫県南部地震で観測された地震動を考慮して定めた地震動とする。	直下型地震が想定される場合には、地域の既往最大地震に兵庫県南部地震を設計対象地震に加える。
耐震設計法	橋全体計のねばり(変形性能)を向上させるため、震度法による設計に加えて、地震時保有水平耐力を動的解析によって照査する。	せん断破壊に対する安全性を、曲げ破壊に対する安全性より大きくする。崩壊などの壊滅的被害が生じない耐震性能を有するように照査する。動的非線形解析法を原則とする。	震度法による設計を基本とするが、耐震強化岸壁については必要に応じて神戸型の設計地震動による変形照査を行う。
液状化等に対する考え方	液状化に伴う地盤流動が予測される地点においては、地盤流動の影響を考慮する。橋周辺に存在する盛り土や護岸から離れた位置に基礎を設けることが望ましいが、出来ない場合には基礎の補強を含めて総合的に検討する。	液状化の判定には累積損傷度理論による判定法を用いる。この場合の地表面加速度および継続時間は既存の基礎設計指針による。また液状化を生じると推定される地層が傾斜している場合には、側方流動の影響について検討する。	液状化しない地盤と判断する等価N値を20から25程度に引き上げる。液状化させないことが原則であるため基本的に側方流動対策は考えない。

Table 2 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言の骨子
Principal Items of 2nd Proposal for Seismic Design Codes

耐震設計法	レベル2地震動については、構造物が損傷することを前提として、その程度に立ち入って耐震性能を照査する。このための合理的な耐震設計法を確立する。
耐震診断と耐震補強	二段階の耐震診断を行って、補強を必要とする構造物を選び、適切な優先順位に基づいて補強を行う。目標とする耐震性能は新設構造物と同等とする。
設計地震動の考え方	土木構造物の耐震性能照査で考慮する地震動としては「構造物の供用期間内に1~2度発生する地震動=レベル1地震動」に加えて「供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動=レベル2地震動」を考える。レベル1地震動に対しては原則として構造物が破損しないようにする。レベル2地震動に対しては構造物が損傷を受けることを考慮して、その損傷過程まで立ち入って照査する必要がある。
レベル2	地域ごとに脅威となる活断層を同定し、その震源メカニズムを想定することによって、地域ごとにレベル2地震を定めることを基本とする。
地上構造物 (橋梁)	レベル1地震動については損傷を発生させないことを原則とする。レベル2地震動については、重要構造物は地震後比較的早期に修復可能であることを、それ以外は構造物全体系が崩壊しないことを原則とする。レベル2地震動に対する構造物の動的応答に当たっては、弾塑性時刻歴応答解析を実施するのが望ましい。不静定次数の高い構造物については、鋼、コンクリートを問わず、損傷過程を考慮した終局変形性能の解析を行うのが、望ましい。構造物の耐震性を向上させるために免震・制震技術など新しい技術を積極的に導入すべきである。
地中構造物	レベル1地震動に対しては構造物の機能が維持させる。レベル2地震動に対しては構造物が損傷しても機能に重大に支障が発生せず、かつ短期間での復旧が可能な範囲内に損傷をとどめる。レベル2地震動に対しても地中構造物が所要の耐震性能を保有するため、可撓性を高めるための構造および材料を積極的に採用することが望ましい。幹線ライフラインについてはレベル2地震動に対して機能を維持するように計画し、これが困難な場合にはシステム面からの対策を取り入れる。
地盤 および 構造物基礎	レベル1の地震動に対しては上部および地中構造の機能を維持することを構造物基礎の耐震耐震性能の目標とする。液状化の可能性のある地盤に関しては地盤改良により液状化を防ぐことを一応の原則とする。レベル2地震動に対しては、上部および地中構造に重大な損傷が発生しないことを目標とする。液状化防止が困難な場合には、地盤の側方流動や沈下によって基礎に過大な変位が発生し、上部構造に重大な被害が生じないよう、基礎構造の強化や構造全体系の見直しを行う。

これらの通達の骨子を Table 1 に示すが、今後、本格的な耐震設計の見直しには、復旧仕様の考え方が踏襲されると思われる。

土木学会からは「土木構造物の耐震基準に関する第一次提言」⁵⁾ (1995年5月)、「同第二次提言」⁶⁾ (1996年1月)が打ち出された。第二次提言での骨子を Table 2 に示す。このほか、コンクリート標準示方書耐震設計編の改訂⁷⁾では限界状態設計法を基本とした断面設計と動的解析などによる照査に分けて評価する考え方が導入され、1996年7月に改訂が実施される。トンネル標準示方書⁸⁾では、直下型地震が考えられる地域での開削トンネルでの耐震設計を義務付ける方向と、塑性領域を考慮した照査が打ち出される (1996年6月)。

Table 3 に構造物系を中心とした耐震設計法の動向の比較を示す。土木学会については、基準化を急いだがコンクリート標準示方書耐震設計編⁷⁾について紹介する。実務対応が求められる鉄道関係は、新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料を、道路関係は1995年2月の建設省道路局通達「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料を取上げる。

設計の原則、方針や設計地震動については、コンクリート標準示方書耐震設計編では、「土木構造物の耐震基準等に関する提言」⁵⁾を受け、レベル1およびレベル2地震動

に対する限界状態レベルの設定を明らかにし、考え方の枠組みを定めている。これに対し、実務対応の迫られている鉄道や道路では、今回の地震規模に対して余裕を持って耐えられることを明言している。設計地震動についても、弾性応答加速度レベルで最大2Gまで設定している。これまでの最大レベルがおおむね1Gであることを考慮すれば、構造物により大きな変形性能を期待するか、強度型で設計する場合には断面を一層大きくしたりする必要がある。そうでなければ免震や制震技術の採用などが必要となる。

レベル2地震動に対しては構造物の変形性能に期待する設計となることから、照査に当たって基本的には時刻歴非線形応答解析が要求される。落橋の検討には、非線形域での変形を予測する必要がある。もちろん単純な構造の場合には応答スペクトル解析値をもとに、エネルギー一定則などに基づき非線形応答を予測することは可能である。地盤の変形が支配的な地中構造物や基礎の設計では、応答変位法が推奨されている。直接地盤との相互作用解析によることも可能であるが、構造物・地盤とも非線形性を考慮するには高度な解析プログラムが必要になる。断面性能の検討方針は、基本的にせん断破壊などの脆性的破壊を避け、所要の変形性能を保有していることを確認することである。土木学会では曲げ・せん断耐力比を2以

Table 3 耐震設計法の動向比較 (構造物系)
Major Characteristics of Seismic Design Standards Revised after the Earthquake

	土木学会 ⁷⁾	鉄道 ³⁾	道路 ²⁾
設計の原則or方針	1)限界状態1：震後機能健全，補修不要 2)限界状態2：震後機能回復容易，補強不要 3)限界状態3：構造物非崩壊	1)高架橋：現行の設計基準によるほか，兵庫県南部地震規模の地震が近傍で発生しても崩壊させない。 2)開削トンネル：大きな損傷を許容しない。	1)兵庫県南部地震において地盤上で最大の加速度が観察された地点の地震動に対し，余裕をもって耐えられる。(連続橋の場合，免震支承の採用を推奨)
設計地震動	1)レベル1地震動：限界状態1耐用期間内に数回発生 2)レベル2地震動：限界状態2 or 3耐用期間中発生確率極小で，活断層型とプレート境界型地震のうち影響の大きいもの	1)弾性加速度応答スペクトル：最大2.0G (G2スペクトル) 2)基盤面速度応答スペクトル：最大80kine	1)照査用水平震度：最大2.0 (1種地盤)，1.75 (2種地盤)，1.5 (3種地盤)
解析方法	1)解析方法 ・時刻歴応答解析 ・応答スペクトル法 ・応答変位法 (地中構造物) 2)構造モデル ・3次元または2次元FEM ・質点系モデル 3)力学特性モデル ・線形or非線形復元力モデル	1)解析方法 ・原則的に時刻歴非線形応答解析 ・非線形応答スペクトル解析 (基礎) ・応答変位法 (基礎，開削トンネル) 2)構造モデル ・質点系モデル ・地盤相互作用モデル ・骨組モデルによる静的解析 (応答変位法) 3)力学特性モデル ・非線形復元力モデル	1)解析方法 ・時刻歴非線形応答解析 ・応答スペクトル解析 2)構造モデル ・橋全体系を適切に表現できるモデル
性能検討	1)曲げおよびせん断に対する部材耐力安全性 2)曲げ破壊型の場合，部材変形性能に対する安全性 (曲げ/せん断耐力比 > 2.0)	1)曲げおよびせん断に対する部材耐力安全性 2)せん断安全度 > 曲げ安全度 3)部材変形性能に対する安全度検討 (目標応答塑性率：高架橋8以下，基礎 ~) 4)開削トンネルは曲げ圧縮破壊への留意要	1)保有水平耐力照査により，脆性的な破壊を生じないことを確認
細目	・軸方向鉄筋の定着長 ・軸方向鉄筋継手位置 ・横方向鉄筋配置間隔と中間帯鉄筋 ・横方向鉄筋の定着 ・帯鉄筋継手	・最小せん断補強量： 0.25% (一般部)，0.30% (部材端部) ・せん断補強鉄筋の継手&定着 ・軸方向鉄筋の継手&定着	・十分な横拘束筋，中間帯鉄筋 (量はコンクリート終局ひずみとの関係で算定) および十分な定着 ・原則的に軸方向筋の段落としては行わない。・落橋防止装置・十分な耐力と変形性能を有する橋脚基礎

上とすることで，一般には十分な変形性能を保證できるとしている。鉄道の場合，既に現行標準に靱性評価式が規定されている。道路では横拘束筋量で規定されるコンクリートの終局ひずみで決まる終局時曲率分布を積分した変形から靱性率を求める事になる。鉄道では，保有靱性率の関係もあり，目標応答塑性率8以下が望ましいとされている。

今回の地震でせん断破壊が多々見られたこと，そして今後部材により大きな変形性能を期待することから，中間帯鉄筋を含めた横補強筋に関するものが多い。間接的に補強量を増加させていることと，より良い拘束効果を保證するための定着方法に関する規定である。主筋段落し部での破壊も多く見られたことから軸方向鉄筋の定着に関する規定もより詳細に記述されている。道路では軸方向鉄筋の段落しは，原則的に行わないこととしている。その他落橋防止装置に対する一層の留意や，基礎については構造物と同等かそれ以上の耐力と十分な変形性能を

持たせることの必要性が記述されている。

地盤や基礎構造物の被害は，液状化と，それに伴う側方流動が原因していることが多かった。これまで，液状判定対象外の地盤でも噴砂跡から液状化の発生が確認された。この結果を受け，建設省や運輸省では液状化判定基準の見直しと，側方流動の影響を導入する方向にある。これまでの設計震度もしくは限界N値は引き上げられるが，新たにFL法であった道路橋示方書に限界N値が導入されることが文献9)に示されている。側方流動に関しては，基礎構造物に作用する受動土圧に関して，液状化層上部の非液状化層の土圧係数を3~4にする対応手法の導入が検討されている。

3. 大林組の耐震性評価手法

3.1 地震動予測手法

レベル2の地震動の設定には震源特性を反映した評価手

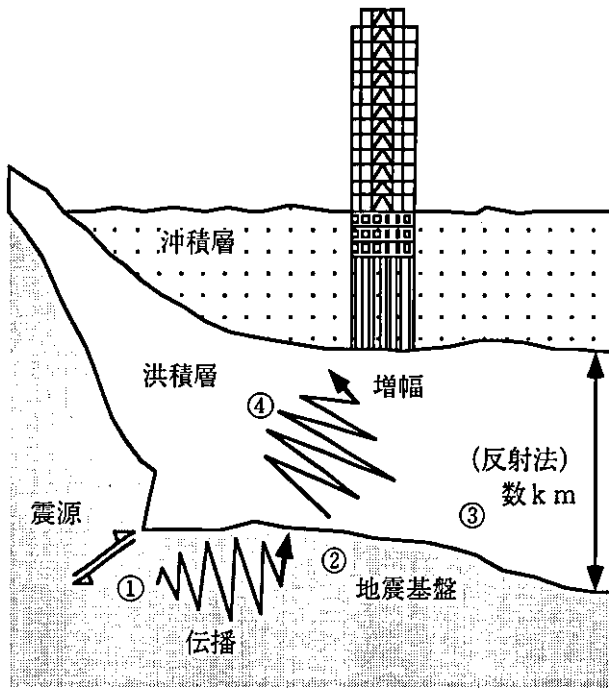


Fig. 1 耐震検用地震波の作製
Input Motions for Earthquake Response Analysis

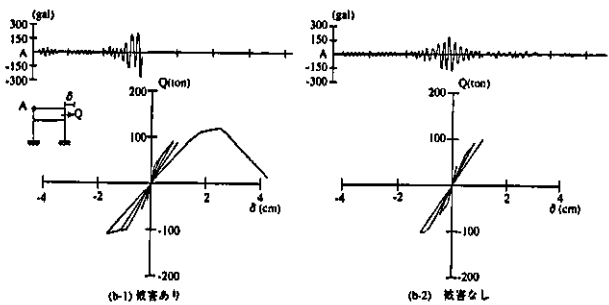
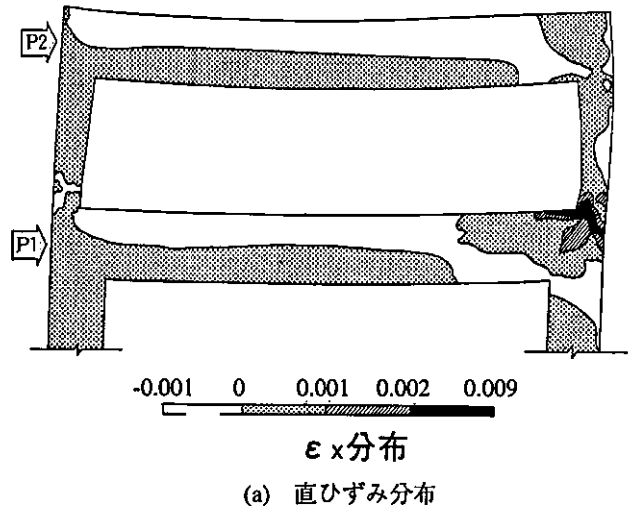
法を用いる。Fig. 1に設計入力地震動の設定の考え方を示す。ここでは、震源の場所や規模を深層地下探査結果や歴史地震などを基に設定①し、想定断層からサイトまでの地震基盤内での波動伝搬を計算する②。さらに、地下構造探査結果によりサイト近傍の洪積層内の地層構造を特定し、地層構造の不整形性を考慮した2次元あるいは3次元解析を用いて④、工学的基盤上面での地震波を設定するものである。この方法はサイトの深層地下構造を考慮できるため、予測精度は非常に高いと考えられる。

3.2 コンクリート構造物の非線形応答解析

レベル2の地震動に対して、構造物の弾塑性特性を考慮した時刻歴応答を実施し、損傷過程を考慮した終局変形性能を予測する必要がある。このとき、鉄筋コンクリートの部材に関しては、複合材料である故に複雑な荷重変位関係を示し、このことを地震応答特性に取り込むには高度な数値解析技術を必要とする。大林組が開発した鉄筋コンクリート部材の非線形解析法としてはFINALとDREAM-3Dがある。

FINALは、コンクリート系構造物や部材の材料非線形性を考慮した静的なFEM 3次元構造解析コードであり、構造物が交番荷重を含む静的外力や温度荷重を受けて破壊に至るまでの挙動を解析するのに有効である。主な特徴としては、鉄筋や鋼管とコンクリートの間で相対すべりが生じる現象や、プレキャスト部材などコンクリート間で相対すべり現象が考慮でき、コンクリートの打ち継ぎ、掘削など、途中で形状や荷重が変化する状態が解析できることである。

DREAM-3Dは、任意の形状を有する立体骨組の3次元



(b) 加速度応答波形と応力ひずみ関係

Fig. 2 非線形応答解析結果
Results of Nonlinear Response Analysis

弾塑性時刻歴応答解析を行うもので、コンクリート部材、鉄筋部材の弾塑性特性や幾何学的非線形性を考慮し、漸増荷重や地震波に対する骨組の応力・変形履歴、各層の復元力特性、建物や橋脚の弾塑性挙動等が追跡できる。その他の特徴としては、静的解析の場合には、増分解析に先立って初期解析を実行することが可能で、常時荷重の影響を考慮できることである。動的解析では、直接積分法により、地震荷重時の他、点加振力に変換された風荷重による動的応答を求めることができる。部材の塑性化により生ずる不釣り合い力を解除することができるため、実際の応力状態を良好に再現することができる。また、構造物が大規模な場合、構造物を部分構造として処理するサブストラクチャー法が適用できる。

Fig. 2は1989年ロマプリータ地震で崩壊した2層形式の鉄筋コンクリート製高架橋橋脚のシミュレーション解析結果を示している。(a)はFINALによる破壊直前のひずみ状態と変形を示すもので、2層部柱付け根に大きなひずみが発生し、この部分の破壊が橋脚の崩壊の原因となったことが示されている。(b)は加速度応答波形と応力ひずみ関係を示すもので、(b-1)は崩壊した橋脚を、(b-2)は健全であった橋脚を対象としており、それらの被害の有無に関する事実関係が再現できていることがわかる。

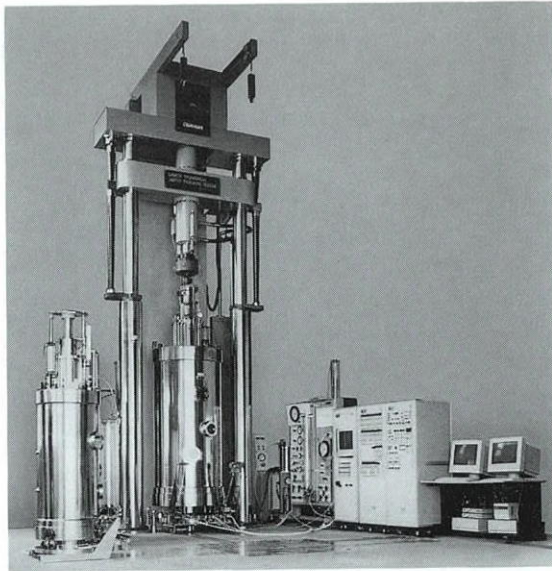


Photo 1 大型三軸試験装置
Large Scale Triaxial Testing System for Soil

3.3 地盤の動的物性値の評価技術

地上構造物における地表面応答加速度や地中構造物における地盤変位の評価に、地盤の応答解析は非常に重要な位置を占めており、このとき、地盤物性値の評価が問題となる。これら地盤の物性値は、標準貫入試験、PS 検層などの原位置試験と、サンプリング資料による室内土質試験を用いて設定する。地震応答解析に用いる物性値のうち、初期せん断剛性は原位置試験から、その他の減衰定数、動的変形特性は土質試験結果で与えることができる¹⁰⁾。土質試験は供試体の不攪乱採取技術と試験体加力加圧装置および計測装置の精度を向上することが重要である。大林組ではその一環として、大型の3軸試験装置 (Photo 1) を導入した。この装置ではφ30cm×60cmおよびφ50cm×100cm 供試体の試験が可能である。この大型試験装置を用いることで礫やマサ土など、比較的大きな粒径を含む地盤での物性値を直接求めることができるようになった。

3.4 地盤～構造の相互作用を考慮した地震応答解析

大林組で開発した代表的な地盤～構造物の連成地震応答解析として、3次元動的有効応力解析法 (液状化解析法) EFECT, 液体を含む軸対称地震応答解析法 ABLE がある。

液状化現象を主な解析対象とする EFECT は Fig. 3 に示す構成となっており、以下のような特徴がある。

- 1) 微小ひずみ領域から液状化に至る幅広い変形状態に対応できる構成式を有している。
- 2) 杭基礎や構造物の非線形も考慮できる。
- 3) 掘削や盛土の建設過程を考慮した非線形初期応力解析, 圧密解析, 固有値解析が整備されている。

Fig. 4)にEFECTによる護岸の地震時挙動に関する解析結果を示す。

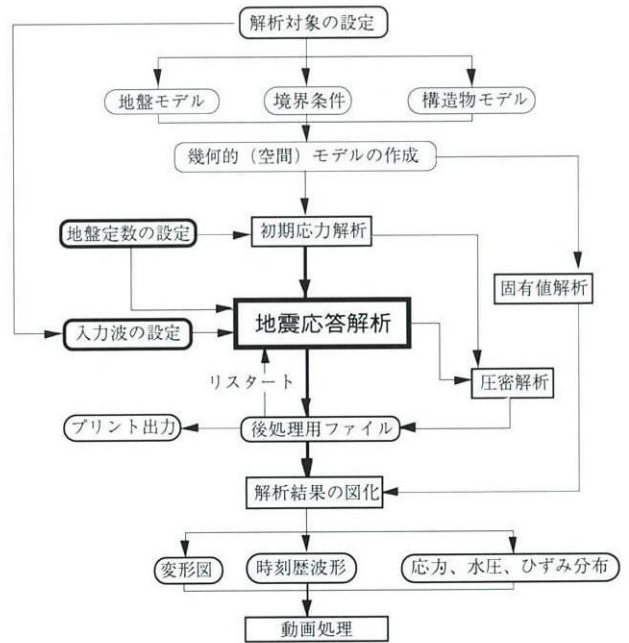


Fig. 3 人工島の地盤沈下量
Ground Subsidence of Man-made Island in Kobe

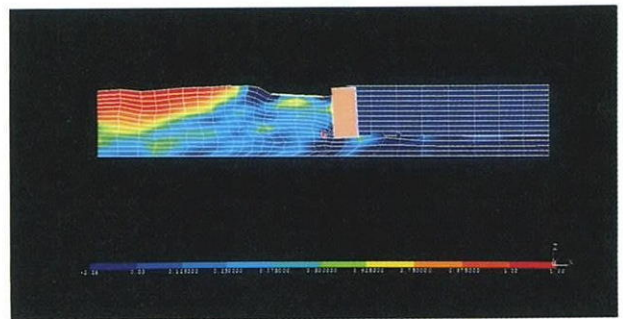


Fig. 4 護岸の液状化解析
Liquefaction Analysis

ABLEは、軸対称構造物あるいは3次元性を考慮すべき構造物の地震時挙動予測に用いることができる。

その特徴は以下に示すものが挙げられる。

- 1) 構造物～液体～地盤の連成振動解析が可能である。
- 2) 運動方程式の解法は振動数領域での複素応答解析法。
- 3) 地盤の境界条件はエネルギー伝達境界や粘性境界を用いることにより、地盤の無限性が表現できる。
- 4) 群杭はリング杭仮定に基づいた円筒にモデル化され、その置き換えは自動化されている。
- 5) 等価線形化機能が組込まれている。
- 6) 加振方向は水平 (1次元展開) と上下 (同0次元展開) であり、基盤全振幅入力, 下部に粘性境界を用いた入射波入力および任意点の点加振が可能である。
- 7) 静的解析と動的解析の組合せによって、構造物の耐力の検討ができる。
- 8) 地盤の液状化安全率 FL が算定できる。

Fig. 5)には、ABLEによるLNG地下式貯槽を対象とした解析例を示す。この解析によって、構造物の応答と壁体に生じるひずみが良好に再現できていることがわかる。

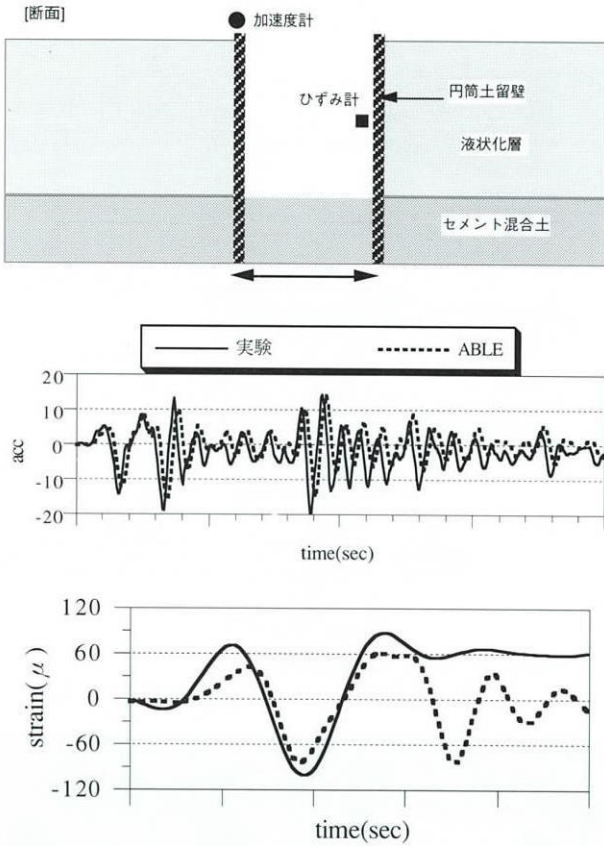


Fig. 5 円筒土留の地震時挙動
Earthquake Response of Cylindrical Earth Retaining Wall

3.5 振動実験手法による構造物/地盤の地震時挙動再現

新たな形式の構造物や、数値モデルの組立が困難な形式の構造物における地震時挙動の把握や耐震設計検討手法の開発に模型振動実験が用いられることがある。大林組には、大型の振動台実験装置 (Photo 2) と、カリフォルニア大学との共同開発である遠心載荷模型振動実験システム (Photo 3) がある。これらの装置は、大型であるとともに、高精度な地震再現装置と地盤作製装置が備わっている。これらの設備は、液状化地盤の杭や土留に作用する地震時土水圧の評価や非線形振動の再現に有効に用いられている。

4. おわりに

ここでは、土木構造物の耐震設計法の改定の動向と大林組の新しい基準に対応する耐震関連技術を紹介した。このほか、耐震性向上に対する工法に関しては、コンクリート構造物の炭素繊維補強や、TOFT工法などの地盤改良における大林組固有技術が多数ある。また、広域的な地震被害予測と対策立案には大震災対応システムが適用でき、これら耐震設計評価技術・高耐震化工法技術・地域被害予測を組合せることによって、要求される耐震性と経済性を両立させた合理的な高耐震構造物が実現できると考えられる。

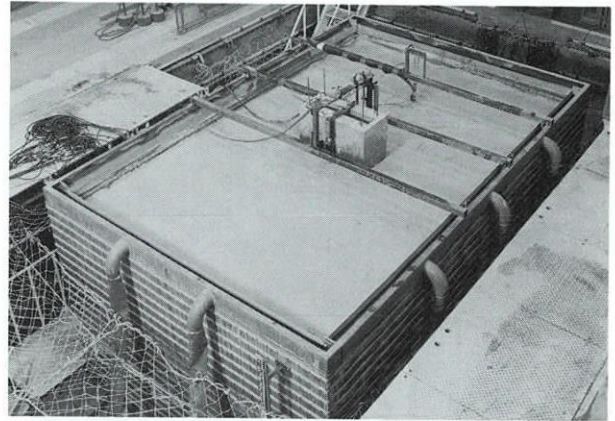


Photo 2 大型振動台試験装置
Large Scale Shaking Table System

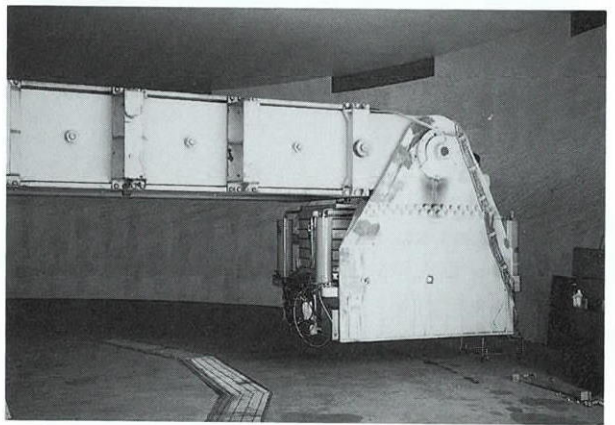


Photo 3 遠心模型振動試験装置
Earthquake Simulator on the Centrifuge Testing System

参考文献

- 1) 大林組技術研究所：兵庫県南部地震被害調査報告書，(1995)
- 2) 建設省：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧にかかわる仕様，(1995)
- 3) 建設省：鉄道の被災した再構築構造物の復旧仕様，(1995)
- 4) 建設省：港湾の施設の耐震設計にかかわる当面の措置，(1995)
- 5) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第一次提言」，(1995)
- 6) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，(1996)
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書耐震設計編，(1996)
- 8) 土木学会：トンネル標準示方書，(1996)
- 9) 日経BP社：日経コンストラクションNo.137，(1995)
- 10) 松田 隆，後藤洋三：等価線形化地震応答解析法に用いる地盤の動的定数について，第45回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部，(1990)