

Eーディフェンスの長周期地震動対応改造工事

その背景、工事の概要、改造後の性能

兵庫耐震工学研究センター 運営監理室長 阿部 健一



はじめに

Eーディフェンスは、1995年兵庫県南部地震を契機に、実規模構造物の破壊過程解明を目的として計画され、最大重量1,200tの構造物を搭載し、三次元の揺れに加えて、三方向の各軸の回転も与えて破壊させることのできる世界最大規模の震動台です。

Eーディフェンスの大きな特徴は、兵庫県南部地震の揺れ、すなわち高速道路や木造住宅等に甚大な被害を与えたキラーループ（周期1.0秒～2.0秒で大きな速度値となる地震波成分）の再現が可能なこと。2005年4月の運営開始以降、数々の実規模構造物の震動破壊実験が行われ、2012年10月末までの7年半で、60シリーズの実験を実施してきました。現在は、運転を停止し2013年3月末の完成を目指して、表題に示す長周期地震動対応改造のための現地工事を実施しています。本稿では、Eーディフェンスの長周期地震動対応改造工事について、その背景と必要性、工事の概要及び改造後の性能について説明します。

Eーディフェンスの性能と改造に至る経緯

図1に、震動台とそれを動かすための加振機構を示しました。長さ20m、幅15m、高さ5.5mの鋼製箱型震動台（重量775t）を、加振機と

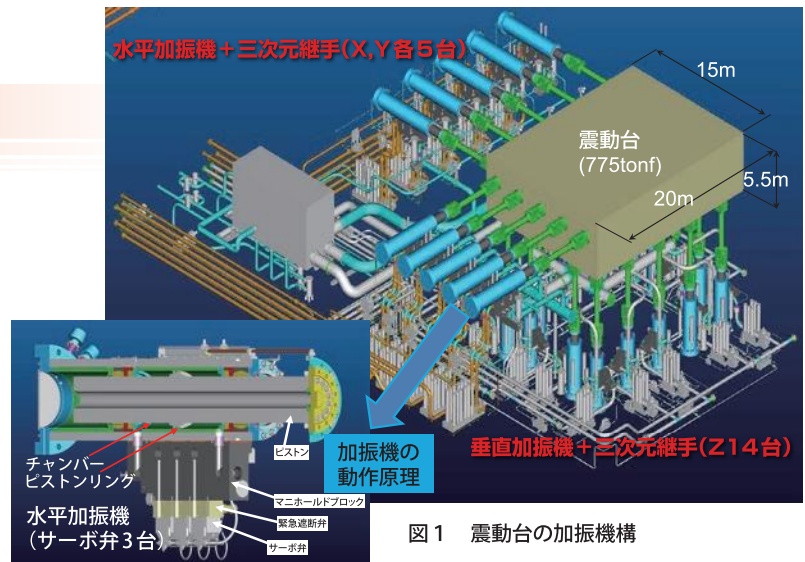


図1 震動台の加振機構

三次元継ぎ手を1セットとして、水平X及びY方向にそれぞれ5セット、垂直Z方向に14セットの合計24セットの加振機と三次元継ぎ手にて支えています。加振機は、ピストンが一方方向に出入りすることにより震動台に揺れを与えるものであり、三次元継ぎ手は、ベアリングのように自由に動きながら、加振機からの力を震動台に伝えるとともに震動台を直接支えています。この震動台に最大重量1,200tまでの試験体を搭載して、水平には変位±1.0mのストローク、最大速度2.0m/sで、鉛直には変位±0.5mのストローク、最大速度0.7m/sにて加振させることが可能です。また、各軸回りには、±2.5度の範囲で回転動を与えることが出来ます。震動台上で試験体が揺れているときには、試験体に加わった力により試験体が倒れたり回転しようとするため、これらの力に抵抗しながら3軸方向の揺れと3軸周りの回転を与えています。

加振機には、水平の場合に1機あたり3台、垂直の場合は1機あたり1台の合計44台のサーボ弁が装備されています。サーボ弁は、電気信号として入ってくる揺れの指令を高圧油の流れの変化に変えて、その高圧油を加振機内のチャンバーに送り出してピストンを動かすものです。

図2に震動台を動かすための油の循環経路を示しました。主油圧ポンプユニットで約28kL/分の高圧油が送り出されますが、高圧油循環システムの維持に約20kL/分が消費されるので、サーボ弁で加振機を動かすため振り分けられる流量は約8kL/分だけとなります。Eーディフェンスの性能を引き出すためには、最大20kLの容量の高圧油が必要であり、常に循環させながら主アキュムレータに高圧油を蓄え、これを放出して震動台を動かしています。この20kLという容量は、兵庫県南部地震の揺れの1.3倍の強さとその揺れの時間長から決まるものです。

ここで、Eーディフェンスの代表的な性能を表すものの例として、水平方向の揺れの周期と揺れの強さである限界の加速度との関係を表す限界性能線を図3に示しました。同時にEーディフェンスの利用領域とかつて存在した多度津の振動台の性能も示しました。

利用領域としては、Eーディフェンスの性能の特徴を生かし、兵庫県南部地震のような内陸直下型地震の地震動を中心に加振実験が実施されてきました。具体的には、0.2～2.0秒の周期範囲で速度が大きく、継続時間が短く概ね1分以内の記録が用いられ、破壊現象解明を目的とした実験が多くを占めています。しかし、近年、長周期地震動の影響について研究を進める必要性から、こうした種類の加振実験も、この性能線上では、可能となっていますが、現実には、アキュムレータ容量の制約などから加振のために必要な油量を供給することが出来ず、水

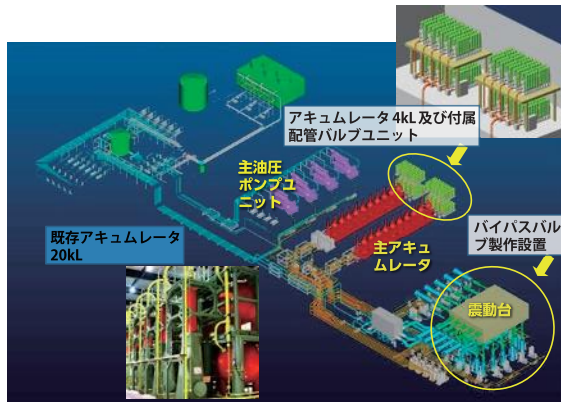


図2 作動油の循環経路と主な改造箇所

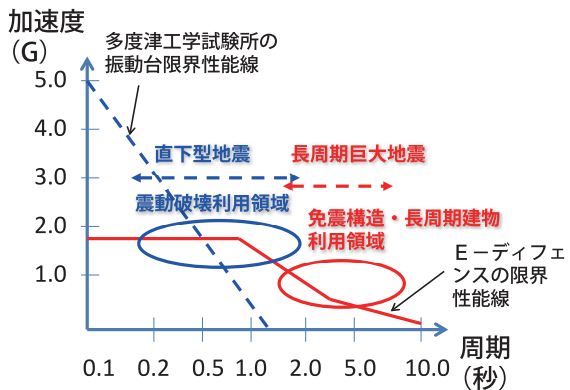


図3 Eーディフェンスの限界性能線とその利用領域

平2方向の加振に限定し、非線形増幅系システムを付加して実験を実施しています。一部、破壊に至るまでの実験も行っていますが、むしろ機能維持の証明をする実験が主となっていました。

しかし、2011年3月11日に、M=9.0の東北地方太平洋沖地震（以降「東北地震」と呼ぶ）が発生し、この時、防災科研の観測網であるK-NET等を中心に数多くの地震動記録が得られ、改めて巨大海溝型地震の揺れの特徴が明らかとなりました。日本海溝下のプレート境界に沿って広範囲に断層のずれが170秒間に渡って発生し、そのため本震の揺れは東日本全域で6分以上継続しました。防災科研では、東北地震後いち早く、この巨大海溝型地震の揺れの再現性について検討を行いました。そして、改めてその揺れを再現する場合、加振機への供給油量が不足することを明らかにし、改造提案に至りました。この改造を行うことにより、震動台の利用領域を図3に示す長周期巨大地震の揺れにまで広げ、南海トラフのずれによる連動型巨大海溝

地震に対する減災対策にも資するものと期待されています。

改造工事の概要

供給油量を増やす手段として主アキュムレータの増設が不可欠ですが、このような巨大海溝型地震における記録波や想定波においては、既存のアキュムレータ容量20kLに対して数倍の油量消費が想定されます。この場合、単にアキュムレータ設備容量をそれに合わせるのは、現実的ではありません。許容範囲内の4kLの容量増設を行うと共に、巨大海溝型地震の記録波や想定波の特徴とEーディフェンスの限界性能線を考慮し、より長周期化したとき、巨大海溝型地震の揺れは直下型地震の揺れほど加速度が大きいと見られるため、稼働させる必要のない加振機が発生します。それらを休ませ、その分の油量を他の加振機に供給するバイパス機構を付加し、地震動の特性に合わせた加振を目指しました。主な改造箇所は、先の図2に示しています。

長時間加振を可能とするため、加振のための供給油量の蓄油を行う主アキュムレータの吐出容量を20kLから24kLへ増加させるべく主アキュムレータの増設工事を行います。現状では、図2のような1kLのピストン型アキュムレータを20基装備していますが、工期並びにコストを精査し4kLの増設は、主遮断弁等のアキュムレータと同型のブラダ型アキュムレータを360本設置することとしました。

さらに、巨大海溝型地震による揺れの特徴である比較的大きな速度で長時間の揺れを再現するため、長周期地震動の特徴にあわせて加振のため使用する加振機本数を減らすことで消費する油量を節約し長時間加振を実現させています。そのため、24本の加振機のうち震動台4隅8本を除いて、サーボ弁への油の供給をバイパスさ

せ加振機の休止を可能とするバイパスバルブを装着する改造を実施しました。図4に示すように、水平加振機では、X方向、Y方向とも間の3機(X2～X4及びY2～Y4)にバイパスバルブを取り付け、必要に応じてサーボ弁への油の供給を切り替え、推力を生じさせず他の加振機に追従して動くようにしました。垂直加振機では、Z6とZ13にのみこのような切り替え可能なバイパスバルブを装備し、四隅以外の加振機には、必要に応じてバイパスバルブが装着可能なようにしました。その結果、地震波の特徴に合わせて、それぞれの加振機のバイパス機能のオンオフによる組み合わせの加振を準備することで、限界性能線上での長時間加振が可能となりました。このようなバイパスによる加振機の機能切り替えを行うため、震動台の制御系並びに油圧・油量供給制御系の改造を配管増設と併せて実施しています。また、アキュムレータ増設や配管増設に伴い、油の汚れを取り除くフラッシングが必要なことから、新しい油への入れ替えも行っています。なお、震動台の制御機器の性能上の制約から、長時間の加振の限界としては、一回の実験で、17分余りとなります。これに対応して、膨大なデータ収録を可能とする計測システムの改造や長時間の加振実験映像を短時間のうちに変換し再現する映像システム

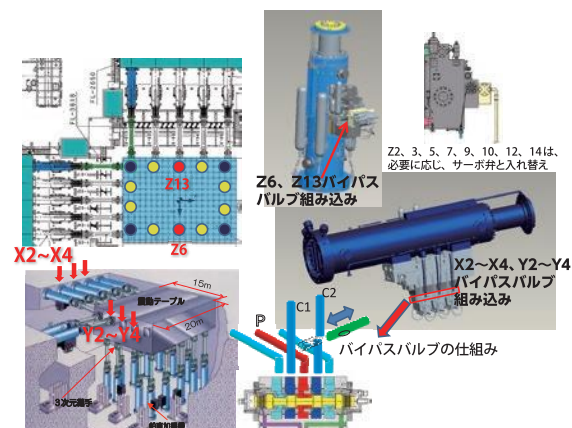


図4 バイパスバルブが追加された加振機

の改造も実施しています。さらに、長周期挙動特性をもつ試験体により性能検証を行い、今後の長周期巨大地震の揺れに対応する実験が可能であることを確認します。

改造後のEーディフェンスの性能

長時間加振が可能になったことにより、今後は、大加速度加振での利用を除けば、限界性能線の範囲で短周期から長周期に至る幅広い周期の地震動を模した加振実験が可能となります。

表1に、東北地震の際に防災科研のK-NETで観測された代表的な記録波（仙台波、岩沼波、古川波。いずれも被災県での波）と想定されている東海・東南海地震の際の名古屋三の丸地区の予測波（三の丸波）及び兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅において観測されたJR鷹取波について、Eーディフェンス改造の前後で各地震波を再現するために必要な油量を示しました。改造前は、JR鷹取波の1.3倍までの強さの加振が可能でしたが、他の巨大海溝型地震波の再現には、現在のアキュムレータ設備容量（20kL）の倍以上の設備容量となるため現実的ではありませんでした。改造後は、地震波の特徴に合わせてバイパス機構を活用することにより、多量の油量消費をする地震動の加振を可能としています。三の丸波の場合、水平各2本加振機をバ

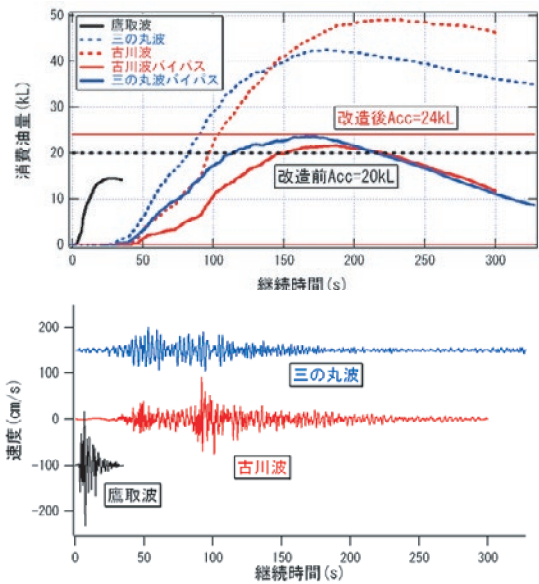


図5 油量消費の時間経過と速度波形
(バイパス機構の使用により巨大地震の波形が加振可能)

イパスさせるパターン2、古川波の場合、これに加えさらに垂直加振機2機もバイパスさせるパターン2Vを選択することで、消費油量が増設後のアキュムレータ容量以下となり加振可能になることが分かります。図5では、巨大海溝型地震の古川波、三の丸波とJR鷹取波の油量消費と時間経過を比較しました。巨大海溝型地震による記録波の再現には、地震波の特性に合わせて必要な加振機のみを動かせるバイパス機構が有効であることが読み取れます。ただし、有効に働く加振機数を減らすことになるため、これまでも増して実験前に加振機の推力チェックを入念に行う必要があり、油量消費量とともに加振機推力評価を行うシステム整備も行いました。

おわりに

1995年の兵庫県南部地震以降、日本列島は、活動期に入ったと言われ、2011年に東北地震という連動型の巨大海溝型地震が発生し、さらには、首都直下地震や南海トラフによる連動型の巨大海溝型地震の脅威が叫ばれる地震災害のリスクの大きな時代にあります。そのような中で、改造後のEーディフェンスは、減災研究の非常に重要なツールとしての役割を担うものと確信しています。

加振波	改造前		改造後	
	消費油量	Acc容量	消費油量	バイパス機能: Acc容量
仙台波	23.2	20	23.2	バイパス無し
岩沼波	31.7		23.3	パターン1
三の丸波	42.5		23.6	パターン2
古川波	49.1		21.7	パターン2V
JR鷹取波	14.5		14.5	バイパス無し

(単位: kL)

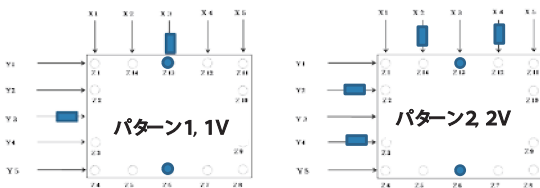


表1 改造前後の消費油量の差