

روش جدیدی برای بررسی و تست اعضای پس کشیده پلهای پیش تنیده بتنی

غلامرضا فاطمی نایینی *

استادیار دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان

ناصر نعمت بخش **

استادیار دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان

(تاریخ دریافت ۷۹/۲/۱۸، تاریخ تصویب ۸۱/۳/۴)

چکیده

استحکام اعضای پس کشیده، سازه های پیش تنیده بتنی اساساً به مقاومت کششی فولاد های پس کشیده آنها بستگی دارد. برای جلوگیری از زنگ زدن، این فولادها معمولاً در داخل لوله های پلاستیکی^۱ یا لوله های فولادی گالوانیزه^۲ قرار گرفته و لوله ها بوسیله ملات های سیمانی پرمیشوند. با وجود این ممکن است بواسطه روش نا صحیح پر کردن این لوله ها، فولادهای داخل دچار زنگ زدگی گردند. مضافاً، طراحی نامطلوب ملات استفاده شده با عث آب دادن^۳ ملات سیمانی (جدا داشتن آب از دانه ها) میشود که در موقع آب دادن ملات، آب ملات رو آمده و پس از گرفتن و سفت شدن ملات، بداخل ملات سفت شده رسوخ کرده و جای آن بصورت حفره های طویل و در بعضی مواقع به طول سرتا سر لوله خالی میماند. این حفره ها که حفره های آب دادگی^۴ نامیده میشوند، یکی از مهمترین عوامل زنگ زدن فولاد داخل لوله ها میباشد چون مسیری را برای حرکت و نفوذ محلولات نمک و بقیه محلول های مضر شیمیایی از طریق ابتدا وانتهای گیره^۵ و ترکهای موجود در عضو فراهم می کند. این تحقیق روشی غیر مخرب بنام ضربه - اکو^۶ را برای بررسی موقعیت ملاتهای داخل این لوله ها و تعیین محل و اندازه حفره های احتمالی طراحی میکند. بررسی های تئوری و آزمایشگاهی و عملی انجام گردیده، امکان ردیابی و تعیین اندازه این حفره ها با قابلیت اطمینان بالا را در اعضای پس کشیده بوسیله این روش نشان میدهد. در این بررسی نشان داده شده است که اطلاعات مربوط به وجود و اندازه این حفره ها میتواند بوسیله بررسی مقدار فرکانس های غالب برگشتی حاصل از یک ضربه مکانیکی روی سطح عضو بتنی از سطح آزاد این حفره ها بدست آید.

واژه های کلیدی: لوله های پلاستیکی، لوله های فولادی گالوانیزه، آب دادن (ملات سیمانی)، حفره های آب دادگی، گیره، ضربه، سن فرناندو، پالس - اکو، حوزه زمان برگشتی، سوراخ کردن و بررسی جریان هوا، روش فیبر نوری، روش رادیو گرافی، پل جعبه ای، موج ریلی، ترانس دوسر، تبدیل سریع فوریه، حوزه زمانی

مقدمه

اثر این چسبندگی در طراحی برای انتقال تنش در نظر گرفته نمیشود چون بیشتر این انتقال تنش در ابتدا و انتهای گیره ها انجام خواهد گرفت ولی یک حاشیه امنیت اضافی را بوجود آورده و ضمناً برای کنترل ترکها و تأمین شکل پذیری سازه در بارهای نهائی بسیار مفید میباشد. بطور کلی رفتار بلند مدت اعضای پس کشیده سازه های پیش تنیده بتنی وقتی که از طراحی، مصالح مصرفی و روش های اجرایی مناسبی استفاده شده باشد رضایتبخش گزارش شده است. یک بررسی همه جانبه فولاد های در بر گرفته بوسیله ملاتهای سیمانی در یک

بیشتر سازه های پیش تنیده موجود در دنیا در چهل سال اخیر ساخته شده اند. معمولاً فولادهای کشیده شده، داخل گیره های با (یا بدون) ملات قرار می گیرند. حفاظت فولادهای با مقاومت بسیار بالای داخل این لوله ها یا بوسیله محیط قلیایی روغن های ضد زنگ و یا بوسیله محیط قلیایی ملات سیمان پرتلند تأمین میشود. معمولاً گیره های اعضای پس کشیده پلهای بوسیله ملات های سیمانی پرمیگردند. استفاده از این ملاتها باعث ایجاد چسبندگی بین این فولادها و بتن اطراف بوسیله سطح تماس ملات و گیره تأمین میگردد. اگر چه

* Fatemi @Trideng.com

** Nemat @Eng.ui.ac.ir

پس کشیده سازه های پیش تنیده بتنی تمرکز یافت. بررسی تئوری با ضافه یک سری آزمایش های آزمایشگاهی انجام شد، تا اثر فاکتورهای مختلف بر انتشار امواج داخل اعضای پس کشیده پلها مشخص شود. پس از طرح و ساخت تجهیزات لازم یک پل پیش تنیده جعبه ای^{۱۴} برای ردیابی حفره های احتمالی با وسایل و روشهای طراحی شده مورد آزمایش قرار گرفت. این مقاله بحث و بررسی نتایج بدست آمده از آزمایشهای آزمایشگاهی و در محل میباشد.

اصول روش ضربه-اکو

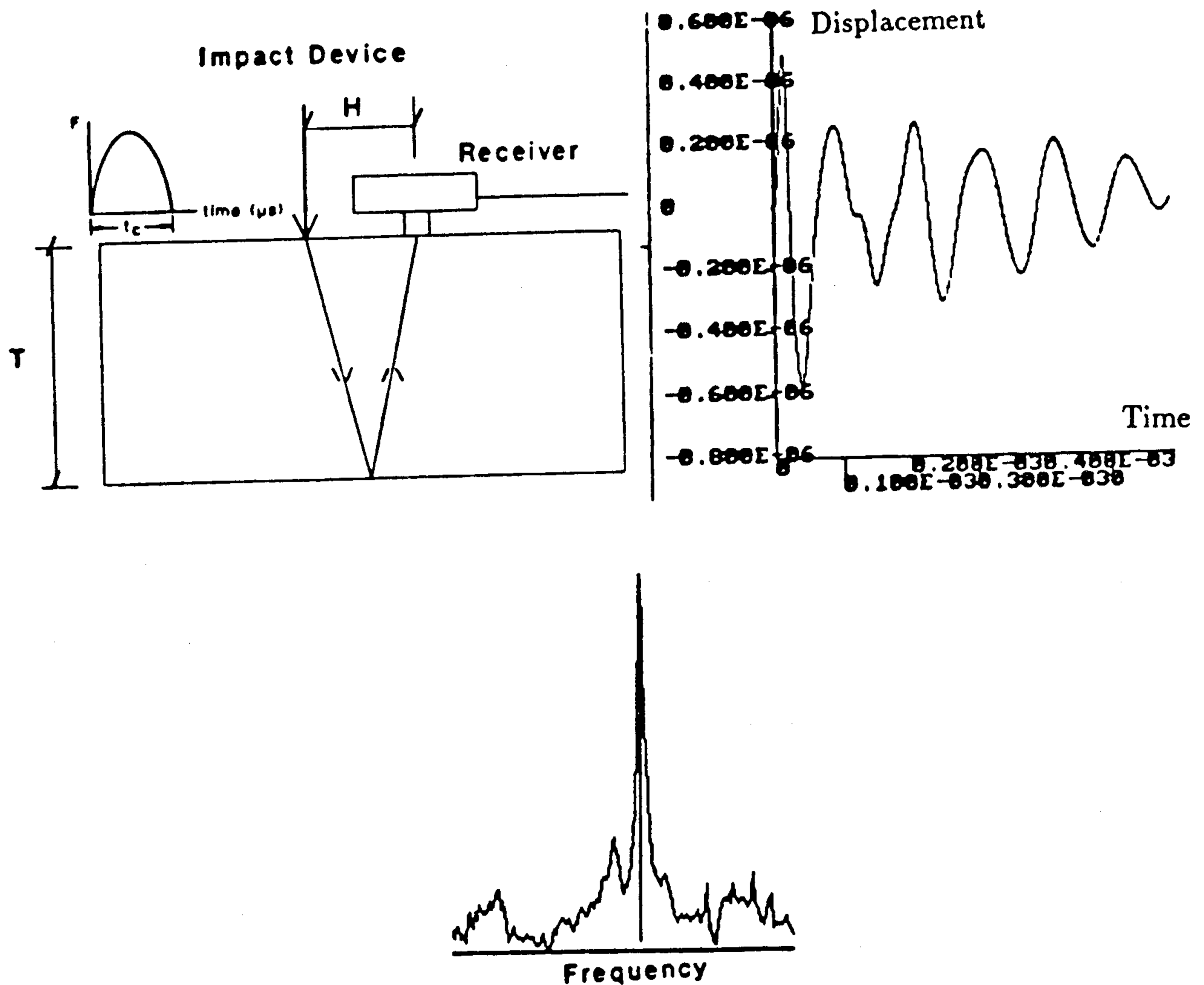
اصول زیر بنائی تئوری، وسایل و چند کاربرد محدود روش ضربه-اکو بصورت مقاله هایی موجود است [۳]. روش مذکور با موفقیت برای تشخیص کرم خوردگی بتن و لایه لایه شدن، بصورت آزمایشگاهی استفاده شده است [۴]. روش ضربه-اکو بطور شماتیک در شکل (۱)، نشان داده شده است. یک ضربه بوسیله یک ضربه زن مکانیکی با سطح تماس نقطه ای تنش پالسی به عضو بتنی وارد می کند. تنش در داخل عضو بتنی بصورت امواج کروی شامل امواج فشاری (P) در جهتی موازی انتشار و امواج برشی (S) در جهتی عمود بر جهت انتشار منتشر می شوند. مضافاً، امواج سطحی بنام ریلی^{۱۵} (R) که روی سطح عضو بتنی منتشر و از نقطه اعمال ضربه دور میشوند و در این مسیر شدت آن بصورت توانی نسبت به ضخامت کم می شود.

امواج S و P در داخل عضو حرکت کرده و در موقع برخورد با سطوح مختلف با جنس متفاوت و یا سطوح انتهایی برگشت داده شده به طرف سطح عضو بر می گردد. برگشت این امواج به سطح موجب جابجایی هایی در سطح شده و این جابجایی بوسیله یک ترانس دوسر^{۱۶}، در یافت شده و تبدیل به ولتاژ الکتریکی میشود. اگر ترانس دوسر دریافت کننده به اندازه کافی به محل ایجاد موج نزدیک باشد جابجایی ایجاد شده اساساً بخاطر برگشت موج P خواهد بود. اگرچه ابتدای منحنی جابجایی و زمان، شامل یک اثر احاطه کننده موج R خواهد بود ولی با توجه به تفاوت سرعت انتشار امواج S و P اثر آنها کاملاً قابل تمایز و تشخیص میباشد.

سری از سازه های پیش تنیده تازه ساخته شده و پیش تنیده متلاشی شده در زلزله سان فرناندو^۷ در سال ۱۹۷۱ در کالیفرنیا نشان دهنده وضع رضایتبخش این فولادها و ملاتهای پوشاننده آن میباشد [۱]. اگرچه چندین گزارش نیز مبنی بر زنگ زدگی در فولادهای محصور در گیره های اعضای پس کشیده سازه های پیش تنیده وجود داشته است [۲]. عموماً وجود رطوبت و مواد شیمیایی مضر مثل محلولهای نمک در اطراف فولاد میتواند موجب زنگ زدگی فولاد شده و باعث اختلال در رفتار پلها و سازه های پیش تنیده با اعضای پس کشیده گردد. انتخاب ناصحیح مواد یا مواد افزودنی با اثر نامطلوب، طراحی و جزئیات ضعیف برای مثال منظور کردن تعداد زیاد کابلها در گیره ها، باعث کامل پر نشدن گیره ها و ایجاد حفره های خالی میشود. با توجه به اینکه کابلها و میلها های فولادی قسمت اعظم بارهای خارجی را تحمل میکنند، اطمینان حاصل کردن از وضعیت سلامت آنها در طول عمر مفید سازه بسیار حائز اهمیت میباشد. بنابراین موقعیت ملات اطراف این فولادها باید باروشی قابل اطمینان در زمانهای مختلف بررسی شود. در چند دهه اخیر تحقیقات و مطالعات متعددی برای استفاده از روش های غیر مخرب برای بررسی وضعیت ملات های اطراف فولادهای پس کشیده انجام گرفته است اما موفقیتهای بسیار محدودی در این زمینه کسب شده است. در این تحقیق تعدادی از روش های غیر مخرب موجود با امکان استفاده در بررسی و ردیابی حفره های احتمالی در گیره اعضای پس کشیده، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. این روشها شامل روشهای زیر می باشد:

پالس-اکو^۸، زمان برگشتی^۹، سوراخ کردن و بررسی جریان هوا در سوراخها^{۱۰}، روش فیبرنوری^{۱۱}، ضربه-اکو، روش رادیوگرافی^{۱۲} و روش ترموگرافی^{۱۳}. از میان روشهای بررسی شده، روش ضربه-اکو مناسب تر و عملی تر از روشهای دیگر تشخیص داده شد. بقیه روشها به جز روش مشاهده از طریق فیبر نوری که در بررسی اندازه حفره های شناسایی شده بوسیله روشهای دیگر قابل استفاده میباشد، مؤثر و یا عملی نبودند.

در نتیجه این تحقیق بر توسعه، تعمیم و ساخت وسایل و ضربه-اکو برای ردیابی حفره های داخل گیره های اعضای



شکل ۱: شماتیک اصول روش ضربه و اکو.

بطوریکه C_p سرعت انتشار موج P و $(2T)$ مسیر طی شده رفت و برگشت موج P میباشند. اندازه های فرکانس های غالب، مشخص کننده فرکانس برگشت موج P از سطوح داخلی یا انتهای عضو میباشد. اگر سرعت و فرکانس برگشت موج P مشخص شود ضخامت عضو یا فاصله تا سطوح داخلی از فرمول (۲) به راحتی محاسبه میشود:

$$T = C_p / 2f_p \quad (2)$$

سرعت انتشار موج P معمولاً بوسیله آزمایش به راحتی بدست آمده و منحنی فرکانس و شدت به راحتی بوسیله

آنگاه با بررسی منحنی جابجایی وزمان، زمان حرکت dt که از زمان شروع فرستادن موج تا زمان برگشت اولین موج P میباشد، بدست میآید. اگر سرعت موج C_p در نمونه تحت آزمایش مشخص باشد سپس فاصله طی شده $(2T)$ از سطح برگشتی میتواند محاسبه شود. البته تفسیر اطلاعات در منحنی های زمان و جابجایی بسیار وقت گیر میباشد. راه بهتر و مؤثرتر ایجاد و بررسی منحنی فرکانس و شدت امواج برگشتی میباشد. فرکانس برگشت موج P به سطح، از فرمول (۱) بدست می آید:

$$f_p = C_p / 2T \quad (1)$$

بسته به اینکه حفره ها تا چه اندازه ای مورد ردیابی قرارگیرد باید دامنه ضربه ونتیجتاً اندازه گلوله مصرفی مشخص شود. سنسور دریافت کننده امواج یک ترانس دوسر جابجایی میباشد که سطح تماس آن نقطه ای بوده (سطح تماس بسیار کوچک) و شامل یک عضو پیزو الکتریکی مخروطی شکل و عضو ذوزنقه ای از جنس برنج که بر روی آن قرار داردمی باشد. سیستم بررسی اطلاعات شامل یک کامپیوتر قابل حمل متصل به یک مبدل A/D با سرعت نمونه برداری ۱/۰ مگاهرتز میباشد. تمام تجهیزات بوسیله محققین طراحی و ساخته شد.

بررسی های آزمایشگاهی و در محل

یک سری تست های آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر آکو های دریافتی ضربه- آکو انجام شد. این پارامتر شامل حفره های کروی هوا ، ترکهای سطحی ، گیره های فلزی موجود دراعضای پس کشیده بتنی، گیره های پلاستیکی موجود در اعضای پس کشیده بتنی، گرم خوردگی بتن، آرماتورهای با اندازه های مختلف میباشد. برای امتحان و تایید رفتار و عملکرد ترانس دوسر ساخته شده در این تحقیق یک بررسی مقایسه ای بین عملکرد ترانس دوسر و تحلیل اطلاعات به روش اجزاء محدود انجام شد. این بررسی با مقایسه منحنی تغییرمکانهای لحظه ای ، حاصل از یک نقطه نزدیک به نقطه ای که یک ضربه نیم سینوسی با دامنه ۲۰ میکروثانیه وارد شده باشد و تغییرمکان های لحظه ای حاصل از ضربه وارد ه بوسیله ضربه زن مکانیکی با دامنه ۲۰ میکرو ثانیه انجام شد. شکل های (۲) و (۳) منحنی جابجایی را برحسب زمان برای هر دو حالت نشان میدهند. بابررسی قسمت ابتدایی این دو منحنی تشابه آنها کاملاً محسوس میباشد. خلاصه بررسی آزمایشگاهی برای فاکتور های گیره های فلزی و پلاستیکی بدون ملات و پر از ملات و گزارشی از بررسی در محل به شرح زیرمیباشد.

الف) لوله های فلزی و پلاستیکی پر از ملات و بدون ملات
نمونه های آزمایشگاهی شامل گیره های فلزی و پلاستیکی پر از ملات ساخته شد. شکل شماره (۴) این نمونه آزمایشگاهی را نشان میدهد. این نمونه شامل دو

تبدیل سریع فوریه^{۱۷} منحنی حوزه زمانی^{۱۸} بدست می آید. موقعیکه امواج تنشی به سطح تماس بین دو جنس مختلف برخورد میکند اگر برخورد موج بصورت عمود برسطح باشد موج فقط برگشت داده میشود و شدت موج برگشتی بستگی به اختلاف مقاومت آکوستیکی (حاصلضرب سرعت حرکت موج در ماده در جرم مخصوص ماده) دو ماده دارد. اگر مقاومت آکوستیکی ماده دوم بزرگتر از ماده اول باشد، مثل سطح تماس بتن و فولاد، شدت موج برگشتی از همان جنس شدت موج وارد شده میباشد. مثلاً اگر موج بصورت فشار وارد شده باشد بصورت همان فشار برگشت داده میشود ولی اگر مقاومت آکوستیکی ماده دوم کمتر از مقاومت آکوستیکی ماده اول باشد، مثل سطح تماس بتن و هوا، موج برخوردی در برگشت تغییر ماهیت داده و اگر در ابتدا فشاری بوده باشد بصورت کششی برگشت داده میشود. بنابراین یک تغییر فاز ۱۸۰ درجه در ارتعاشات روی سطح عضو تحت آزمایش ایجاد میشود و پریود جابجایی ذرات سطح به وسیله برگشتن موج های P از سطح تماس بتن و فولاد دو برابر درمقایسه با پریود برگشت موج های P از سطح تماس بتن و هوا میباشد. بنابراین فرکانس برگشت موج های P از سطح تماس بتن - فولاد نصف آنهاست که از سطح تماس بتن - هوا برگشت شده اند. این اطلاعات در تشخیص سطوح تماس بتن - فولاد از بتن - هوا بسیار مفید میباشد.

وسایل و تجهیزات

وسایل و تجهیزات استفاده شده در روش ضربه- آکو از سه وسیله اصلی تشکیل میشود، یک منبع تولید امواج یک ضربه زن مکانیکی، یک ترانس دوسر جابجایی و یک سیستم کامپیوتری بررسی اطلاعات. منبع تولید امواج در این روش یک ضربه زن مکانیکی است که درحقیقت یک گلوله فولادی را به وسیله فنر به طرف سطح عضو بتنی می پراند. ضربه زن های فنری باری تقریباً به شکل نیم سینوس با دامنه های مختلف به سطح بتنی وارد می کنند. دامنه ضربه مذکور، کنترل کننده اندازه حفرههایی است که قابل تشخیص میباشد چون فقط حفره هایی با ابعادی بزرگتر از طول موج امواج حاصل از ضربه ایجاد شده قابل تشخیص میباشد. بنابراین

حفره ها بدون اطلاع قبلی شد.

ب) بررسی و تست در محل

برای بررسی موقعیت ملات در داخل گیره های یک پل دو دهانه پیش تنیده با اعضای پس کشیده جعبه ای شکل، واقع در یک بزرگراه مورد آزمایش ضربه-اکو قرار گرفت. شکل (۸) یک نمونه از پروفیل گیره های محتوی فولاد پس کشیده را نشان میدهد. گیره بالایی آن شامل ۳۱ کابل ۷ سیمه و لوله پایینی و گیره پایینی آن شامل ۱۹ کابل ۷ سیمه میباشد. شکل (۹) طیف فرکانسی نقطه ای دور از گیره های محتوی کابل های پس کشیده با فرکانس غالب $7/03$ کیلوهرتز را نشان میدهد. این فرکانس مربوط به ضخامت جان می باشد و به واسطه انتشار موج P با سرعت 4285 متر در ثانیه (168700 اینچ در ثانیه) در ضخامت 30 سانتیمتر (12 اینچ) می باشد. شکل (۱۰) نشان دهنده طیف فرکانسی نقطه ای در بالای گیره پر از ملات میباشد که دارای فرکانس غالب $6/1$ کیلوهرتز است. شکل (۱۱) طیف فرکانسی نقطه ای بالای گیره شامل کابل های پس کشیده می باشد که فرکانس غالب $4/93$ کیلوهرتز را نشان میدهد. این افت محسوس در فرکانس غالب نشان دهنده حفره هوا در گیره میباشد. وجود حفره پس از کندن آن محل مورد تأیید قرار گرفت که دقت و قابلیت اطمینان روش مذکور را نشان می دهد.

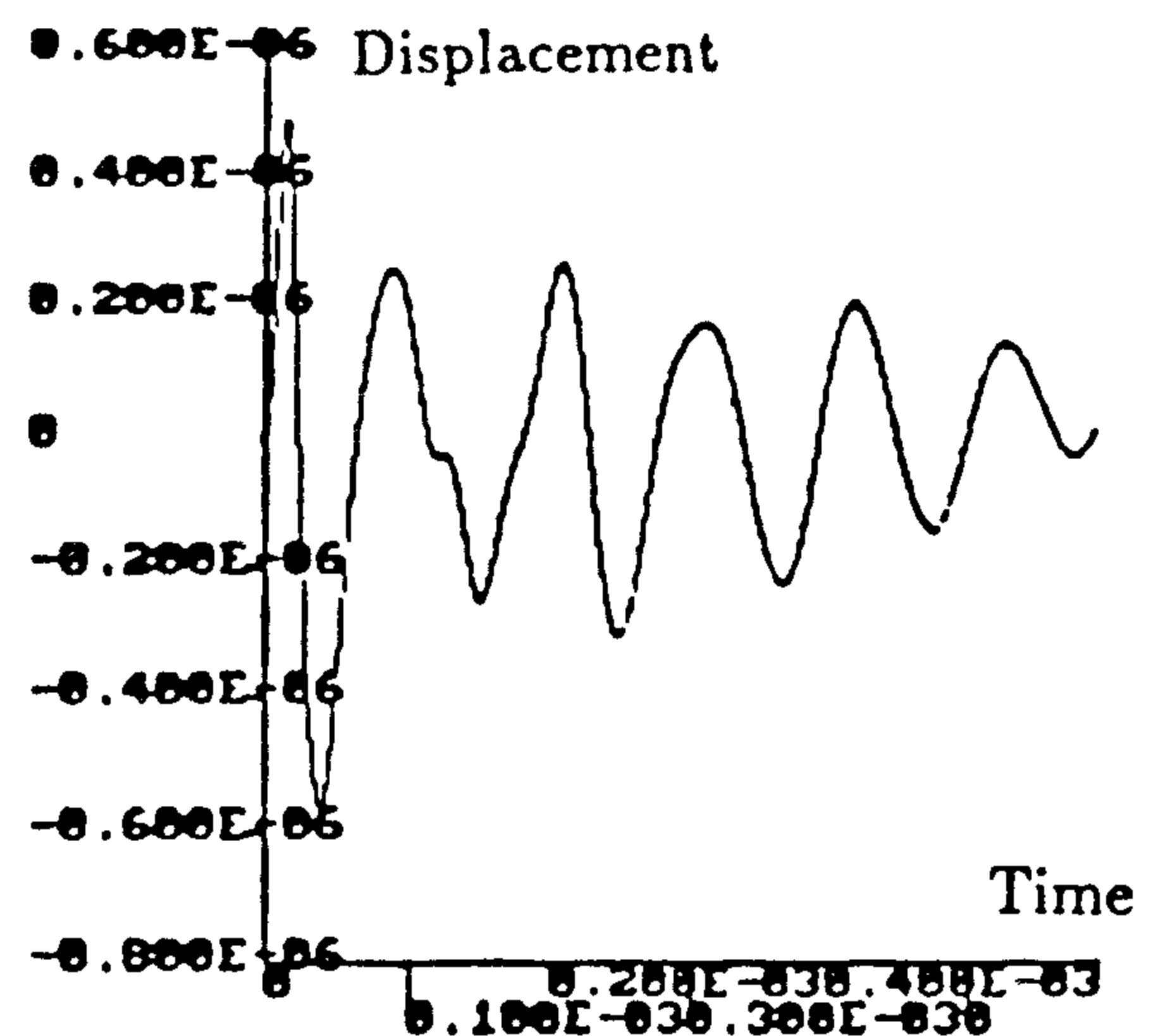
نتایج و پیشنهادات

نتایج این مطالعه یق نشان میدهد که با استفاده از روش ضربه-اکو میتوان حفره های هوا را در گیره های محتوی کابل های فولادی پس کشیده با قابلیت اطمینان خوب تشخیص داد. ضمناً تشخیص کرم خوردگی و وجود بتن با کیفیت نامناسب نیز با این روش قابل تشخیص میباشد. وسایل ساخته شده در این تحقیق فقط به منظور انجام مراحل تحقیق بوده و اصلاح و ترمیم آن برای استفاده عملی باراندمان بالا الزامی میباشد.

سپاسگزاری

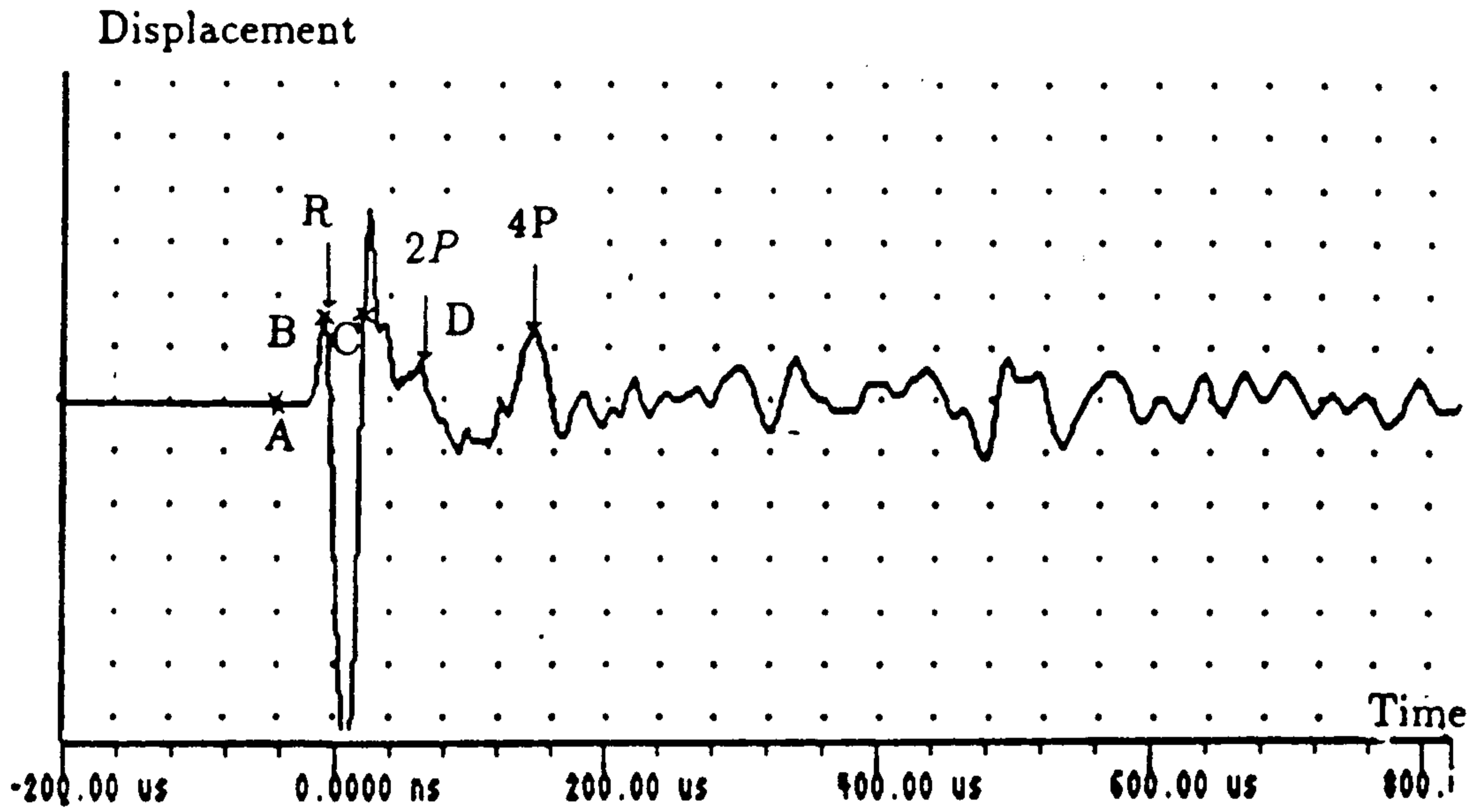
این تحقیق با استفاده از امکانات دانشگاه اصفهان و دانشگاه ویسکانسین امریکا انجام گردید.

گیره یکی پلاستیکی و دیگری فولادی به قطر 75 میلیمتر (۳ اینچ) و در هر گیره 12 کابل فولادی به قطر 16 میلیمتر ($0/625$ اینچ) قرار داده شد. هر کابل فولادی شامل 7 سیم فولادی میباشد. گیره ها از ملات پر شده اند بجز در محل های هاشورزده که این محل ها بطور عمدی خالی از ملات میباشد که مدلی برای حفره های هوا هستند. این حفره ها از طول $12/5$ سانتیمتر (۵ اینچ) تا $45/5$ سانتیمتر (۱۸ اینچ) می باشند. شکل (۵) نتیجه آزمایش ضربه-اکو را بصورت طیف فرکانسی، که برای نقطه ای دور از گیره ها بدست آمده نشان میدهد. فرکانس غالب $5/22$ کیلوهرتز مطابق با فرکانس رفت و برگشت اکو ها در عمق نمونه میباشد. این فرکانس با توجه به مشخص بودن ضخامت نمونه، سرعت حرکت موج را 4115 متر بر ثانیه (162000 اینچ بر ثانیه) مشخص میکند.

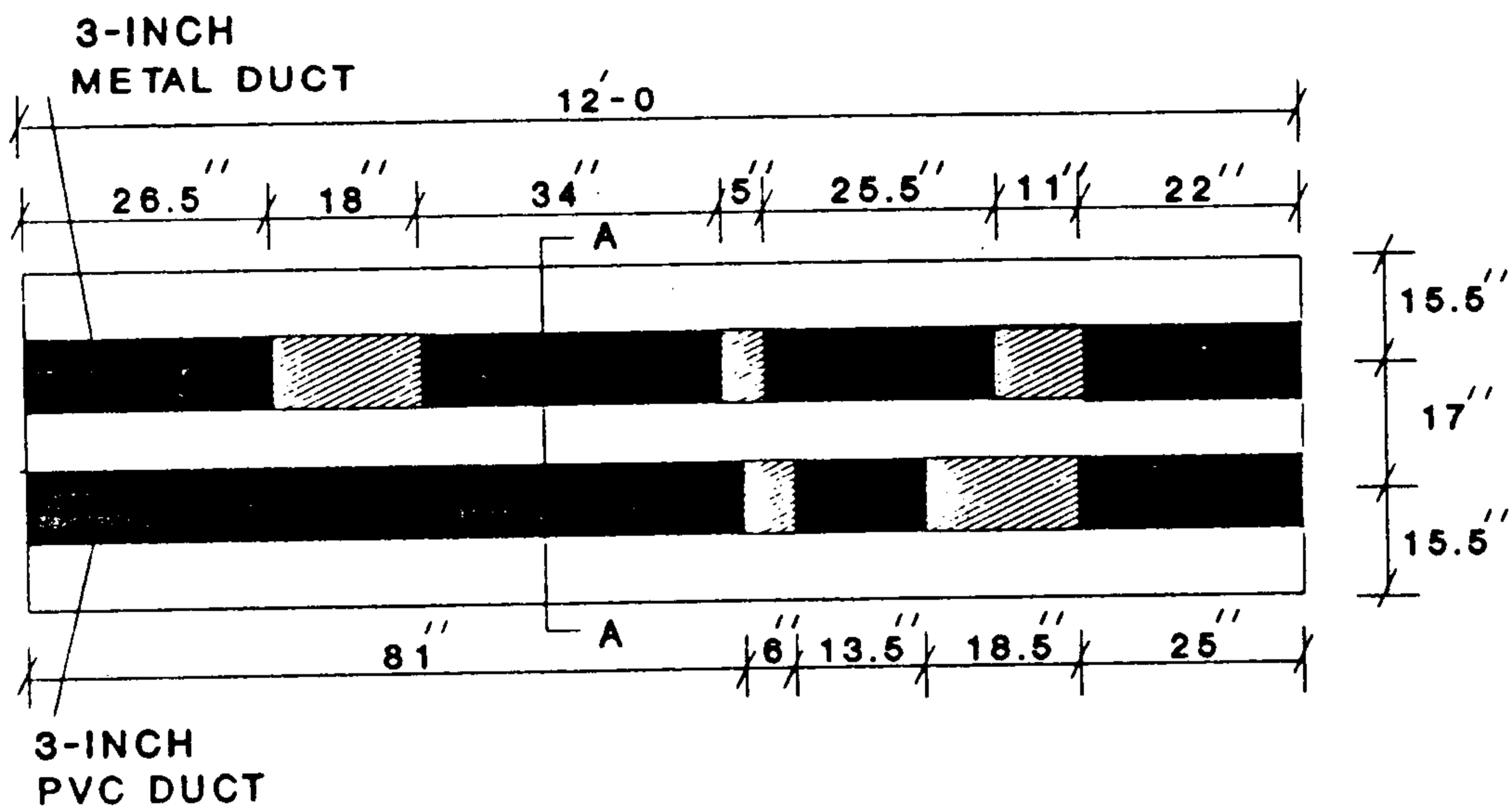


شکل ۲: منحنی جابجایی های لحظه ای بدست آمده از آنالیز اجزای محدود برای یک نقطه نزدیک به نقطه ای که یک بار نیم سینوسی با دامنه 20 میکرو ثانیه وارد شده است.

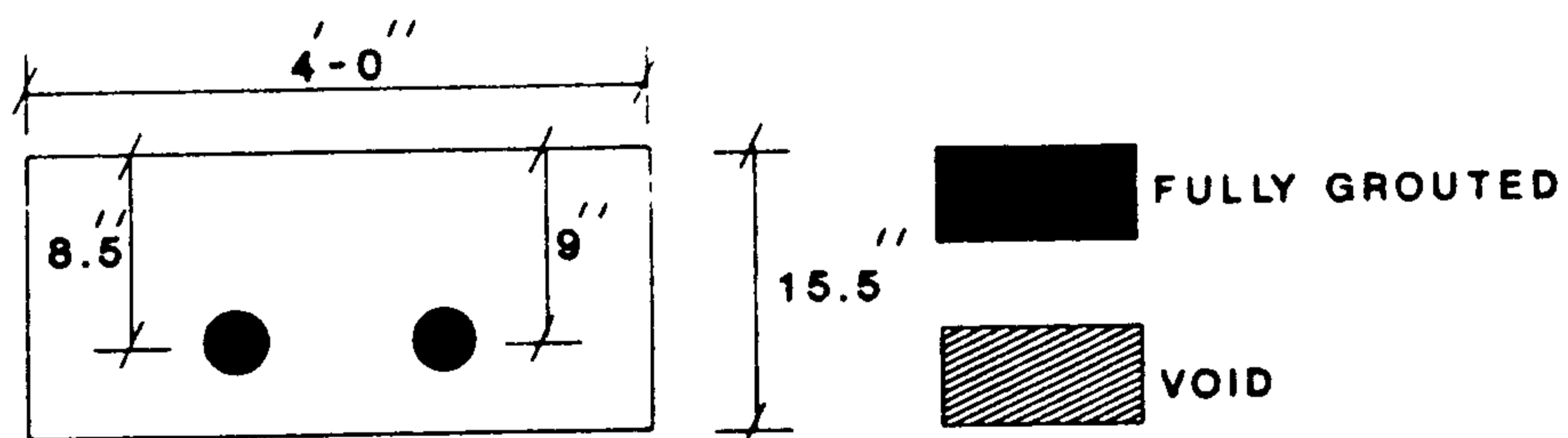
شکل (۶)، طیف فرکانسی مربوط به نقطه ای در بالای گیره پر از ملات است و دارای فرکانس غالب $4/54$ کیلوهرتز می باشد. این افت در فرکانس مربوط به عمق نمونه بواسطه شکست موج در داخل گیره است. شکل (۷) طیف فرکانسی مربوط به نقطه ای در بالای گیره خالی را نشان میدهد و دارای فرکانس غالب $4/05$ کیلوهرتز است. این افت محسوس در فرکانس بواسطه حرکت موج دور گیره و نتیجتاً طی مسیر طولانی ترمیباشد. این افت محسوس در فرکانس مربوط به عمق باعث شناسایی تمام



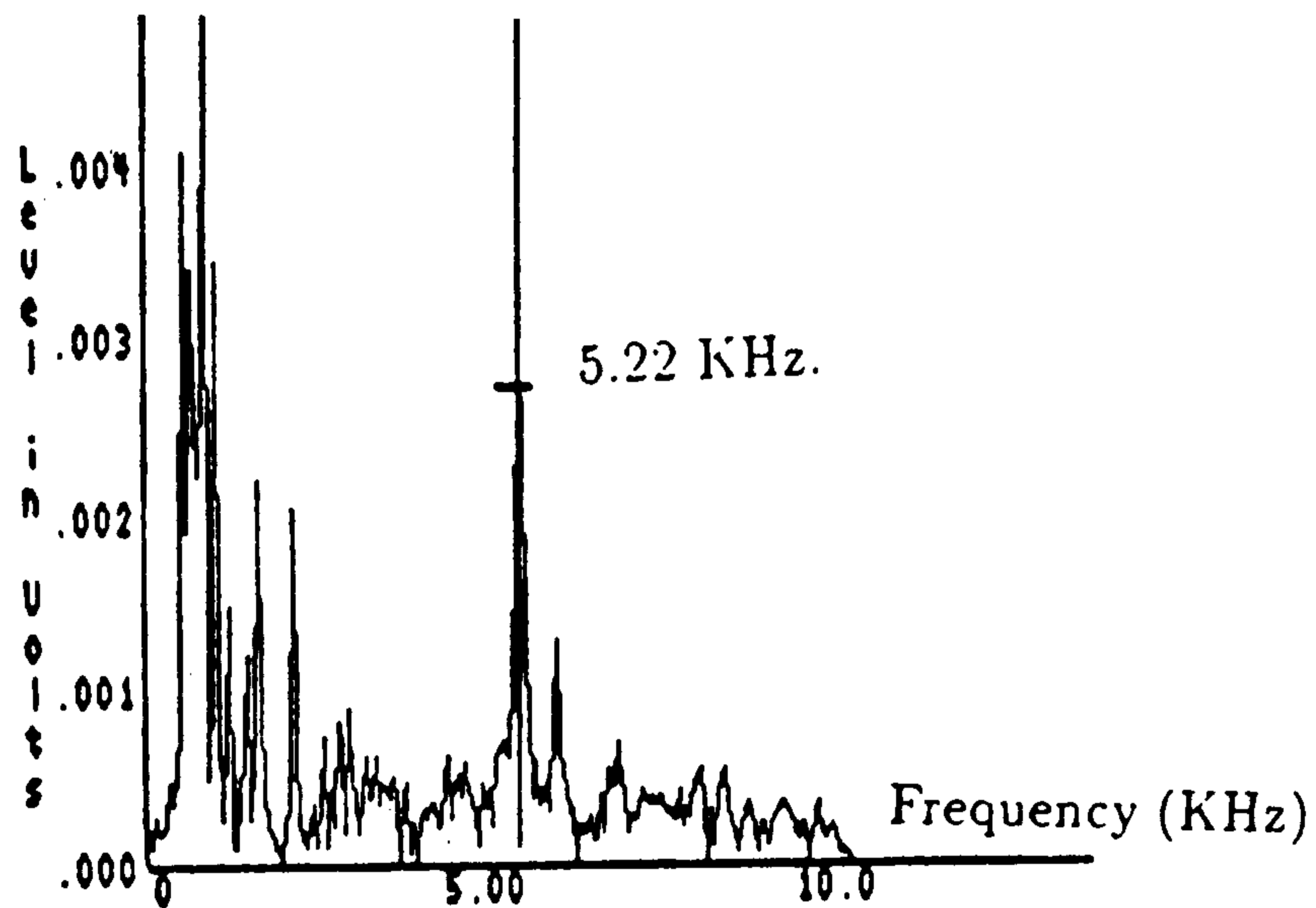
شکل ۳: منحنی جابجایی های لحظه ای بدست آمده از یک نقطه نزدیک به نقطه ای که یک ضربه مکانیکی با دامنه ۲۰ میکرو ثانیه وارد شده است.



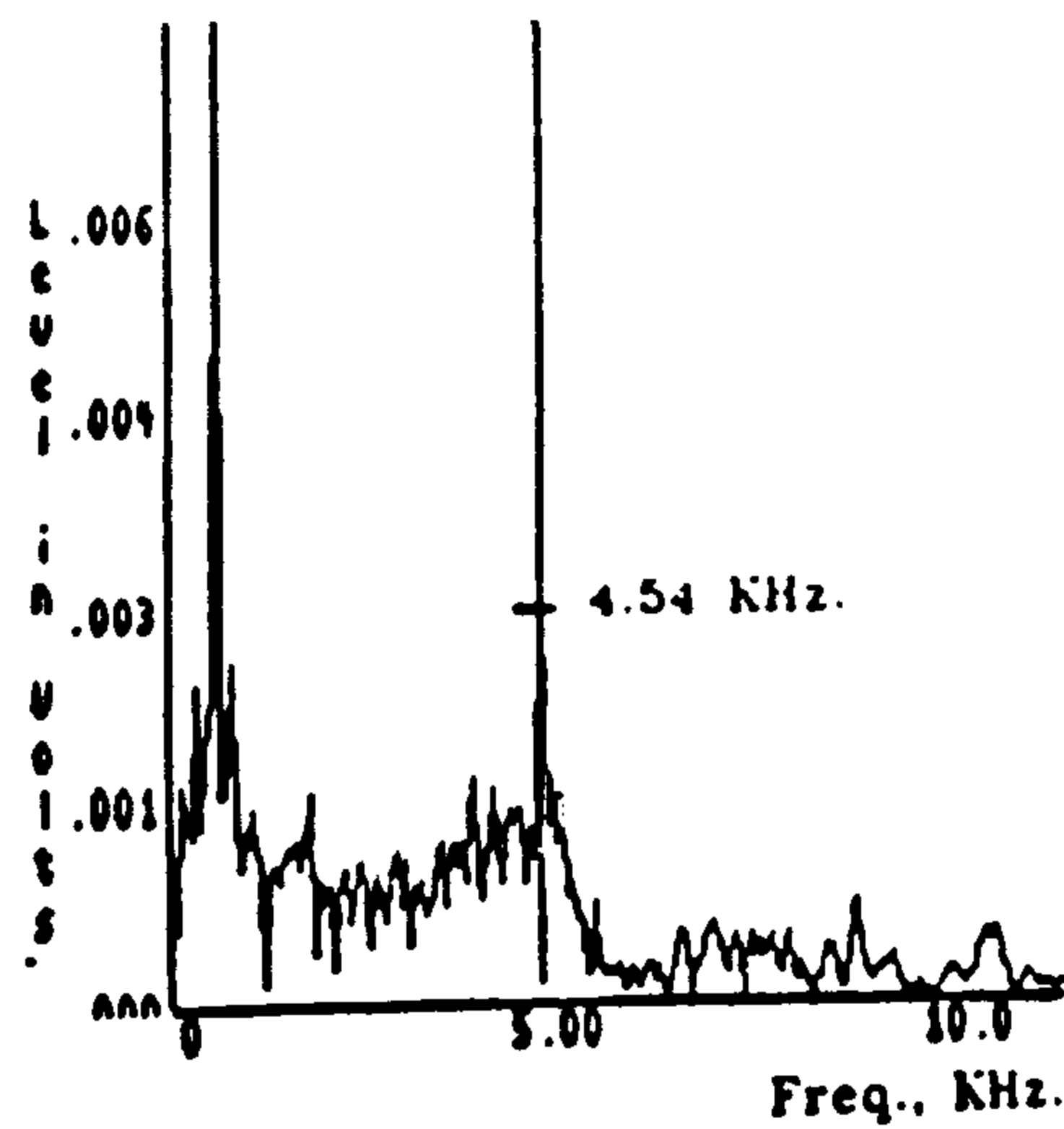
SECTION A-A



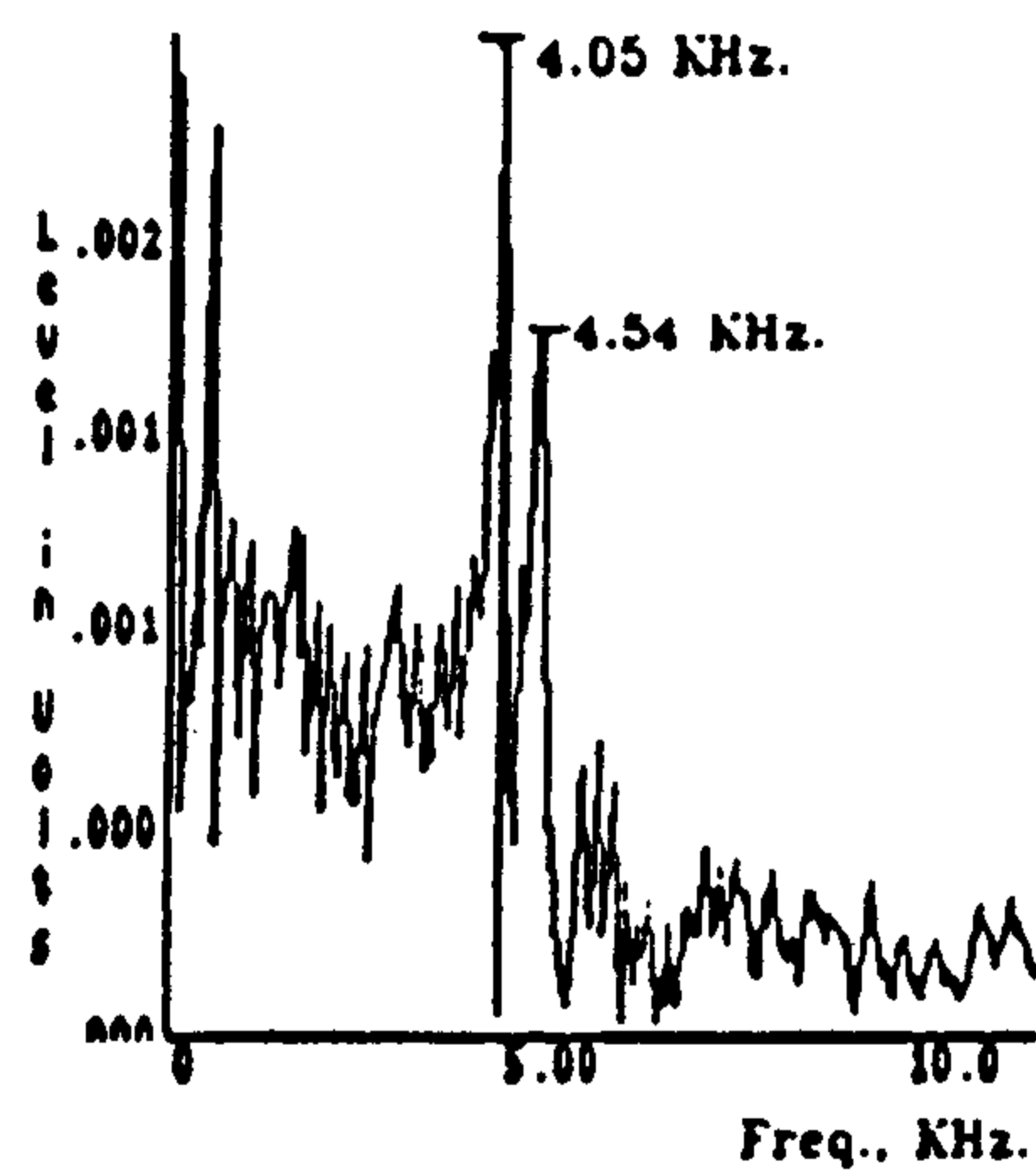
شکل ۴: نمونه آزمایشگاهی شامل گیره های فلزی و پلاستیکی با حفره های هوا.



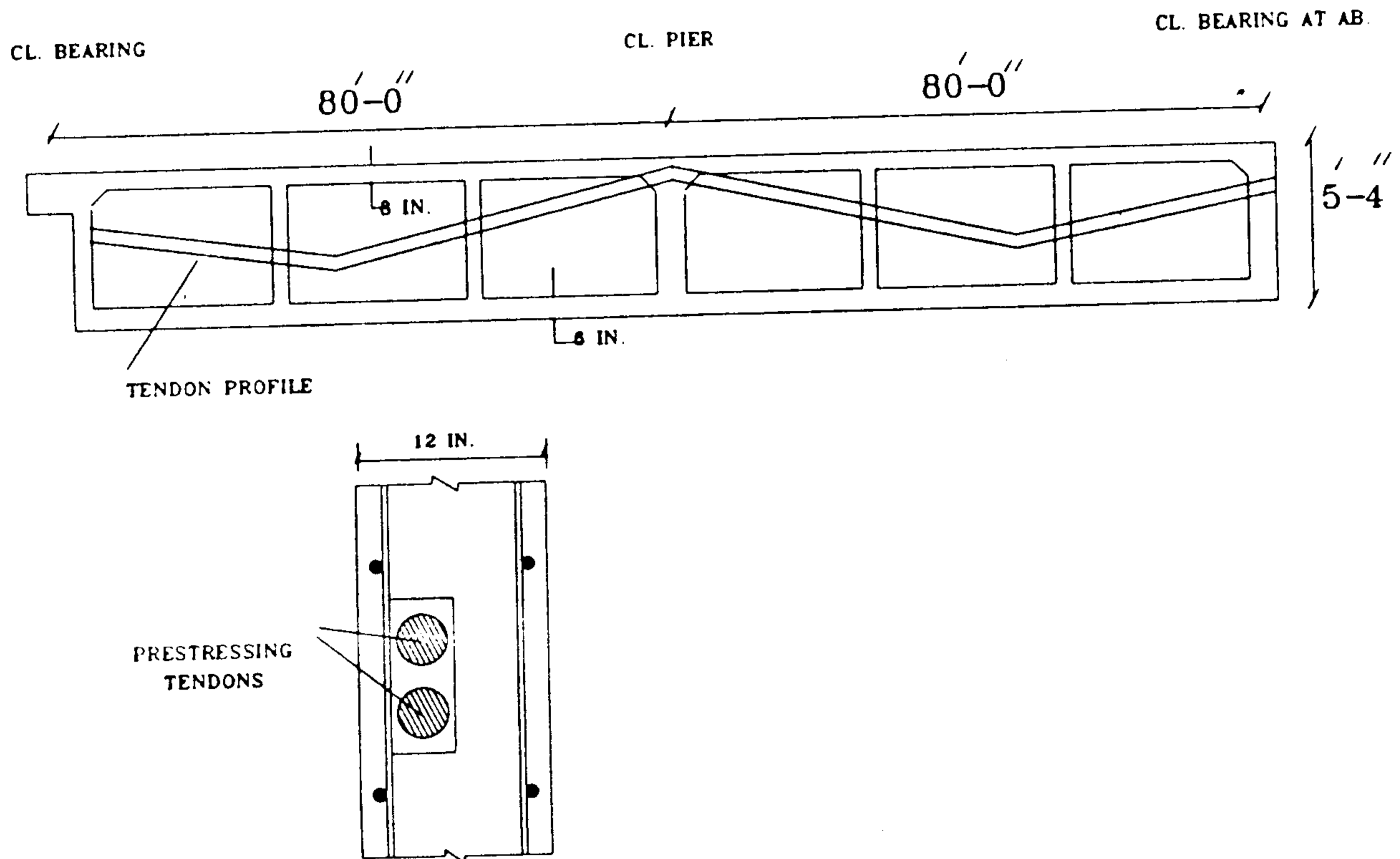
شکل ۵: طیف فرکانسی نتیجه آزمایش ضربه - اکو که برای نقطه ای دور از گیره ها بدست آمده است.



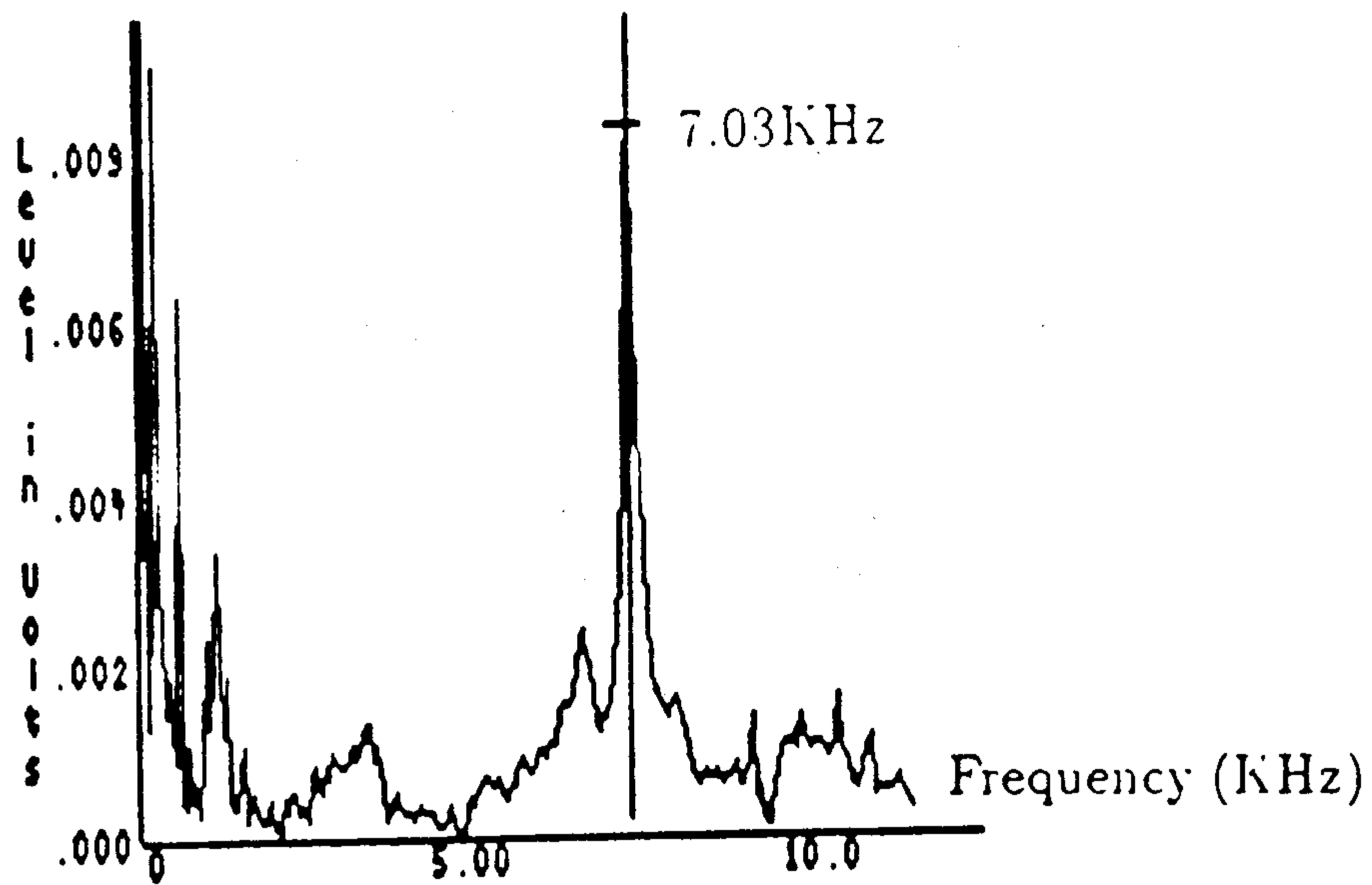
شکل ۶: طیف فرکانسی نتیجه آزمایش ضربه - اکو که برای نقطه ای در بالای گیره پر از ملات بدست آمده است.



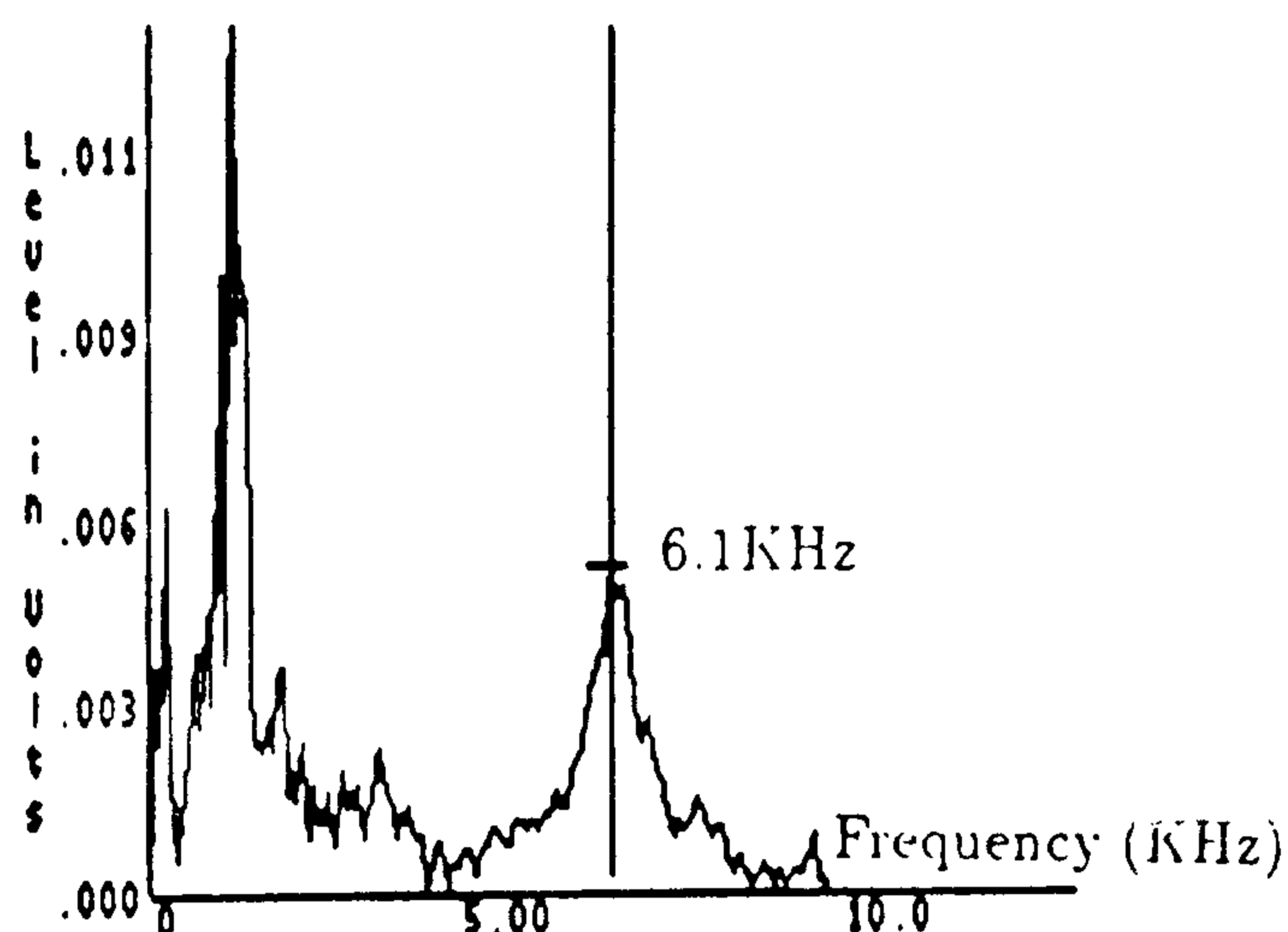
شکل ۷: طیف فرکانسی نتیجه آزمایش ضربه - اکو که برای نقطه ای در بالای گیره خالی از ملات بدست آمده است.



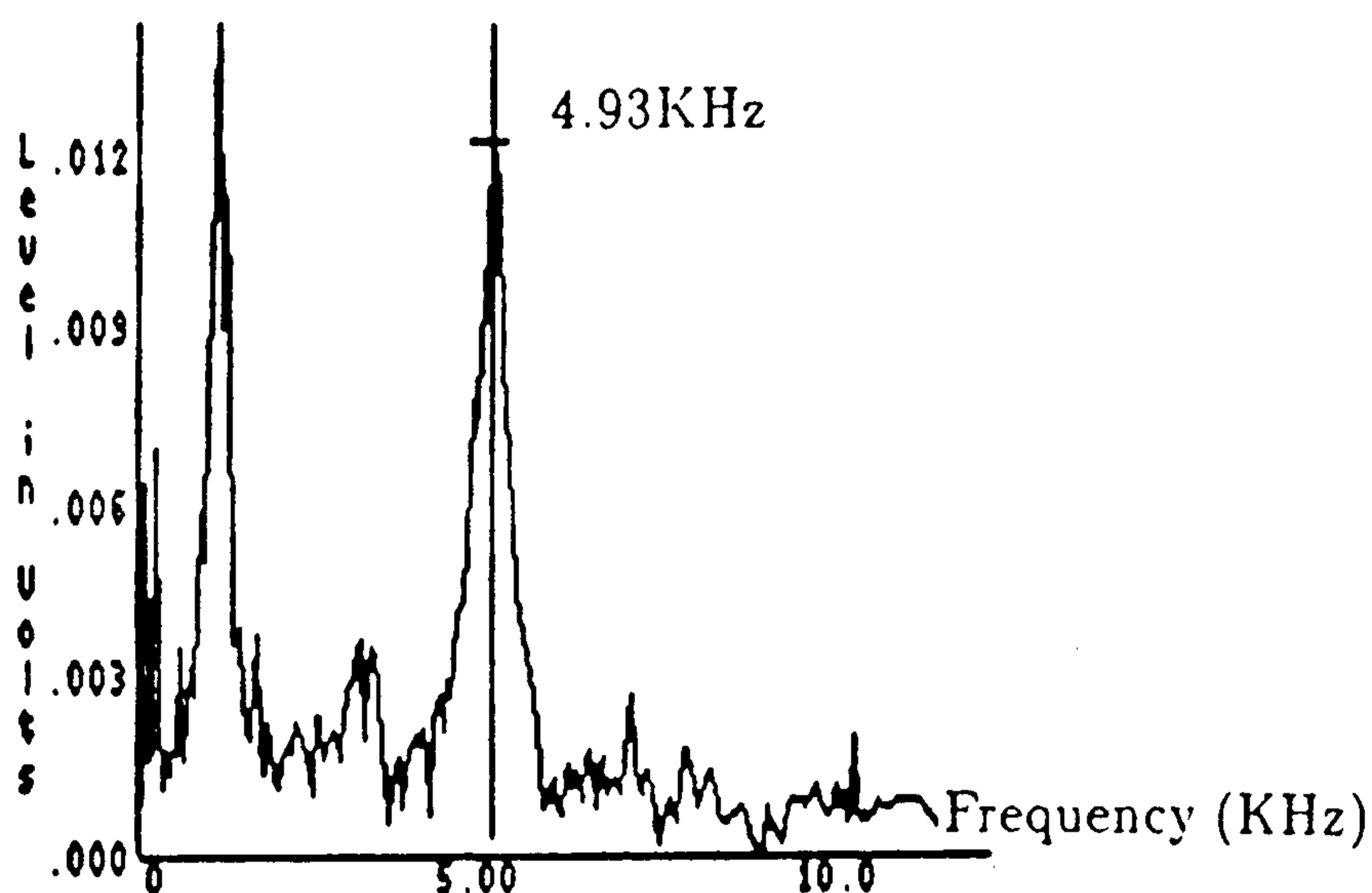
شکل ۸: یک نمونه از پروفیل موقعیت گیره های محتوی فولاد پس کشیده موجود در جان پل پیش تنیده جعبه ای شکل مورد آزمایش.



شکل ۹: طیف فرکانسی نتیجه آزمایش ضربه - اکو که برای نقطه ای دور از گیره های محتوی کابل های پس کشیده.



شکل ۱۰: طیف فرکانسی نتیجه آزمایش ضربه - اکو برای نقطه ای در بالای گیره پراز ملات .



شکل ۱۱: طیف فرکانسی نتیجه آزمایش ضربه - اکو برای نقطه ای بالای حفره هوای موجود در گیره .

مراجع

- 1 - Bezouska, T. J. (1977). "Field inspection of grouted post - tensioning tendons." *Post - Tensioning Institute*, Phoenix, Arizona, March 1977.
- 2 - Schupack, M. (1978). "A survey of the durability performance of post - tensioning tendons." *American Concrete Institute Journal*.
- 3 - Sansalone, M. and Carino, N. J. (1986). "Impact- echo: a method for flaw detection in concrete using transient stress waves." *NBSIR 86-3452, National Bureau of Standard, Gaithersburg, MD*, PP. 222.
- 4 - Sansalone, M. and Carino, N. J. (1988). "Impact - echo method of detecting honeycombing and the depth of surface opening cracks." *Concrete International, Design and Construction American Concrete Institute*.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1-PVC Ducts
- 2- Corrugated Steel Ducts
- 3- Bleeding
- 4- Bleed voids
- 5- Anchorages
- 6- Impact-Echo
- 7 - San Fernando
- 8 - Pulse- Echo
- 9 - Time Domain Reflectometry
- 10 - Drilling and Monitoring Air Flow
- 11 - Fiber Optics Visual
- 12 - Radiographic Techniques
- 13 - Thermographic techniques
- 14 - Box Girder Bridges
- 15 - Reyleigh Waves
- 16 - Transducer
- 17 - Fast Fourier Transform, FFT
- 18 - Time Domain