

地震波に含まれる衝撃波動の計測

塩井幸武*・滝田 貢**・境 友昭***

Measurement of Impact Waves in Seismic Waves

Yukitake SHIOI*, Mitsugu TAKITA** and Tomoaki SAKAI***

Abstract

Against the theory that the main causes of collapse of structures in past large earthquakes depend on bending moment and shear force due to extraordinary loads, the authors have another opinion that they shall be impact in seismic waves unable to measure with the seismograph of SMAC type. To prove the presence of impact in seismic waves the authors devised a new seismograph with wide-range up to 2,000 Hz and installed it at Tsukuba City. The records measured near field earthquakes, approved that the seismic waves include waves with very short periods but showed small acceleration. A series of dropping tests brought out the possibility of impact waves with large acceleration and very short periods.

Key words: Earthquake, Seismic wave, Impact wave, Seismograph, Wide-range seismograph, Seismic observation

1. はじめに

大地震時に極短周期の衝撃波動の存在する可能性がある。特に、三陸はるか沖地震（1994年、M=7.5）、兵庫県南部地震（阪神大震災、1995年、M=7.2）は上下動によると推定される被災が目立っている。このような被災は瞬間的に発生するので建物の内部や橋上の人々は避難の余裕がない。極短周期波動の存在は学術上、認知されていないが、大地震を体験した多くの人々が証言しており、その波動で説明した方が合理的な現象も見られる。

極短周期波動による被災が顕在化したのは1978年の宮城県沖地震（M=7.4）である。3つの大地震で衝撃波動によると見られる被災に共通するのは比較的硬い地盤上または剛性の高いケーソン等の基礎上で発生していることである。これらの被災は、既往の設計で用いる水平力による曲げモーメントでは説明し難く、破壊箇所や最大の曲げモーメントの発生箇所も異なることが多い。

衝撃波動としては杭を打設する際に杭体の中を伝播する波動が典型な例である。加速度の周期は1,000 Hzを超える。被害の形態が杭の打撃時に発生する破損に酷似しており、大部分の現象は上下方向の衝撃波動で合理的に説明できる。

しかし、地震時の衝撃波動を捉えるのは既存の地震計では困難である。そこで高周波の地震波動を捉えられる広帯域の強震計を試作し、極短周期波動の存在を検証するところから研究を進めることとした。

研究の目的と目標は次のように設定した。

- (1) 過去の大地震における短周期波動による被災事例の検証
 - (2) 数100 Hzの高周波波動を測定可能な広帯域強震計の試作
 - (3) 広帯域地震計による地震観測
 - (4) 本強震計と既設の強震計による記録の比較
 - (5) 極短周期の地震波動への耐震設計方法の提案
- 以下に過去の大地震における極短周期波動による被災と見られる事例を紹介する。

2. 三陸はるか沖地震における特異な被災例^{1)~5)}

1994年12月28日21時17分に発生した三陸はるか沖地震（M=7.5）は八戸市を中心に大きな被害をもたらした。本地震は八戸市東方沖200 kmの海底から極浅いところを震源とし、低角逆断層によると報告されている¹⁾。八戸市では極めて強い地震動を受けて最大加速度675 galが観測され、気象庁の震度階は当地で既往最大のVIとなった（図-2.1）。

八戸市内の地震被害の中にはこれまでの設計に使われている水平補講の地震動では理解しがたい被害形態がみられる⁵⁾。その形態を鉛直方向の極短周期の地震波動、すなわち衝撃波動で説明すると分かりやすい。

八戸市内における地震被害は第3紀または洪積時代の段丘台地（図-2.1）に多く分布している。沖積時代の軟弱な堆積層の上では被害が少ないのが特徴である。段丘台地は基岩である古生代、中生代の岩盤上に火山噴出物が堆積したものと、比較的堅い洪積期の砂礫層や粘性土層が厚く堆積したものと2種類である。前者には高館段丘、野場段丘、白銀平段丘等が属し、後者には三日町段丘、根城段丘などが属する。地震被害は段丘上または縁

平成18年1月6日受理

* 異分野融合科学研究所・教授

** 建築工学科・教授

*** (株)アブライド・リサーチ



図-2.1 八戸市の地形地質と震度階



写真-2.1 八戸市役所別館の柱の亀裂

端部に多いが、露出した岩盤上や軟弱層上では少ない。

本地震では大きな加速度の割には建造物の被災は阪神大震災などと比べて少ない。しかし、被災の形態の中には水平方向の地震動では説明しがたい破壊形状もしくは変状のものが少なくないので、いくつかの被災例を取り上げることとする。

写真-2.1は八戸市庁舎(三日町段丘上)の2階の柱の破損である。荷重の大きい中間部の柱すべての中央にX状のせん断亀裂を生じたが、両端の柱には微かなヘアクラックのみで外見上は健全である。

図-2.2はJR八戸線の柏崎高架橋(三日町段丘縁端部)の柱の破損で、柱頭部の鉄筋は座屈し、はらみ出している。剥落したコンクリートの粗骨材はきれいにせん断されていたと記録されている³⁾。

図-2.3はJR東北本線の八戸貨物駅・陸奥市川駅間648k 262m付近の上り線の盛り土約2,600m³の崩壊と復旧を示すものである。1968年の十勝沖地震では同じ場所で法面滑りを生じたが、三陸はるか沖地震では基底の滑りで、その先端は数10m先まで流れた。

写真-2.2は長者山新羅神社(三日町段丘上の小高い丘)の石灯籠である。角形の石材を階段状に積み上げ、漆喰で接着した灯籠は崩壊しているが、細長く、直立形の灯

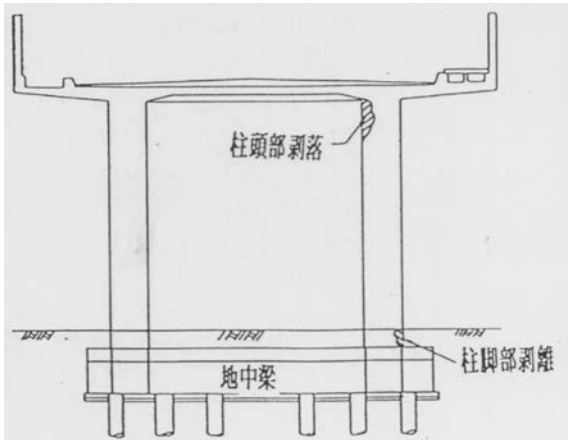


図-2.2 JR東日本八戸線の高架橋の柱部の破損



写真-2.2 長者山神社の石灯籠の比較

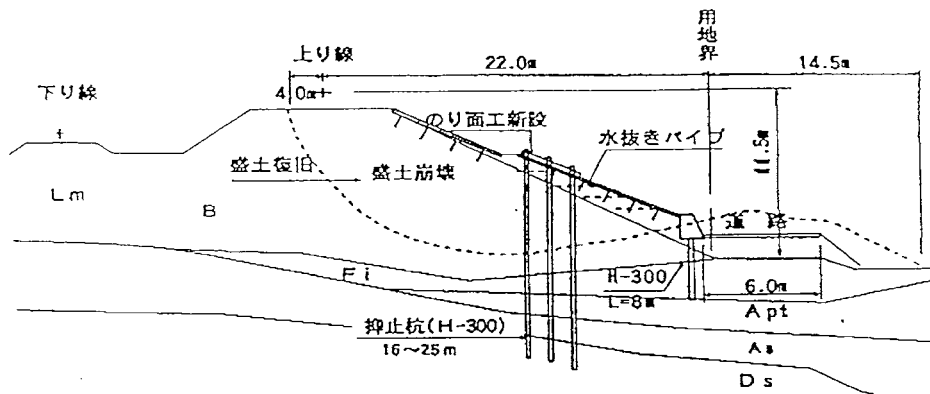


図-2.3 鉄道盛土の崩壊と復旧工法



写真-2.3 蕪島神社の石碑と石塔

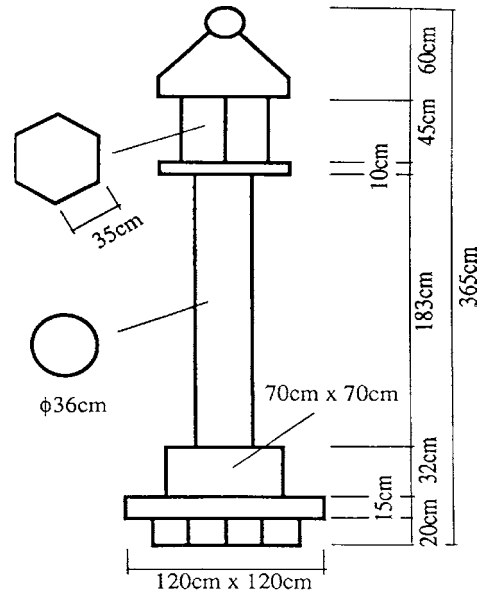


写真-2.4 蕪島神社の階段の石灯籠

籠には被害はなかった。写真-2.3 は岩礁上に奉られた蕪島神社の敷地内で転落した自然石の碑と近傍の石塔である。石塔の様子から被災は水平力によるものとは言い難い。また、神社に参詣する石段に沿って並んでいる石灯籠(写真-2.4、図-2.4)も針金の控えがとられているが、転倒、転落したものは見られなかった。

図-2.5 は長者山新羅神社の中の石碑である。寸法形状から転倒もしくは折損があっても不思議ではないが、根入長は 16 cm ほどであった所為か、台座が 10 cm ほど水平に回転したのみである。同じ敷地内にあるもう一つの石碑(写真-2.5)は転倒しているが、元の位置から飛び跳ねて転倒したと推定される。

写真-2.6 は同じ長者山新羅神社の手水所にある石造の水盤(0.8×1.4×0.8 m, 約 2 トン)である⁹⁾。地覆のある



石灯籠の形状
Shape of masonry lantern)

図-2.4 蕪島神社の石灯籠の形状

コンクリートの床版の上に据えられていたが、写真のように地覆(h=10 cm)に乗り上げた状態で残った。作用した荷重が水平力であれば転倒するはずである。

次に、これらの現象の原因が水平方向荷重であるより、鉛直方向荷重である可能性を考察してみたい。

八戸市庁舎の中間柱に見られる共役の亀裂が水平震度によるものであれば両端の柱にも斜めせん断の亀裂がみられてもよい。また、柱に斜めせん断の亀裂発生時点で部材の減衰定数は 10% を超えるので、各柱に等しく X 状の共役の亀裂を発生せしめる交番荷重が繰り返し作用したとは考えにくい。むしろ、鉛直荷重による被災と考えた方が合理的である。

図-2.2 の被災は多くの地震でもみられるものである。ここでは破損が片側の柱の内側に集中していること、コンクリートの粗骨材のせん断破壊がみられたことなどから水平方向の地震力による曲げモーメントで発生したものとは考えにくい。むしろ、鉛直方向の衝撃波動の影響と考えた方が説明しやすい。

図-2.3 ではこのような滑り形状をとった最大の理由は元の表層地盤が洪積地盤と沖積の堆積層の境界にあったことによるとみられる。水平方向の加振力に対する円弧滑りの試算をすると、比較的小きな加速度で滑るので大きな崩れになるはずであるが、盛土の崩壊形状は天端がずり下がったままで残されていた。鉛直方向の加振力で算定すると、安全率の低い滑り面が存在する(図-2.6)。崩壊土の先端は遠くまで走っているが、盛土全体が衝撃的な上下動で滑ったという可能性は否定しがたい。前後の盛土では滑りに至らなかったが、道床が地震による沈下で波打つ状態になっていると報告されている⁹⁾。

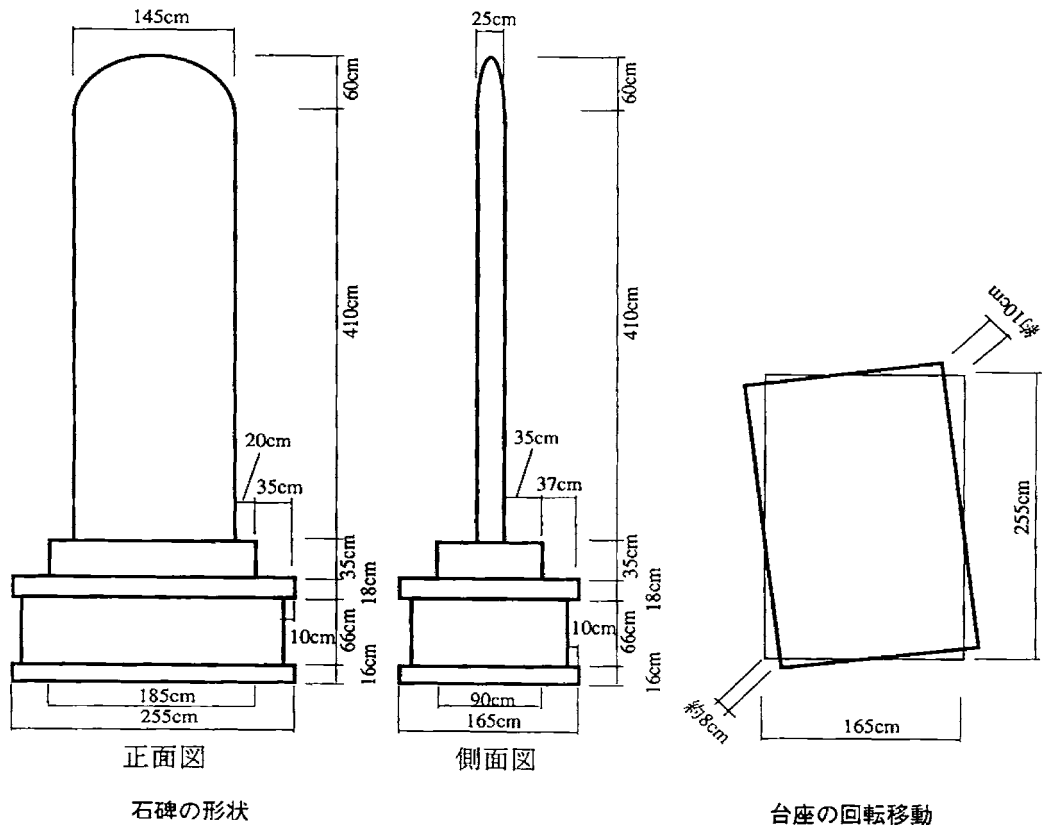


図-2.5 長者山神社境内の石碑の寸法形状と回転移動量

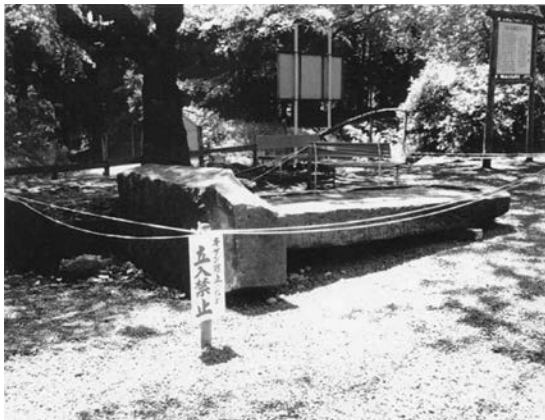


写真-2.5 長者山神社境内の躍転倒した石碑

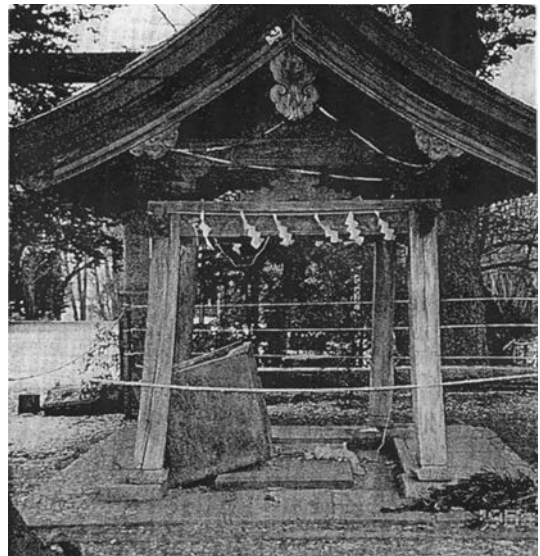


写真-2.6 長者山神社の手水用水盤の移動

写真-2.2の石灯籠はともに簡単なコンクリートのベースの上におかれているが、階段状に積み上げられた台座上の灯籠は漆喰の接着にもかかわらず台座の角石もろとも崩壊した。直立形のものの接合方法については不明であるが、水平力のみの影響とは考えられない。他の石碑にも鉛直動が作用したとみられる痕跡が残っている。

写真-2.3は自然石の上にコンクリートモルタルで接着した自然石の碑の転落した姿と、空石積みの石塔の僅かに回転しただけの姿の比較である。水平力が働いていれば石塔は簡単に崩れていたはずである。

図-2.4は薄くて高い石碑で、台座の内部のコンクリー

トに埋め込まれており、台座は積み石に囲まれた大きな体積を有する。地震後、石碑にはなんらの破損はなく、台座が単に回転移動があっただけである。地盤との摩擦係数を0.5とすると震度0.5の水平力が作用したことになり、石碑は形状から無事であることはできない。このことから主に鉛直力が作用している中での回転移動だった可能性が高い。

写真-2.5の石造水盤でも摩擦係数0.5で、水平震度は

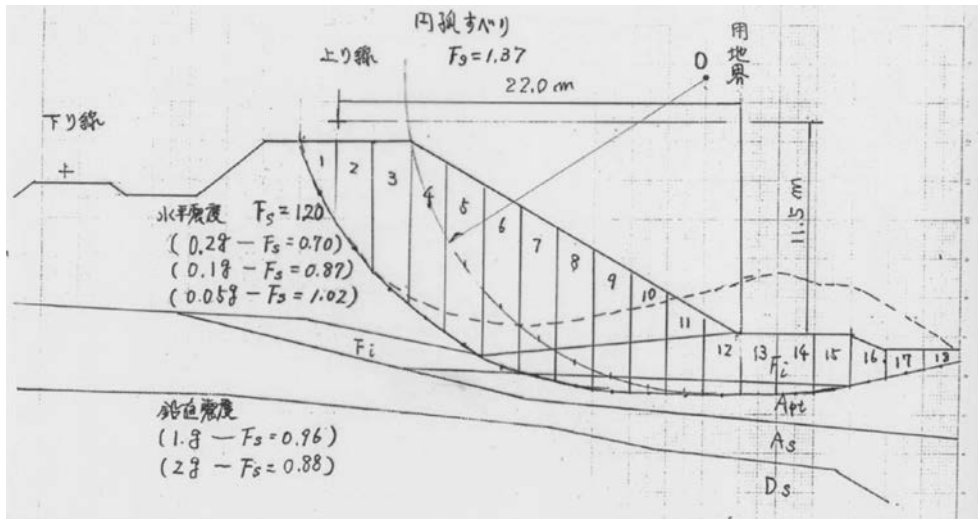


図-2.6 崩壊した鉄道盛土の円弧滑り計算

0.5 となる。水平力によるものであれば、床版の高さ 10 cm の地覆を乗り越えた段階で転倒するはずである。上屋も重心の高い構造で敷石の上に乗せただけの構造であるが、多少ずれて 4 本の柱の内、1 本の柱中心の鉄筋による陥合部にひびが入った程度の損傷であった。

3. 宮城県沖地震と兵庫県南部地震 における被災例^{1),6)-9)}

宮城県沖地震は 1988 年 6 月 12 日に宮城県金華山沖約 60 km に震源を持つ、マグニチュード 7.4 の大地震である(図-3.1)。この地震によって仙台市、石巻市とその周辺に大きな被害が発生した。仙台市、石巻市では震度階 V で、観測された最大加速度は開北橋の 289 gal であった。被災した構造物の地盤の多くが沖積地盤であった。

以下に、道路橋の鉛直振動によると推定される被災例を示す。

写真-3.1 は仙台市の広瀬川に架かる千代大橋の P6 橋脚の被災事例である。千代大橋は国道 4 号仙台バイパスの広瀬川に架かる、橋長 310 m、幅員 19 m の 9 径間単純活荷重合成桁である。基礎はすべてケーソン基礎で、8 基の橋脚すべてが被災している。この内で代表的な被災事例が P6 の張出し部の根元にあたる部分の引張り亀裂である(図-3.2)。かぶりコンクリートが剥離して鉄筋は伸びた後に座屈している。この他に、ここから上に約 30 cm の高さで全周にわたってヘアクラックがあり、かぶりコンクリートをはつると亀裂は 0.2 mm 程度と大きくなっていた。この位置は柱部から伸びた鉄筋の重ね継ぎ手の先端に当たる。

これらの亀裂は水平力による曲げ破壊として説明されているが、上下方向の衝撃波動で説明した方が合理的である。すなわち、張り出し部の根元は施工ジョイントでコンクリートの付着が確保しがたく、衝撃波動が反射し

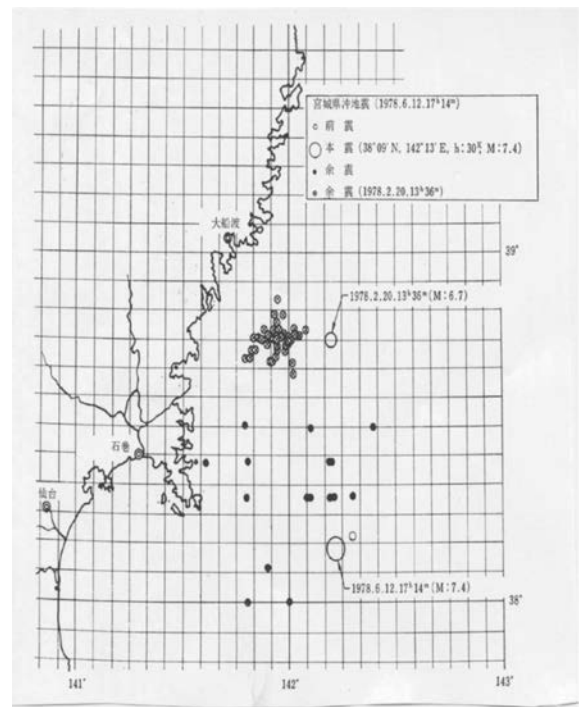


図-3.1 宮城県沖地震の震源と前震、余震の震源

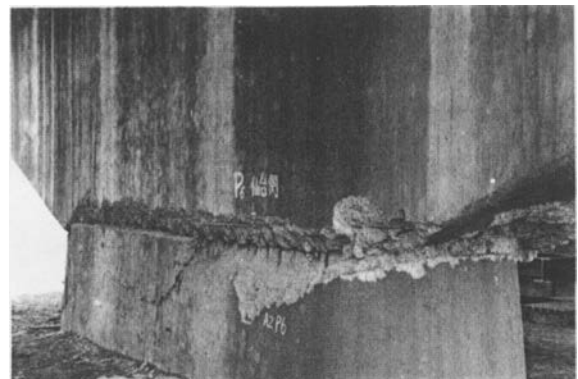


写真-3.1 千代大橋 P6 橋脚の破損状況

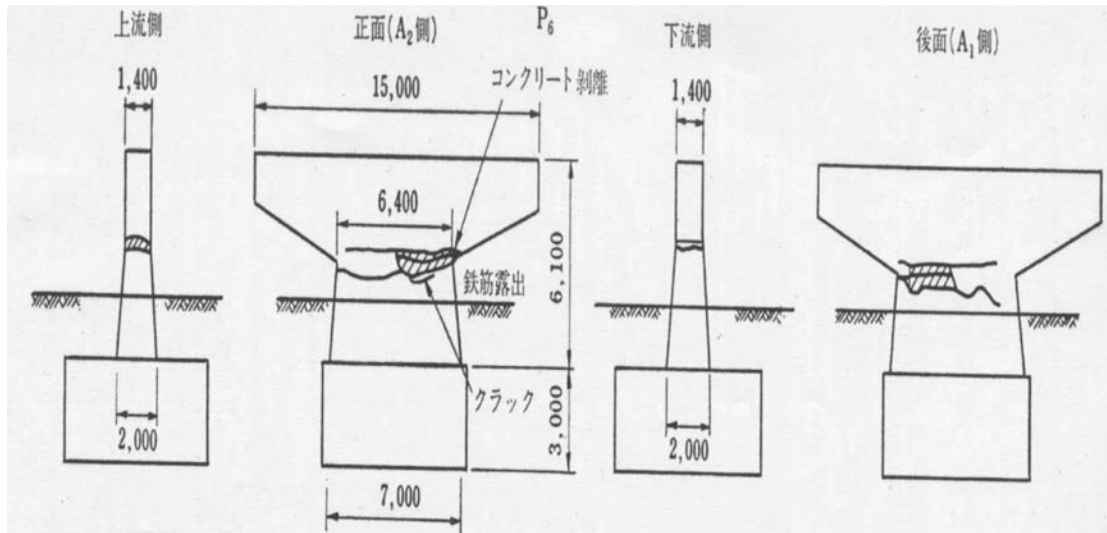


図-3.2 千代大橋 P6 橋脚のコンクリートの亀裂の展開図

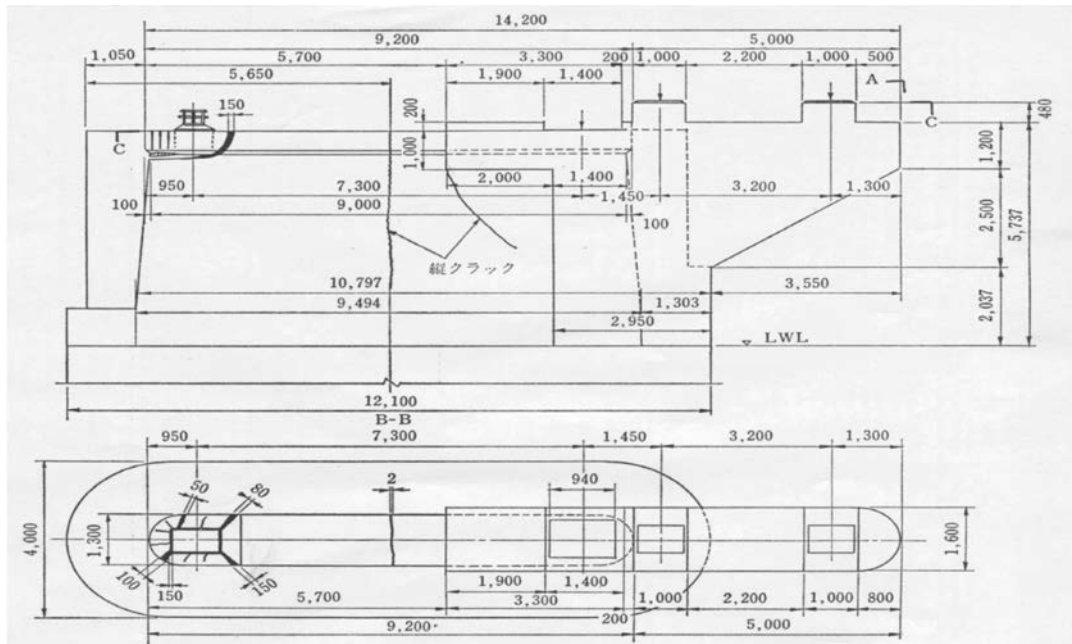


図-3.3 天王橋 P1 橋脚に発生した亀裂の状況

やすい断面である。また、その上の亀裂は鉄筋を伝って来た波動の反射によって発生した可能性がある。

図-3.3は石巻市郊外の国道45号の旧北上川を渡る天王橋のP1橋脚の被災である。流心部に架かる径間112m、幅員6mのランガー橋の下流側固定沓から橋座に入った大きな亀裂を示す。亀裂は下沓のアンカーボルトの角から外側に向かって発生し、その最大幅は18cm、深さ60~70cmに及び、せん断破壊の形状を呈している。上流側の固定沓の周りは歩道橋を添加するために断面が拡幅されていたので被災はないが、橋脚中央等に縦亀裂(約2mm)が発生している。基礎はケーソン基礎である。他の橋脚の基礎もケーソン基礎であるが、橋脚には被害

は見られない。

P1橋脚の下流側固定沓を取り巻くせん断亀裂は水平力では発生しがたく、大きな反力を負担している沓に過大な上下方向の衝撃力が作用したと考えられる。上流側固定沓の位置では橋座の拡大で破損には至らなかったと推測される。なお、本橋の他の支承部ではこのような被害は見られない。

しかし、近傍の国道45号の新北上川に架かる新飯野川橋(橋長441.5m、3径間連続鋼床版桁2連)では上下部工に被害がなかったが、P4橋脚上の固定支承のピンが破談した。基礎はケーソン基礎である。

図-3.4は関上大橋の主径間橋脚の被害である。関上大

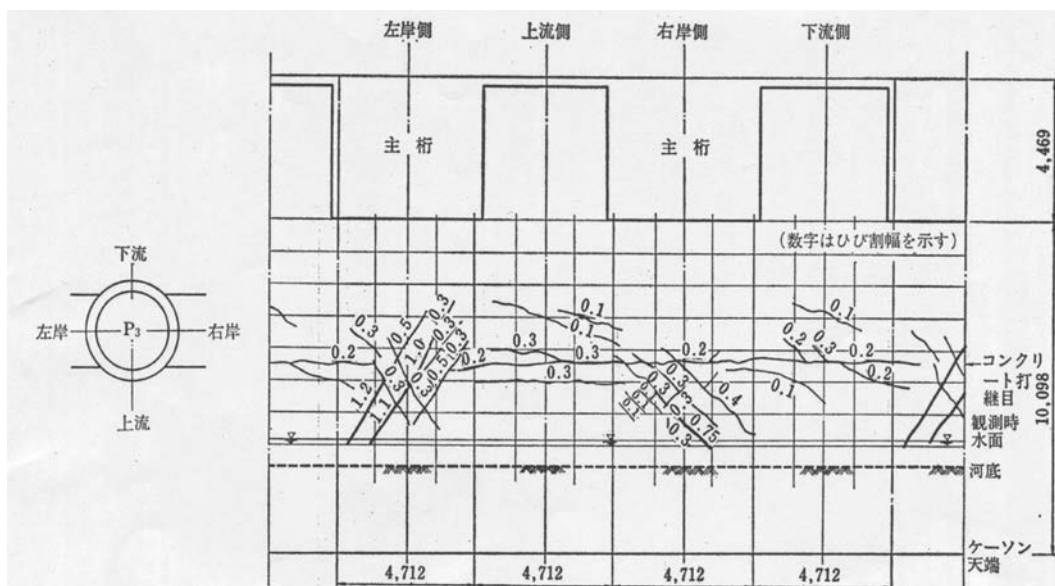


図-3.4 閑上大橋のP3橋脚の亀裂の状況

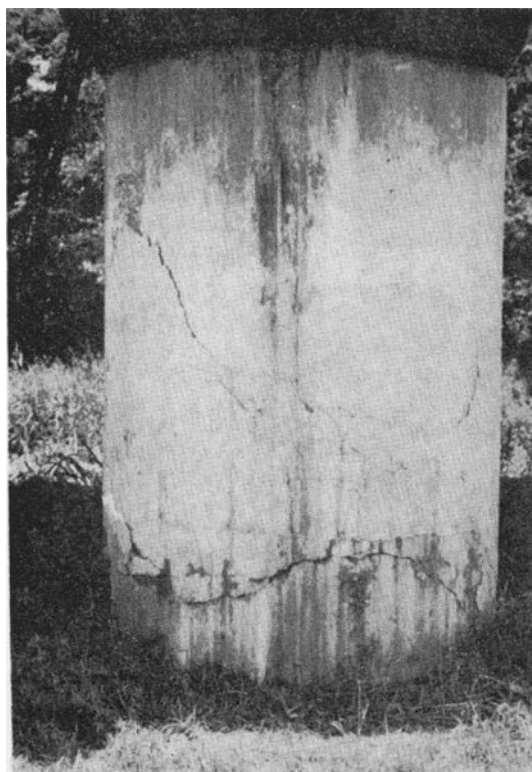


写真-3.2 閑上大橋のP1橋脚の斜めひび割れと水平ひび割れ

橋は県道橋で、名取川河口に架かるディビダーク工法による3経間連続橋(66.83 m+92.00 m+66.83 m)と7連のT桁橋(7×45.14 m)からなるコンクリート橋である。基礎はケーソン基礎で、砂地盤を支持層としている。主径間の橋脚は支持層への荷重負担を軽減するために中空の柱となっている。地震で橋脚に引張り亀裂と共役の斜めせん断亀裂が発生した。斜めせん断亀裂は橋軸方向だ

けでなく、橋軸直角方向にも発生している。

写真-3.2は側径間のP1橋脚に生じた亀裂である。引張り亀裂と斜めの亀裂である。斜めの亀裂は断面中央で水平の亀裂となっていた。コンクリートの専門家によると圧縮試験で偏心载荷したときの破壊状態に似ているとのことであった。また、ほとんどの可動沓において浮き上がり止めが外れ、アンカーボルトは付着切れで抜け上がる傾向にあった。

周りの地盤では小規模な噴砂が見られたが、それによる被災はなかった。各橋脚の基礎はケーソン基礎で上層の砂層を貫き、その下の砂礫層に達している。閑上大橋における現象も水平力では説明し難く、上下動によるとすると納得のいくものである。

このような被災はその後の日本海中部地震のような大地震では顕在化しなかったが、三陸はるか沖地震や兵庫県南部地震では数多く見られた。その被災箇所は比較的良好な地盤上であるのが特徴である。これまでの橋脚の被災は主にケーソン基礎上の構造物に発生していたが、兵庫県南部地震では場所打ちコンクリート杭の基礎で多く発生している。また、橋梁だけでなく、建築構造でも似たような被害が見られる。

写真-3.3は兵庫県南部地震における神戸市役所の6階の崩壊写真である。1957年の建物で、5階までは鉄骨鉄筋コンクリート構造で、6階からは鉄筋コンクリート構造とのことである。入力した上下方向の地震波動が重複反射して6階部分で増幅したのではないかと考えられる。

写真-3.4は三宮駅前の交通センタービルである。9階建ての建物で5階部分が崩壊している。三宮地区では地上階(1階)が崩壊したもの以外に、このように中間の階が崩壊したものがいくつか見られた。三陸はるか沖地震

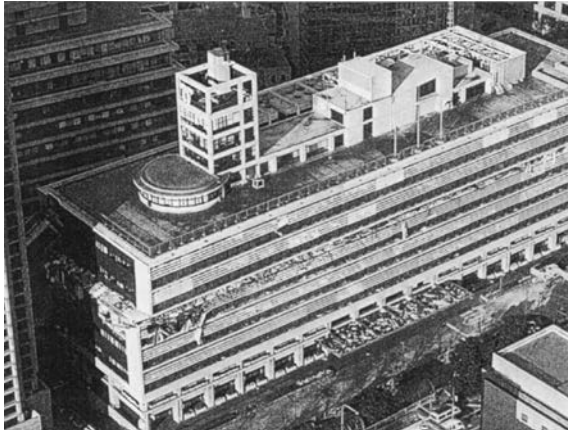


写真-3.3 神戸市役所庁舎の崩壊事例

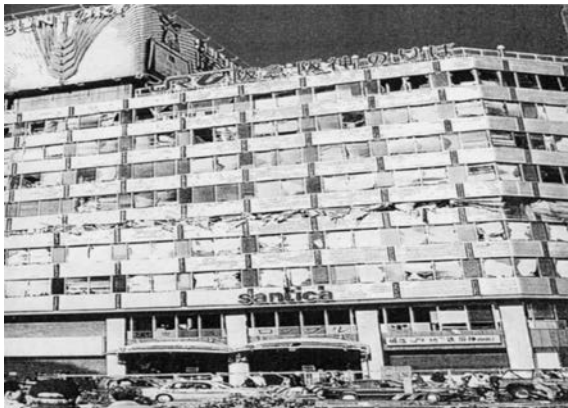


写真-3.4 三宮の交通センタービルの崩壊事例

による八戸市役所における2階柱中央のX型の亀裂のように崩壊の原因を上下動と考えると必ずしも地上階だけが危険になるとは限らない。

写真-3.5は阪神高速道路の高架橋の崩壊した橋脚の内、せん断破壊をしたと思われる鉄筋コンクリートの橋脚である。写真の左上の橋脚は阪神高速道路3号神戸線の深江本町で見られたものである。明らかにせん断破壊で、水平力によるものとは考えられない。右上の写真は3号神戸線の湊川ランプ橋の橋脚である。せん断破壊をして主鉄筋が孕みだしている。これが水平力によるものであればT字の張り出し部分が傾き、上部工も落橋するはずである。下の写真と図は3号神戸線の西宮市甲子園高潮町にある西167橋脚である。この橋脚はせん断面が2つ生成し、3ブロックに分かれてしまい、落橋防止の連結装置が取り付けいていたにも拘わらず、落橋に至っている。過大な上下方向の衝撃波動によるとしか説明の出来ない破壊例である。この他に鋼製橋脚でも圧縮破壊もしくは座屈したものが散見された。

写真-3.6は中国縦貫自動車道の宝塚高架橋における壁式橋脚の破棄事例である。上部工は5径間連続RC中空床版橋である。破壊は中間橋脚の中央部に斜めのせん断面が共役に生じている。このような破壊例は過去に少な

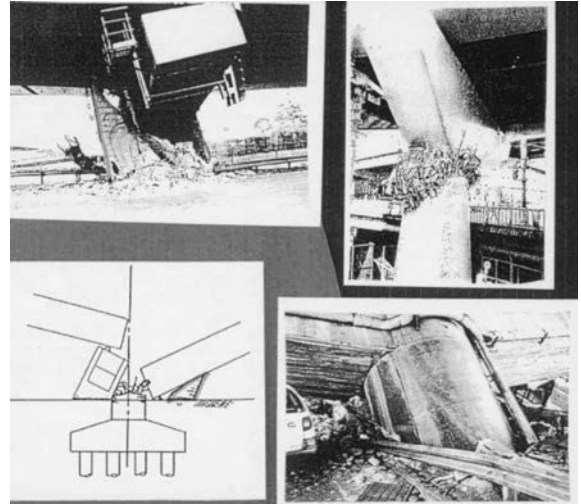


写真-3.5 阪神高速道路の高架橋橋脚のせん断破壊事例



写真-3.6 中国縦貫自動車道宝塚高架橋の橋脚の破損事例

い。この橋脚が選択的に損傷した理由は分からないが、共役に入っているせん断面から作用した力は上下方向の圧縮力であることは明らかである。しかし、設計荷重としてはこのような大きな反力は考えられず、地震波動に含まれている衝撃波動による被災と推定される。

ここに取り上げた他にも、上下方向の衝撃波動によると推定される破壊事例が多く存在する。また、一般市民からも地震の時に空中に放り出されたとか、突き上げるような強い上下動を感じたという証言も数多く寄せられている⁹⁾。

4. 広帯域地震計とそれによる地震記録^{1),10)-12)}

これまで、過去の大地震において極短周期の地震波が存在する可能性を述べてきたが、実際にそのような高周波波動が存在することを実証する必要がある。

従来の地震動の測定周波数範囲はほぼ30 Hz以下に限られていた。その主たる理由は従来からの地震計は

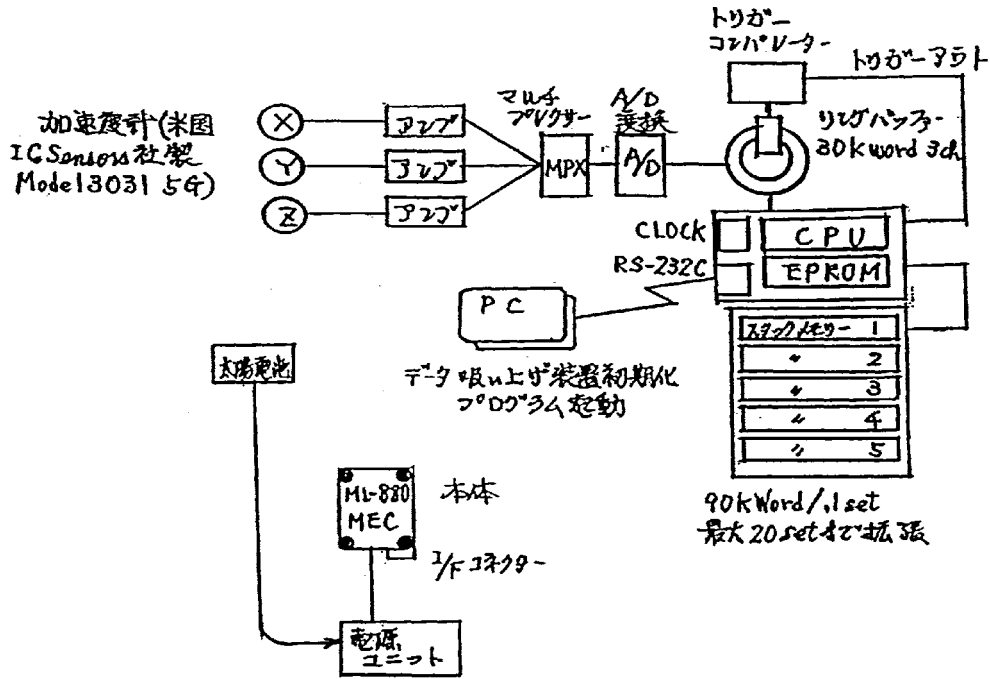


図-4.1 広帯域地震計のブロック系統図

ムービングコイル型もしくは振動子変位計のように比較的
低周波数特性を持つセンサーが使用されてきたことによる。

本研究では 500 Hz 程度もしくはそれ以上の高周波数の
波動を測定、記録できる地震計を試作、開発することとした。
計画した仕様は以下の通りで、全体のブロック図を図-4.1
に示す。

- センサー：高感度 3 軸加速度計
 ：ピエゾレジスタ型圧電素子
- 入力チャンネル：3ch (X, Y, Z)
- 測定レンジ：±5 g (約 5,000 gal)
- 周波数範囲：500 Hz (100 Hz カットオフ
 ：18 dB/Oct. L.P.F)
- サンプル間隔：2 kHz (2 ミリ秒)
- A/D ビット数：12 bit (分解能 0.2%, フルスケール)
- トリガー：3ch OR (いずれかの ch の信号が設定レ
 ：ベルの時)
- 測定データ長：300 秒
- プレトリガー：最大 60 秒
- I/F：RS-232C

PC に直接記録

装備は測定装置、バッテリー (太陽電池、発電装置を
含む)、データ読取用プログラム、RS-232C ケーブル、そ
他一式よりなる。

この仕様の地震計を広帯域地震計と名付け、試作した。
地震計は八戸工業大学建築工学科の 1 階の柱および(株)
アプライドの社屋の柱に取り付けた。しかし、極短周期
の波動の捕捉は可能であったが、敏感すぎて人の移動で
も作動して記録紙だけが異常に消費するなど、管理上の

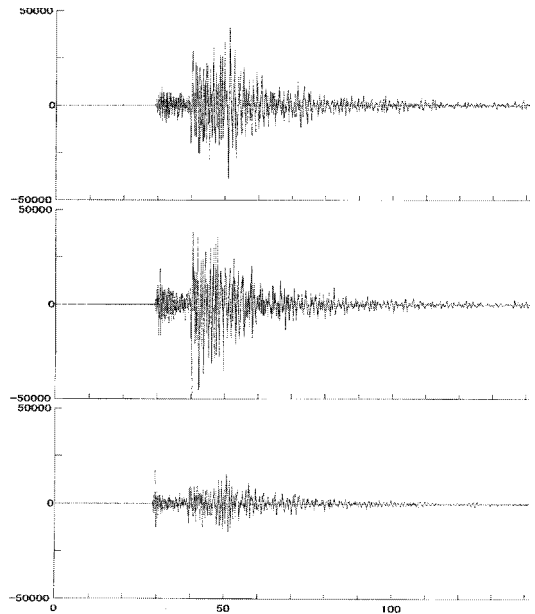


図-4.2 2004年3月11日茨城県南部における地震の速度変換記録

課題を残した。

この間につくば市の (株) アプライドで記録された地震
記録を図-4.2 に示す。2004年3月11日に茨城県南部
で発生した比較的小さな地震で、上から X (1ch), Y
(2ch), Z (3ch 上下) 方向の波形を速度で表したもので
ある。縦軸が bit で、横軸が秒である。1 bit = 19 μkine で
表される。X 方向の最大値 41,262 bits, Y 方向 28,141
bits, Z 方向 17,623 bits である。これらの記録から極短
周期すなわち高周期波動は上下方向だけでなく、水平方
向にも存在することが分かった。

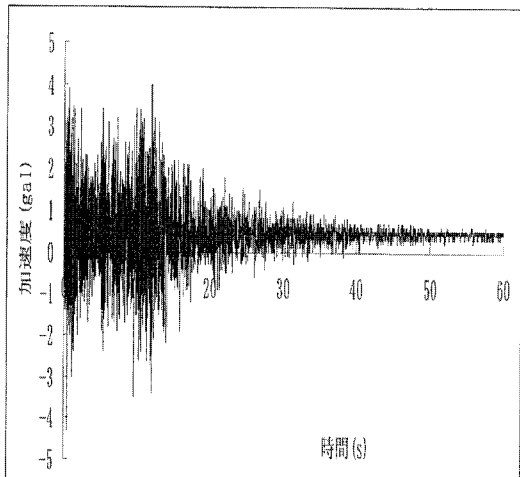


図-4.3 2004.3.11 地震の上下方向の加速度記録

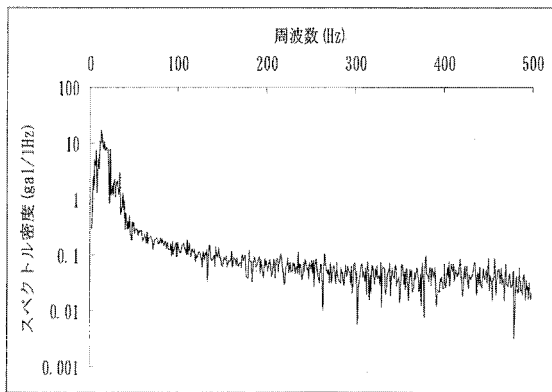


図-4.4 2004.3.11 地震の上下方向の応答加速度のスペクトル

この内の上下方向成分の加速度を取り出したものが図-4.3である。図-4.4はそのスペクトルを示す。17 Hzにピークを持つ比較的短周期の波動である。常時微動のピークは通常、0.1~1.0 Hzの間に現れるから200 Hz程度までの短周期波動は主に地震による高周期波動と見ることが出来る。

これらの事情を勘案の上、種々の検討をしたが、上述の現象を検証するために測定の対象を鉛直方向の波動に絞ることにし、次のような仕様に変更した。その結果、地震計の挙動は安定したものにすることができた。改造後の装置の基本回路ブロック図を図-4.5に示す。

測定装置

加速度計	PCB393A03
測定成分	鉛直方向1成分
測定レンジ	微小振動計 0.1 gal から 100 gal
広帯域強震計	10 gal から 10 G
測定時間長	最大3分/1現象
AD変換精度	12 bit 2ch
トリガー	プレトリガー
トリガー長	10秒 10秒以上は任意設定
トリガーレベル	任意設定

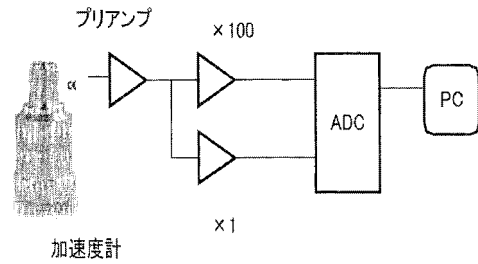


図-4.5 改造後の基本回路ブロック図



写真-4.1 改造後の広帯域地震計

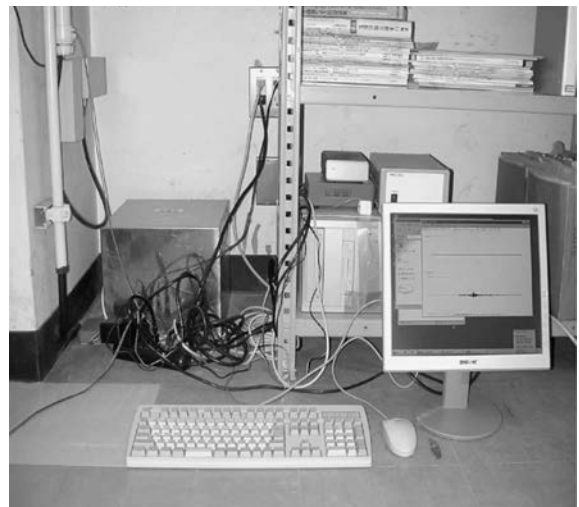


写真-4.2 地震観測装置の全体像

測定周波数	1 kHz AD速度 2 kHz (0.5 ms)
制御	室内にPCを置き、ソフトウェア制御もしくは、小型のデータロガーによる
電源	AC 100 V+UPSによる停電補償
設置位置	地上0.5 m

改良された地震計を八戸工業大学、(株)アプライドの既設の地震計と交換すると共につくば市の国土交通省国

土政策総合研究所の本館に取り付けた。八戸工業大学に取り付けた広帯域地震計のセンサーを写真-4.1に、装置全体を写真-4.2に示す。写真-4.2の左下のボックスが通常の強震計である。

これらの地震計を取り付けた後、つくば市では比較的大きな地震（中規模地震）を記録することが出来た。

2004年10月6日23時52分に茨城県南部を震源とす

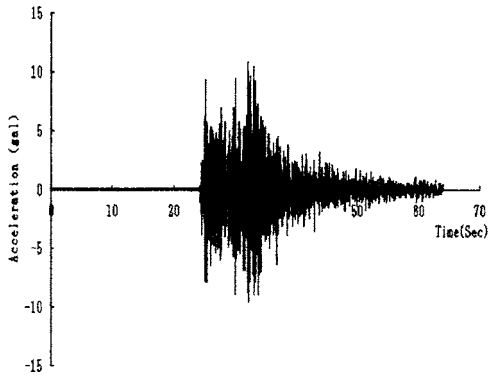


図-4.6 2004年10月6日茨城県南部地震における上下方向地震動記録

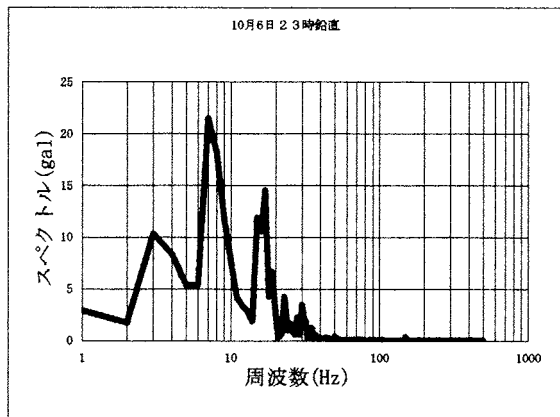


図-4.7 2004.10.6地震の上下動波動の応答加速度スペクトル

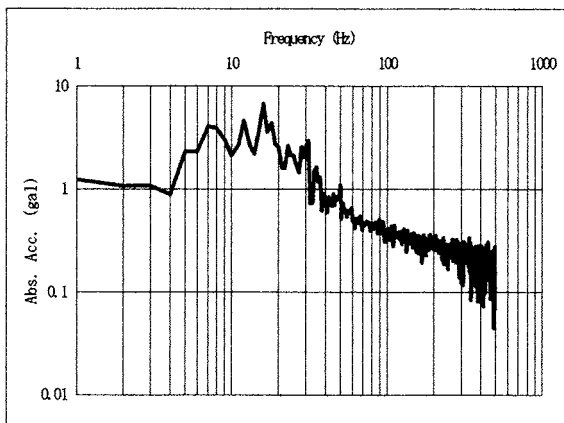


図-4.8 同地震上下動波動の25~30秒間のランニングスペクトル

る震度IVの地震を(株)アプライドで記録することができた。その波動の加速度波形を図-4.6に、その応答スペクトルを図-4.7に示す。更に、測定開始25秒後の加速度のパワースペクトルのランニングスペクトル(25秒~30秒)を図-4.8に、それを積分した速度のランニングスペクトルを図-4.9に示す。

波形から加速度の値はそれほど大きくないものの、7 Hzと11 Hz付近にピークが見られる。極短周期の波動は図-4.7では明確でないが、図-4.8では値は小さいながらも多くの極短周期波が含まれているのが明らかであ

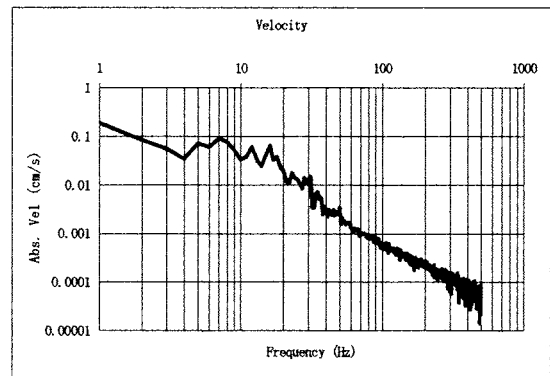


図-4.9 上下動波動の25~30秒間の応答速度スペクトル

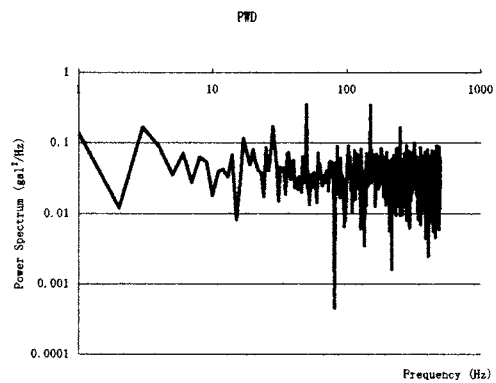


図-4.10 (a) 上下波動のランニングスペクトル (15~20秒)

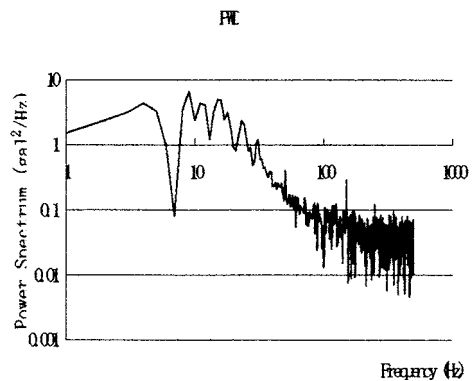


図-4.10 (b) 上下波動のランニングスペクトル (20~25秒)

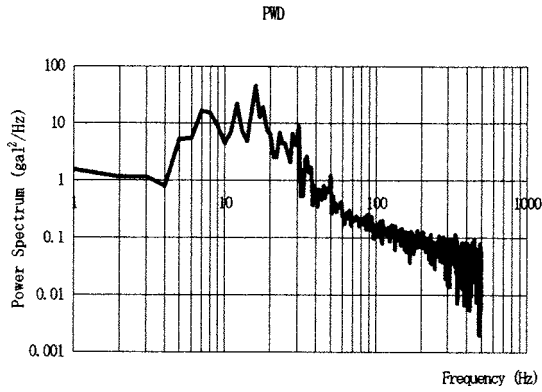


図-4.10 (c) 上下波動のランニングスペクトル (25~30 秒)

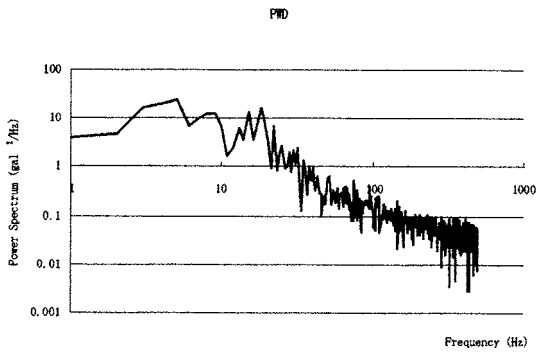


図-4.10 (d) 上下波動のランニングスペクトル (25~30 秒)

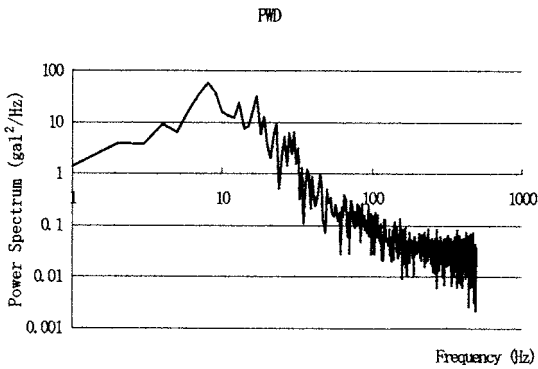


図-4.10 (e) 上下波動のランニングスペクトル (25~30 秒)

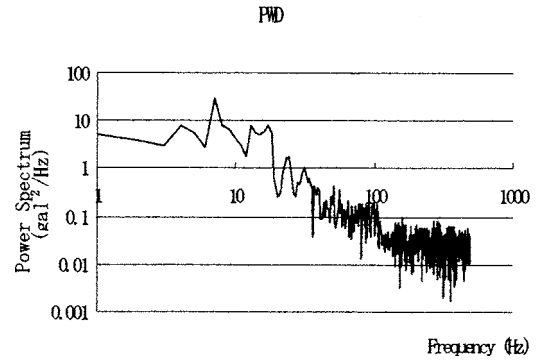


図-4.10 (f) 上下波動のランニングスペクトル (25~30 秒)

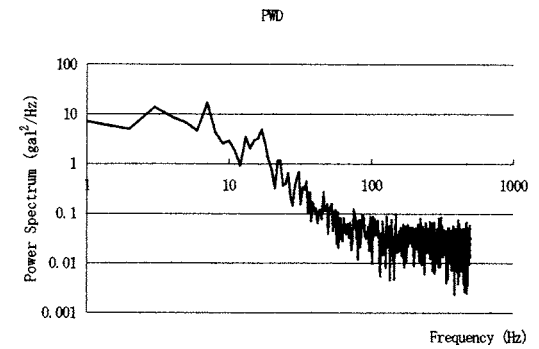


図-4.10 (g) 上下波動のランニングスペクトル (25~30 秒)

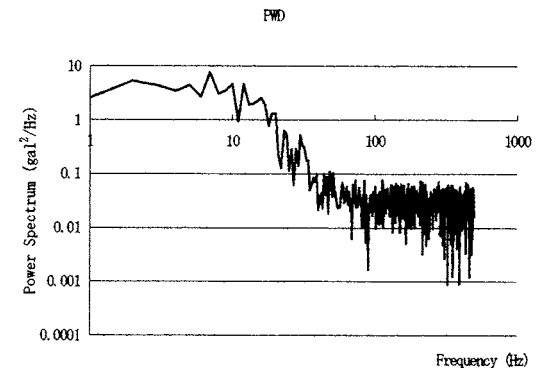


図-4.10 (h) 上下波動のランニングスペクトル (25~30 秒)

る。図-4.8の加速度スペクトルからは長周期成分は見られないが、50 Hz以上の短周期成分は小さな加速度ながらも、測定範囲の500 Hzまで含まれている。

常時の微動は0.1 gal以下なので、記録されているものは地震波動である。速度スペクトルにおいては高周波領域でスペクトル曲線は急速に低下するはずであるが、低下が緩やかなので高周期領域でもかなりのエネルギーを持っていると推測される。

同地震波の5秒毎のパワースペクトルをランニングスペクトルとした結果を図-4.10(a)~(h)に示す。プレトリガーをかけているので地震前の常時微動が計測されている(図-4.10(a))。地震の主揺動は20秒後から始まっ

ている。大きな加速度は25秒から35秒に発生しており、パワースペクトルもその間で大きな値を示している。40秒以降は加速度もパワースペクトルの値も次第に小さくなり、対象としている極短周期(高周波)波動は50秒以降には認めがたい。しかも、その大部分は震源からの上下動と言うよりは水平動に派生するものではないかと推測される。

その後、2005年2月16日に茨城県南部を震源とする、震度階V弱の地震(M=5.4)が発生した。本地震の震源は地下-40 kmにあり、横揺れが卓越した地震であったが、その際に国土交通省国土技術政策総合研究所の地階で記録された広帯域地震計による上下方向の地震波動を図-4.11に示す。その波動のスペクトルを図-4.12に示す。

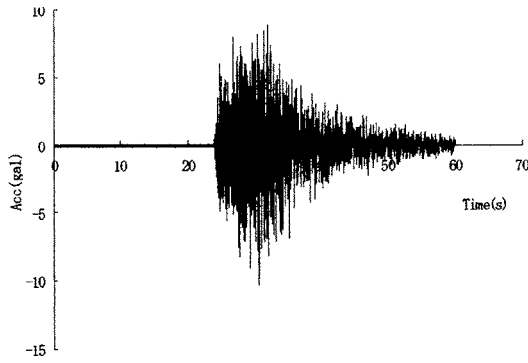


図-4.11 2005年2月16日茨城県南部地震における広帯域地震計による上下動波動の記録

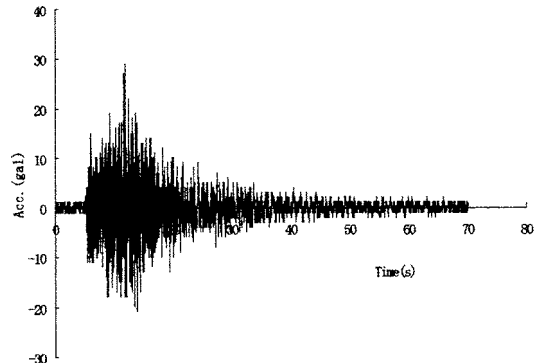


図-4.13 2005年2月16日茨城県南部地震におけるSMAC型地震計による上下波動の記録

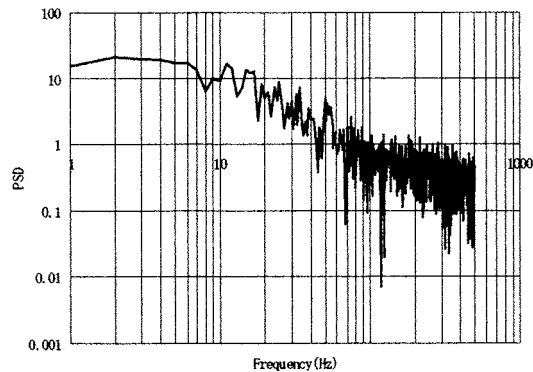


図-4.12 同地震の広帯域地震計記録の応答加速度スペクトル

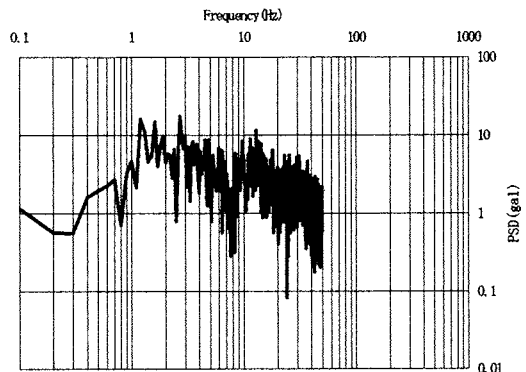


図-4.14 同地震のSMAC型地震計記録の応答加速度スペクトル

併設されているSMAC型の強震計による上下方向の波動の記録を図-4.13に示す。同じく、同波形のスペクトルは図-4.14の通りである。

これまでの広帯域地震計の記録は通常の強震計の記録と一致すると考えていたが、広帯域地震計による加速度記録(図-4.11)とSMAC型強震計の記録(図-4.13)との間で振幅に約3倍の差が生じている。原因は広帯域地震計のサンプリング間隔が極端に小さいこと(広帯域地震計2,000 Hz, SMAC型強震計100 Hz)によるものか、加速度計の相違やSMAC型のセンサーブロックの質量が重く、低い周波数帯域(20 Hz前後)での共振の可能性によるものかは現時点では判明していない。

これらの記録のスペクトルについても大きな差が生じている。広帯域地震計のパワースペクトルは500 Hzまでとれるが、SMAC型強震計では50 Hzまでである。また、スペクトルの値も約1/10と、小さくなっている。その理由として考えられるのはスペクトル密度とデータ数の平方根で除していることが挙げられる。そこで、両者の振幅をパワーで整合させ、両者のスペクトル密度単位をあわせた結果を図-4.15に示す。10 Hzより低いスペクトルでは一致しないが、10 Hzより高い部分はほぼ合っている。

これらの計測データからSMAC型地震計は50 Hzより

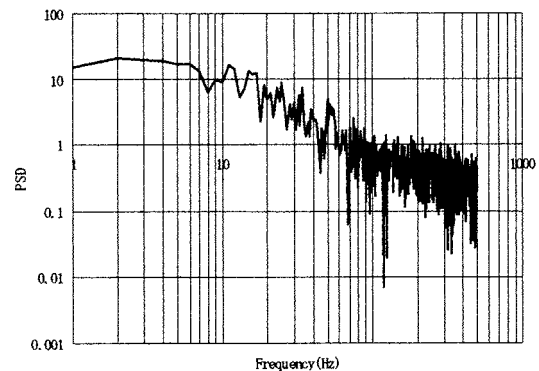


図-4.15 広帯域地震計記録の修正応答加速度スペクトル

り高い波動の計測が出来ないが、それよりも高い波動成分が存在することは推測される。広帯域地震計も500 Hzまでの計測しかできなかったが、測定周波数を2,000 Hzに切り替えると1,000 Hzまで計測可能となる。更に、高い周波数領域を測定するにはデータの収録が膨大になるためにAD変換速度を引き上げる必要が生じる。

このように極短周期の上下方向の波動が普通の地震波動の中に含まれていることは立証できたが、その衝撃波動が大地震時に瞬間的な破壊を発生させるほど大きいものであることは明らかにすることが出来なかった。そこで、広帯域地震計の近傍で落錘試験を実施して、その可

能性を検証することとした。

5. 鋼管杭の打撃波動と落錘試験^{10)~12)}

鋼管杭を打撃施工したときの杭体の中を伝播する衝撃波(縦波)の加速度の測定事例を図-5.1に示す。縦軸の単位は重力である。コンクリート杭を含めて杭の施工では、このように地震では想定できない、大きな加速度と共に大きな騒音と振動を発生させる。しかし、杭を損傷するわけではなく、近傍の構造物に被害を与えたり、現場周辺の人々には不快ながらも地震時のような恐怖に陥れるほどのものにはならない。打撃時には杭周面と地盤の間でせん断力がほとんど伝達されないことによる。しかし、杭が貫入不能になると、杭体の中で衝撃波動の重複反射が起き、杭体に引張亀裂、圧壊、提灯座屈などが発生する。このときの杭に発生する損傷は2節、3節で紹介した地震時の構造物の被災形態と共通するものがある。

図-5.1の衝撃波動の加速度スペクトルが図-5.2である。卓越周期が12 Hzと103 Hz付近に見られる。103 Hzの方が衝撃波動で、20 Hzの方はその波動が杭体内を往復して生じる杭自体の振動波形を代表していると推定される。杭の貫入や杭の損傷をもたらすのは、1,400 Gに及

ぶ前者の波動と考えられる。もしも、このような過大な衝撃波動が構造物に作用すると、ひとたまりもなく構造物は崩壊してしまうであろう。実際に、このように大きな加速度を持つ高周波の衝撃波動が地震動の中に含まれているか、否かは確認する必要がある。

そこで、その可能性を確かめるために広帯域地震計の近傍での落錘試験を計画した。場所は国土技術政策総合研究所地階の広帯域地震計を取り付けた柱近傍の鉄筋コンクリートの床である。広帯域地震計、SMAC型地震計の取付け状況は写真-4.1、写真-4.2とほとんど同じである。落下させる錘は鋼製で、1 kg、5 kg、10 kgの3種類とし、柱から30 cmの位置で、高さ15 cmから落下させた。それによって、広帯域地震計、SMAC型強震計により衝撃波動を収録し、スペクトル解析を実施した(図-5.3~図-5.10)。広帯域地震計で測定した記録の内、1 kgの落錘による波動を図-5.3に、5 kgの落錘によるものを図-5.5に、10 kgによるものを図-5.7に示す。SMAC型強震計により10 kgの落錘の衝撃波動を測定した記録が図-5.9である。

広帯域地震計による加速度の値は落錘の質量に拘わらず、速度で決まるはずであるが、1 kgの落錘では約50 galとなっている。5 kgと10 kgは300 galほどで、ほぼ同じ値となっている。発生する衝撃波動の歪みは落下高、落錘の形状、接地面の形状や材質等に支配される。1 kgの落錘の加速度が小さい理由は床に張られていたリノリウムの厚さの反発を受けたものと考えられる。5 kg、10

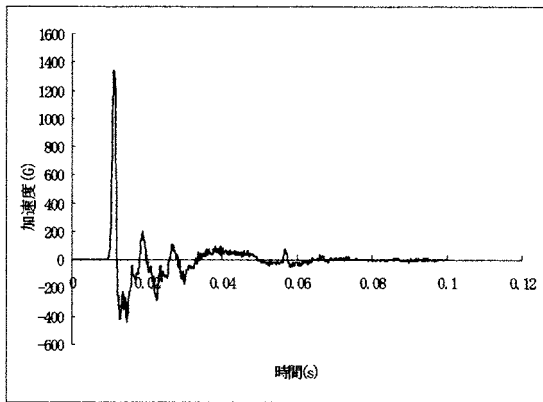


図-5.1 鋼管杭打撃時の杭体内に発生する加速度波形の事例

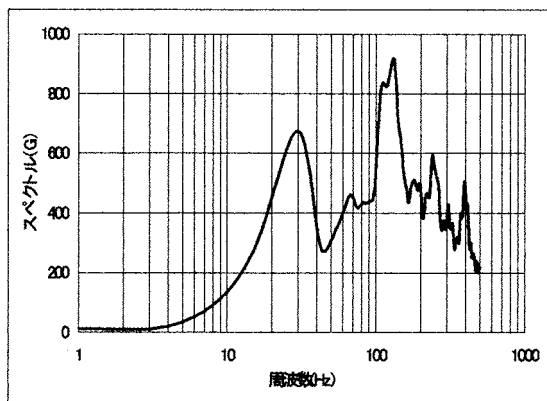


図-5.2 鋼管杭打撃時の杭体内の加速度波形スペクトル

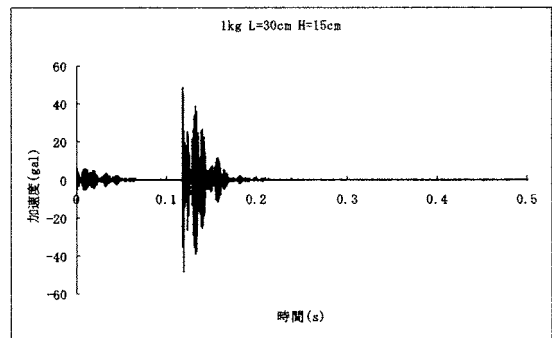


図-5.3 落錘試験 (1 kg) の衝撃波動

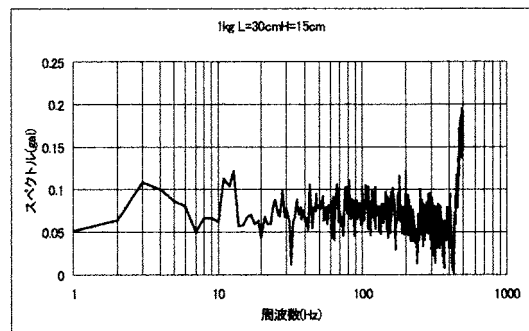


図-5.4 落錘 (1 kg) の波動スペクトル

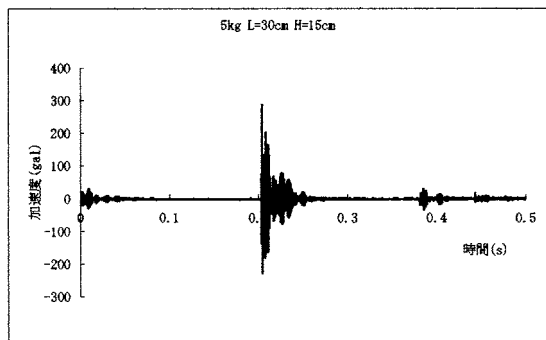


図-5.5 落錘試験 (5 kg) の衝撃波動

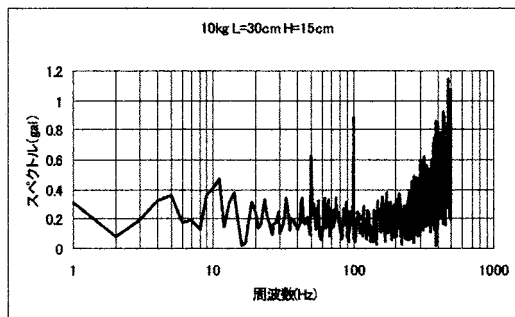


図-5.8 落錘 (10 kg) の波動スペクトル (広帯域地震計)

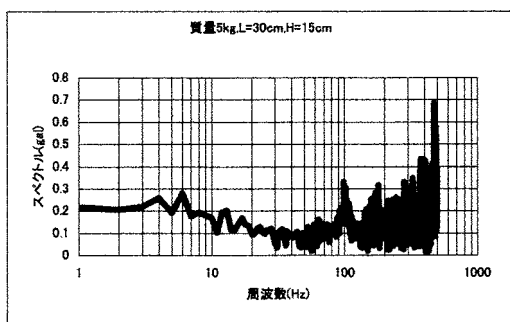


図-5.6 落錘 (5 kg) の波動スペクトル

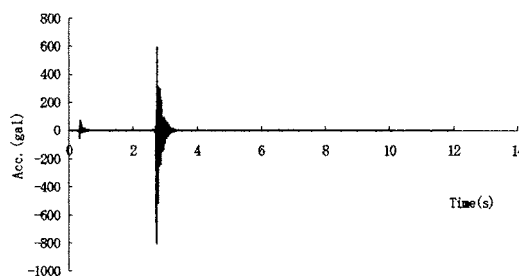


図-5.9 SMAC型地震計による落錘試験 (10 kg) の衝撃波動

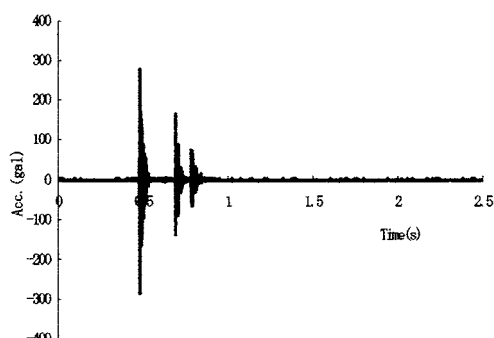


図-5.7 広帯域地震計による落錘試験 (10 kg) の衝撃波動

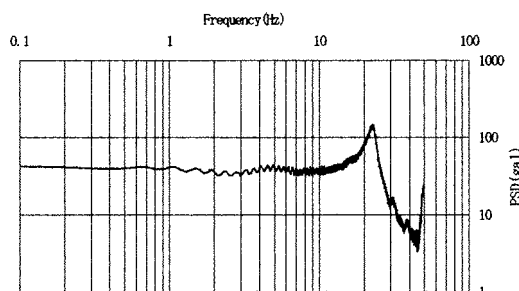


図-5.10 落錘 (10 kg) の波動スペクトル (SMAC型地震計)

kgの落錘の場合は、杭打ちの際のクッション材のように、リノリウムの厚さの影響は微小であったものと推察される。10 kgの落錘で3つの波動が記録されているのは落錘がバウンドしたことによるものである。

これらの波動のスペクトルが図-5.4、図-5.6、図-5.8である。いずれも500 Hz付近に卓越周期が見られる。記録が500 Hzまでしか取られていないので、その先にも卓越周期が存在するかも知れないが、確認できない。それでも、500 Hzの300 gal程度の衝撃波動が測定できたことになる。5 kg、10 kg程度の落錘でも極短周期で大きな加速度が発生することが立証された。

なお、5 kgや10 kgの落錘で100 Hz付近に見られるスパイク状のものは落錘がバウンドした影響と考えられている。

しかし、10 kgの落錘のSMAC型強震計では約600

galという大きな加速度が記録されている(図-5.9)。サンプリング間隔の影響もあり、波形は図-5.7に見られた3つの波形を統合しているように見える。そのスペクトルを図-5.10に示す。卓越周期は22 Hz付近にあり、それ以上の高周波では急激に減衰する。このように卓越周期が低い周波数に移行した理由も地震計の分解能に起因すると思われる。

加速度記録やスペクトルの値で、広帯域地震計SMAC型地震計の記録の間に大きな差異が生じたのは、地震を実測した図-4.11と図-4.13の加速度の間、図-4.12と図-4.14のスペクトルの間の差異と同じ理由によるものと考えている。

以上の落錘試験では杭打ち時のような大きな加速度を持つ衝撃波動は再現できなかったが、5 kgや10 kgの比較的軽い鋼製の落錘を15 cm程度の高さから落とすだけで300 gal程度の極短周期の上下方向加速度を観測できた。すなわち、大地震の際には震源の近傍や比較的良好な地盤上では大きな加速度を持つ、衝撃的な極短周期

の波動が地震波動の中に含まれている可能性が高い。しかし、現在の SMAC 型の強震計ではそのような極短周期波動を正確に捕捉することは困難であることも立証された。

一方、圧電素子を用いている広帯域地震計も低い周波数領域で他の地震計と同じ値の記録が取れるように検定する必要もある。また、SMAC 型地震計との間で観測値の相違の原因についても明確にする必要を感じている。

6. 結 論

大地震時に見られる構造物の瞬間的な破損や崩壊には、極短周期の過大な加速度を持つ上下方向の衝撃波動の存在が想定される。本研究では、その存在を検証するために被災事例の調査、広帯域地震計の試作、それを使った地震観測、落錘試験等を実施した。その結果、次のような成果を得ることができた。

- (ア) 三陸はるか沖地震をはじめ、過去の大地震で上下方向の衝撃的な波動による構造物の被災例を数多く抽出することが出来た。
- (イ) 極短周期の地震波動を捕捉するために圧電式の広帯域地震計を開発した。
- (ウ) その過程で極短周期の地震波動は上下方向だけでなく、水平方向にも存在することが判明した。
- (エ) 最終的に広帯域地震計の機能を上下方向に絞り込み、八戸工業大学、国土交通省国土技術政策総合研究所、(株) アプライドに設置した。
- (オ) 広帯域地震計による中規模地震でも極短周期波動が地震波動の中に含まれていることを明らかに出来た。
- (カ) SMAC 型強震計との比較で広帯域地震計は SMAC 型計の限界を超えるものであることが判明した。しかし、計測値に大きな差異が見られるので、その原因を究明して両者の間で合理的な相関関係が得られるようにする必要がある。
- (キ) 構造物を破壊するような大きな加速度を持つ、極短周期の上下方向の波動が存在する可能性を軽量の落錘試験で広帯域地震計、SMAC 型強震計で立証できた。

あとがき

今後は広帯域地震計の改良を進めると同時に、多くの場所に設置してデータの蓄積を図ることが重要である。それによって、いままで分からなかった、衝撃波動の実態が明らかになり、耐震性の向上に大きく貢献することになる。

謝辞: 本研究を進める過程で、広帯域地震計の設置と地震観測に協力していただいた国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室上原浩明主任研究官と同センターの方々に深甚なる感謝を捧げたい。また、快く広帯域地震計の設置場所を提供していただいた八戸工業大学建築工学科教授毛呂真先生、地震動について種々の教えをいただいた同大学環境建設工学科教授坂尻直己先生にも御礼を申し上げたい。

さらに、上下方向の極短周期波動の存在を共に信じ、研究資料の提供をいただいた大阪市立大学名誉教授園田惠一郎先生、同じく資料の提供をいただいた新日本技研(株)会長佐々木道夫博士には大変力づけていただきました。

参考文献

- 1) 塩井幸武, 地震波の中の衝撃波動の計測と耐震設計手法に関する研究, 平成 14 年~16 年度科学研究費補助金(基礎研究(C)(2))研究成果報告書, 2005.3
- 2) 三陸はるか沖地震災害調査委員会, 三陸はるか沖地震災害調査報告書, 1995.7
- 3) 東日本旅客鉄道(株)盛岡支社, 三陸はるか沖地震災害記録(技術編), 1996.1
- 4) 地盤工学会 三陸はるか沖地震災害調査委員会, 平成 6 年度(1994 年)三陸はるか沖地震災害調査報告書, 1996.4
- 5) 塩井幸武, 三陸はるか沖地震における上下動の影響とみられる現象, 第 51 回土木学会年次学術講演会講演論文集 I-B, pp. 190-191, 1996.9
- 6) 建設省土木研究所, 土木研究所報告大 159 号, 1983.3
- 7) 日経 BP 社, 阪神大震災の教訓, 1995.3
- 8) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会, 共護憲南部地震における道路橋の被災に関する調査 中間報告, 日本道路協会, 1995.3
- 9) 大阪市立大学工学部, 阪神・淡路大震災の調査報告, 大阪大学紀要特別号 資料: 初期上下動の証言集, pp. 189-270, 1997.1
- 10) 塩井幸武, 滝田 貢, 境 友昭, 地震時の衝撃波動の存在と計測地震計の開発, 三陸はるか沖地震 10 周年記念シンポジウム論文集, pp. 108-115, 2004.12
- 11) 塩井幸武, 石川 詳, 地震時の上下震動の影響と RC 部材の靱性向上のための配筋, 三陸はるか沖地震シンポジウム, pp. 117-124, 1998.1
- 12) 沢井広之, 塩井幸武, 吉田好孝, 境 友昭, 多点測定法による杭の支持力の測定, 土木学会論文集 No. 547, III-36, pp. 67-74, 1996.9
- 13) 沢井広之, 塩井幸武, 吉田好孝, 境 友昭, Determination of the bearing capacity of a large diameter pile from the dynamic loading test, 5th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Pile, pp. 788-798, 1998.9
- 14) 境 友昭, 塩井幸武, 波動理論に基づいた杭の支持力測定方法の適用限界, 第 32 回地盤工学研究発表会, PP. 449-452, 1997.7
- 15) 沢井広之, 塩井幸武, 吉田好孝, 境 友昭, 杭頭計測法による杭の支持力管理技術, 土木学会論文集 No. 575 III-40, pp. 199-206, 1997.9