

重錘落下による地盤の衝撃振動特性に関する実験研究

Experimental study on vibration characteristics of soil under drop-weight impact loading

高橋 誠*, 敦賀 隆史*, 小柳 貴之*, 青山 雄一*,
野澤 貴**, 美原 義徳**, 田中 彩**, 伊藤 秀一***, 別府 万寿博****
Makoto Takahashi*, Takashi Tsuruga*, Takayuki Koyanagi*, Yuichi Aoyama*,
Takashi Nozawa**, Yoshinori Mihara**, Aya Tanaka**, Shuichi Ito***, Masuhiro Beppu****

*東京電力ホールディング株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

**鹿島建設株式会社 (〒107-8388 東京都港区元赤坂 1-3-1)

***日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 (〒317-0073 茨城県日立市幸町 3-1-1)

****工博, 防衛大学校教授 (〒239-868 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: Drop-weight impact, Damping constant, Shock-wave propagation, Acceleration in the soil

キーワード: 重錘落下, 減衰定数, 衝撃振動伝播, 地中加速度

1. はじめに

日本における土被りのある原子力関連施設の衝撃荷重に対する振動評価では、NEI07-13[Revision 8P]¹⁾において地盤に対する評価法の記載がないことに加えて、地中の振動伝播特性に関する知見がないため、土被りを考慮せず、保守的と考えられる条件にて実施しているのが実情である。しかし、土被りを考慮することで、現実的な構造物の設計が可能になることから、地中の振動伝播特性を把握するために落錘試験を実施した。

まず、地盤諸元及び衝突速度をパラメータにした落錘試験の概要を報告するとともに、地中及び地表に設置した加速度計から得られた地中の振動伝播特性に基づく定量的な分析を行った。

さらに、上記で得られた地中での計測記録の分析結果に加えて、重錘落下試験前後に実施したハンマー打撃試験結果に基づく地盤減衰定数の同定を行ったので、その結果を報告する。

2. 試験計画

地中の振動伝播特性を把握するための落錘試験の実施に際し、次に示す項目に配慮した試験計画を検討した。

- 2.1 相似則
- 2.2 落錘試験装置
- 2.3 地盤試験体
- 2.4 計測計画
- 2.5 試験ケース

2.1 相似則

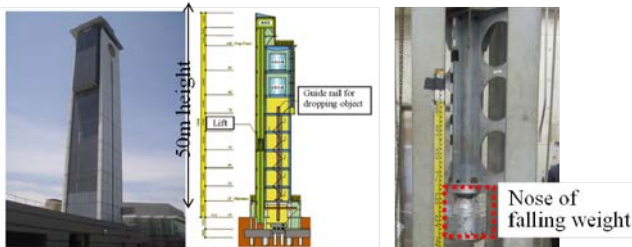
地中の振動伝播特性を把握するための落錘試験は、落錘試験装置の制約があるため、縮小スケール試験とならざるを得ない。従って、一般的な波動方程式に基づく相似側に従い、試験計画を行った。弾性振動問題での相似則には、一般的に Cauchy 則及び Froude 則の 2 種類がある²⁾。今回の縮小スケール試験では、通常の振動台試験で用いられている加速度比が 1 となる Froude 則 I をベースに、地盤試験体の密度を縮小スケールで制御することは困難であるため、締固めによって地盤試験体の応力度比(剛性比)を可能な範囲で制御することとし、Froude 則 II を採用するものとした(表—1 参照)。Froude 則 II に従うと、今回の縮小スケール試験では、長さ比は約 1/30 であり、振動数比は約 5 を想定することとなる。

表—1 弾性振動問題における相似則の比較

Scale Factor	Cauchy 則	Froude 則 I	Froude 則 II
長さ比	ku	[1/s]	[1/s]
応力度比	$k\sigma$	[1]	[1]
密度比	$k\rho$	[1]	s
加速度比	ka	s	[1]
時間比	kt	1/s	$1/s^{0.5}$
質量比	$k\sigma ku^3$	$1/s^3$	$1/s^2$
振動数比	$1/kt$	s	$s^{0.5}$
剛性比	$k\sigma$	1	1
変形比	ku	1/s	1/s
速度比	ku/kt	1	$1/s^{0.5}$

2.2 落錘試験装置

RC 構造物に対する振動伝播特性を把握するための落錘試験の実績（例えば、Tanoue et al.³⁾）を勘案し、防衛大学校所有の落錘試験装置を使用することとし、先端形状として直径 0.3m の平坦な円柱を有する重量 0.2t の重錘を所定の高さから自由落下させるものとする。落錘試験装置、重錘治具及び重錘の概要を図一1に示す。



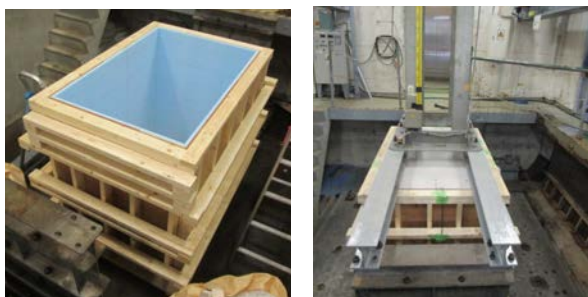
図一1 落錘試験装置、重錘治具及び重錘の概要

2.3 地盤試験体

地中の振動伝播特性を把握するための落錘試験に用いる地盤試験体は、製作、モデル化及び諸元設定が容易な乾燥した均質な細粒砂（粒径 0.2~0.4mm）を使用する。

地盤試験体サイズは、幅 1.5m、奥行 1.0m、深さは 1.5m とする。また、地盤試験体を製作・拘束するための土槽は木製の箱型形状と、土槽内部側面には、反射波による影響を低減するために、スタイロフォームを取り付けている。

地盤基本ケースは、当該土槽で締め固めない砂密度 $1.4 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$ で管理して製作する。また、製作時の実際の密度は、 1.44 t/m^3 であった。地盤変動ケースは、砂密度 $1.6 \sim 1.7 \text{ t/m}^3$ になるように、締め固め管理をして製作する。また、製作時の実際の密度は、 1.65 t/m^3 であった。土槽、地盤試験体及び重錘治具の設置状況を写真-1に示す。



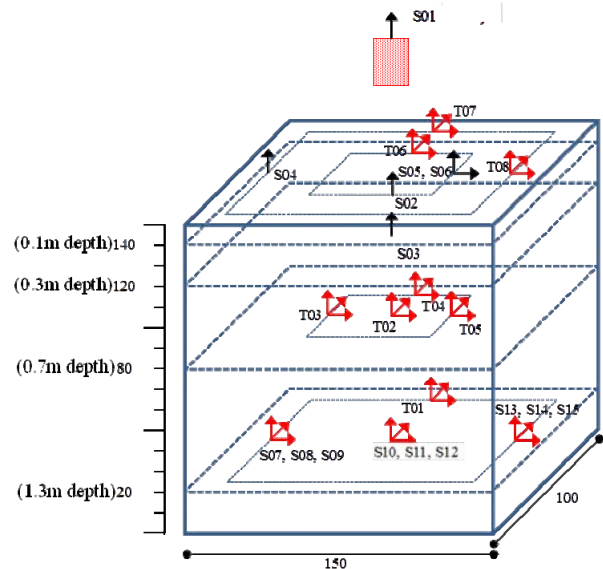
写真一1 土槽、地盤試験体及び重錘治具の設置状況
(左：土槽，右：地盤試験体及び重錘治具)

2.4 計測計画

地中の振動伝播特性を把握するための落錘試験の主目的である地表及び地中の地盤加速度を加速度計により計測する。また、重錘にも加速度計を設置し、衝撃荷重を計測できるように配慮する。試験に使用する加速度計は、3軸加速度計（圧電型、B&K 4535-B - TEDS 付 汎

用3軸CCLD加速度ピックアップ)及び1軸加速度計(圧電型、B&K 4533-B - TEDS 付 CCLD 加速度ピックアップ)とし、図一2に示す配置図に従って設置する。加速度計の地中での設置状況を写真一2左に示す。併せて、衝突前後での重錘の加速度、速度及び変位を計測するための高速カメラの設置状況を写真一2右に示す。

なお、走時による地盤速度評価のために、各試験ケース前に試験体上部をハンマーによって叩くことを計画した。



図一2 加速度計の配置計画[単位：cm]

(T: 3軸加速度計, S: 1軸加速度計)



写真一2 加速度計及び高速カメラの設置状況
(左：加速度計，右：高速カメラ)

2.5 試験ケース

地中の振動伝播特性を把握するための落錘試験では、地盤物性（地盤密度及び地盤剛性）及び落下高さ（衝撃速度）を試験パラメータとする。具体的には、地盤物性を締め固め管理しない砂密度 1.44 t/m^3 の基本物性及び締め固め管理した砂密度 1.65 t/m^3 の変動物性の2水準とし、落下高さ（衝撃速度）を 0.1m、0.2m、0.3m 及び 0.6m の4水準の合計8ケースとする。ただし、地盤試験体としては2体しかないので、地盤の損傷が累積するものの、それぞれの試験体に対して落下高さ 0.1~0.6m に徐々に大きくした試験を実施する。試験ケースを表一2に示す。

表中には、各試験ケースにおける計測値及び理論値による衝突速度及び重錘の貫入量も併せて示す。

表一 試験ケース

試験ケース	地盤物性	地盤密度 (t/m ³)	落下高さ	衝突速度(m/s)			重錘の貫入量 (mm)
				計測 1 ^{*1)}	計測 2 ^{*2)}	理論	
C1	基本	1.44	0.1 m	1.36	1.46	1.40	139
C2	基本	1.44	0.2 m	2.07	2.10	1.98	127
C3	基本	1.44	0.3 m	2.38	2.46	2.43	125
C4	基本	1.44	0.6 m	3.31	3.44	3.43	181
C5	変動	1.65	0.1 m	1.38	1.41	1.40	96
C6	変動	1.65	0.2 m	1.86	2.00	1.98	93
C7	変動	1.65	0.3 m	2.29	2.41	2.43	114
C8	変動	1.65	0.6 m	3.38	3.43	3.43	171

*1) 高速カメラによる, *2) 加速度計による

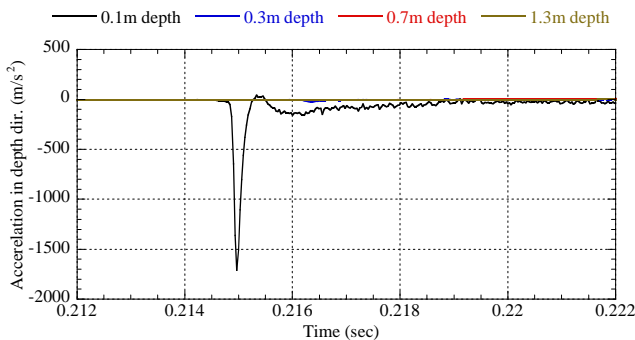
3. 試験結果

3.1 地中加速度波形の比較

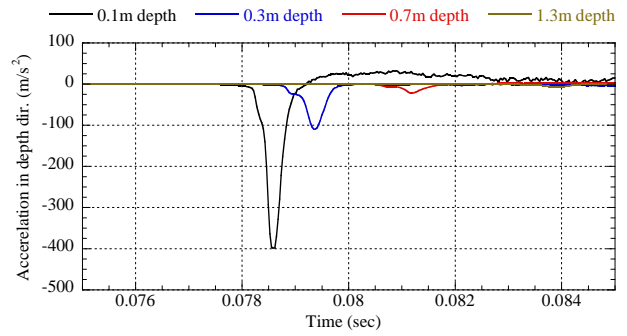
衝撃荷重中央点における地中計測点は、他の計測点に比べて、衝撃に伴う地盤伝播距離が小さいために加速度が大きい傾向が観察されている。

ここでは、衝撃荷重中央点における地中計測点 (S02 : 地表から 0.1m, S03 : 地表から 0.3m, T02 : 地表から 0.7m, S12 : 地表から 1.3m) における深さ方向の加速度波形を比較することで、衝撃波が地中でどのように振動伝播していくのかを分析することにする。代表的な試験ケースにおける衝撃荷重中央の地中計測点における深さ方向加速度波形の比較を図一三～図一四に示す。

これより、地中深くなるに従い、加速度波形のピーク値は小さくなり、ピーク値近傍の形状はなだらかになっていくことが分かる。これは地盤減衰が影響しているものと考えられる。



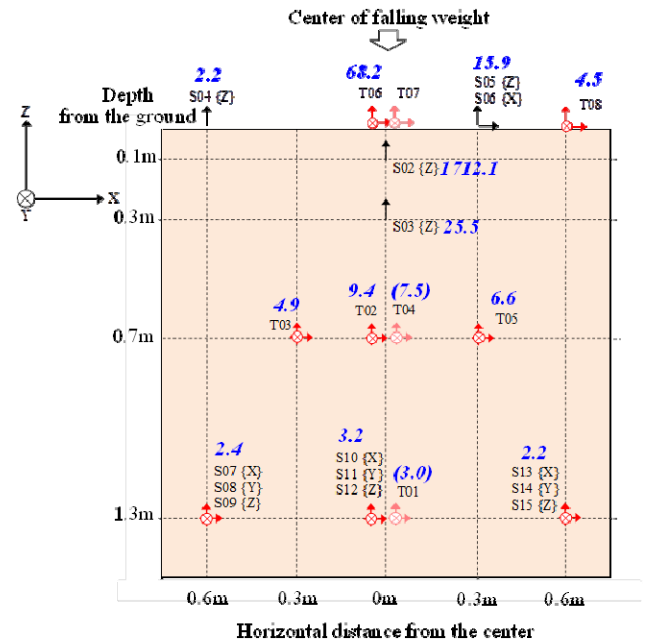
図一三 地中計測点における深さ方向加速度波形の比較 (試験ケース C1)



図一四 地中計測点における深さ方向加速度波形の比較 (試験ケース C3)

3.2 地中加速度の伝播状況

衝撃に伴う地中加速度の伝播傾向を分析するために、深さ方向の最大加速度に着目して、地中計測点と深さ方向の最大加速度を整理した結果の一例を図一五に示す。これより、衝撃に伴う地中加速度の伝播傾向は、深さ方向が支配的で、水平方向は急激に減少することが分かる。



図一五 地中計測点における深さ方向最大加速度の比較 (試験ケース C1) [青字 : 計測値, 単位 : m/s²]

3.3 地中最大加速度の振幅比

衝撃に伴う地中加速度伝播時の地盤減衰の影響を分析するために、衝撃荷重中央点における地中計測点 (S02 : 地表から 0.1m, S03 : 地表から 0.3m, T02 : 地表から 0.7m, S12 : 地表から 1.3m) における深さ方向の最大加速度の振幅比を比較する。地表から 0.1m での最大加速度を基準にした振幅比を表一三に示す。ただし、地表から 0.1m の計測点は、地盤の塑性化の影響が大きいいため、地表から 0.3m での最大加速度を基準にした振幅

比も表—4に示す。

これより、深さ方向の最大加速度の振幅比は、地中深くなるに従い、深さ方向の最大加速度は急激に小さくなり、地盤減衰の影響が大きいことが分かる。

また、地表から 0.1m での最大加速度を基準にした地表から 0.3m における深さ方向の最大加速度の振幅比に関して、落下高さが大きくなるに従い、つまり、衝撃荷重が大きくなるに従って、最大加速度の振幅比が大きくなっていることが分かる。これは地表付近の地盤が塑性化することによって、地表から 0.1m での加速度ピーク値が小さくなったためと考えられる。

さらに、地表から 0.3m での最大加速度を基準にした地表から 0.7m 及び 1.3m における深さ方向の最大加速度の振幅比に関して、落下高さが大きくなっても、つまり、衝撃荷重が大きくなっても、最大加速度の振幅比は概ね同程度であることが分かる。これは、地表から 0.3m 以深においては、地盤の塑性化が生じず、最大加速度の深さ方向の分布形状が相似形になったためと考えられる。

表—3 地表から 0.1m を基準にした最大加速度振幅比

地表からの深さ	試験ケース							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
0.1m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.3m	0.01	0.15	0.28	0.30	0.04	0.10	0.22	0.39
0.7m	0.01	0.04	0.05	0.06	0.01	0.02	0.04	0.06
1.3cm	<0.01	0.02	0.02	0.02	<0.01	<0.01	0.01	0.02

表—4 地表から 0.3m を基準にした最大加速度振幅比

地表からの深さ	試験ケース							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
0.1m	67.14	6.59	3.62	3.38	25.58	10.09	4.47	2.54
0.3m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.7m	0.37	0.29	0.20	0.19	0.20	0.16	0.18	0.16
1.3m	0.13	0.14	0.06	0.06	0.03	0.04	0.04	0.04

4. 試験結果の評価

ここでは、地中での計測記録に基づく減衰定数評価手法の定式化を示すとともに、重錘落下試験前後に実施したハンマー打撃試験結果及び重錘落下試験での計測記録から得られる地盤減衰定数の同定結果を示す。

4.1 減衰定数評価手法の定式化

衝撃荷重作用点から距離 x_i にある計測点における振幅値 U_i は、幾何減衰 G_i 及び散乱減衰 T_i を考慮すると、一般的に式(1)で与えられる。

$$U_i = U_0 \exp(-\alpha x_i) \exp[i(\omega t - kx_i)] \cdot G_i \cdot T_i \quad (1)$$

ここで、 k : 波数、 ω : 角振動数、 α : 減衰係数、 t : 時刻

地盤減衰に関する項のみを抽出すると、式(2)が得られる。

$$U_i = U_0 \exp(-\alpha x_i) \cdot G_i \cdot T_i \quad (2)$$

2点の計測点間 ($i=1$ 及び $i=2$) における振動伝播問題を考えると、式(3)が得られる。

$$\ln \left(\frac{U_2 G_1 T_1}{U_1 G_2 T_2} \right) = -\alpha (x_2 - x_1) \quad (3)$$

ここで、式(4)で与えられる均質一様地盤及び球面波を想定すると、式(5)が得られる。

$$\ln T_1 = \ln T_2 = 0, \quad G_1 = 1/x_1, G_2 = 1/x_2 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{-\ln \left(\frac{U_2 x_2}{U_1 x_1} \right)}{x_2 - x_1} \quad (5)$$

一方、減衰定数 h は、信岡らの知見⁴⁾を参照すると、一般的に式(6)で与えられる。

$$h = \frac{\operatorname{sgn}(\alpha)}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{\alpha c} \right)^2 + 1}} \quad (6)$$

ここで、 c : 位相速度

従って、地中での2点の計測記録に基づき、式(5)及び式(6)から地盤の減衰定数を評価することができる。

4.2 ハンマー打撃試験結果から得られる地盤減衰定数

重錘落下試験前後に実施したハンマー打撃試験に関して、衝撃荷重中央点における地中計測点における深さ方向の加速度波形を対象に、波形の立ち上がりを読み取り、4.1で示した定式化に基づき、地盤伝播速度 V_p と地盤減衰定数 h の評価を行う。ハンマー打撃試験結果から得られる地盤減衰定数等の評価結果を表—5～表—6に示す。ここで、ハンマー打撃試験結果及び重錘落下試験結果から地盤減衰定数を同定する際の留意事項を以下に示す。

- ①重錘の貫入深さから地表浅くの加速度計の移動距離を考慮した。
- ②重錘の貫入深さの推定に際しては、高速カメラによる計測結果と加速度計による計測結果の両方の結果を確認した。

③加速度計の最終的な移動距離に関しては、重錘落下試験後に実際の移動距離を確認した。

表一五 ハンマー打撃試験結果から得られる地盤減衰定数等の評価結果（基本地盤物性）

評価区間	評価項目	C1 前	C2 前	C3 前	C4 前	C4 後
深さ 0.1～0.3m	Vp (m/s)	142.5	160.0	191.5	177.5	210.0
	h (%)	16.2	23.9	20.0	11.9	16.9
深さ 0.3～0.7m	Vp (m/s)	214.9	226.0	230.0	230.0	238.3
	h (%)	2.6	4.2	4.4	2.8	1.6
深さ 0.7～1.3m	Vp (m/s)	231.3	226.0	226.0	234.1	231.3
	h (%)	3.9	2.4	2.9	1.8	2.1

表一六 ハンマー打撃試験結果から得られる地盤減衰定数等の評価結果（変動地盤物性）

評価区間	評価項目	C5 前	C6 前	C7 前	C8 前	—
深さ 0.1～0.3m	Vp (m/s)	152.4	164.1	168.3	186.4	—
	h (%)	24.0	25.6	27.1	14.5	—
深さ 0.3～0.7m	Vp (m/s)	187.2	208.1	208.1	204.8	—
	h (%)	6.6	7.4	11.0	7.9	—
深さ 0.7～1.3m	Vp (m/s)	269.3	258.7	273.1	265.7	—
	h (%)	8.4	5.0	5.9	7.0	—

4.3 重錘落下試験結果から得られる地盤減衰定数

3. に示した重錘落下試験結果に関して、ハンマー打撃試験結果と同様に、衝撃荷重中央点における地中計測点における深さ方向の加速度波形を対象に、波形の立ち上がりを読み取り、4.1 で示した定式化に基づき、地盤伝播速度 Vp と地盤減衰定数 h の評価を行う。重錘落下試験結果から得られる地盤減衰定数等の評価結果を表一七～表一八に示す。

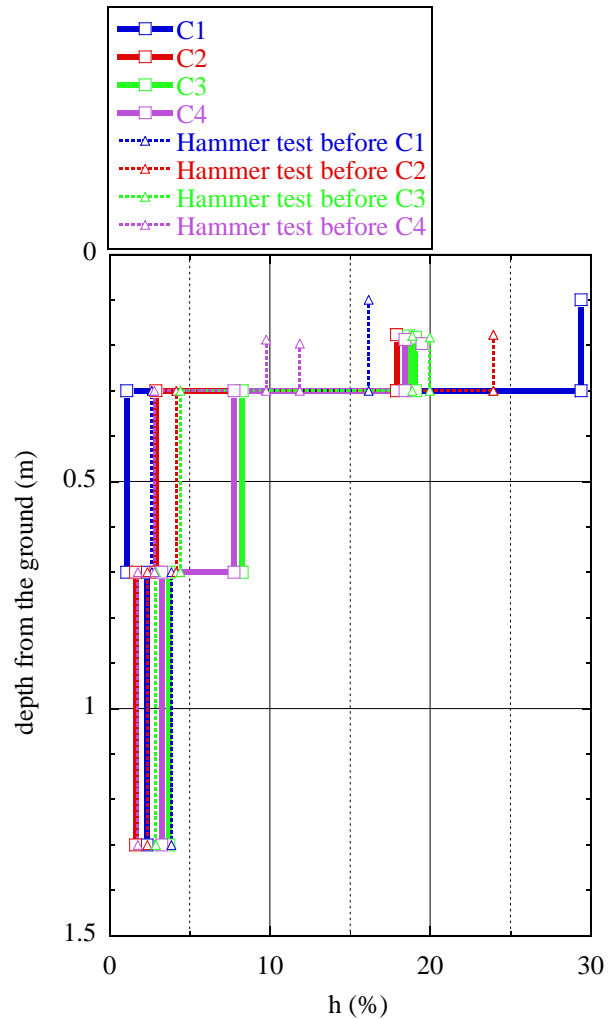
表一七 重錘落下試験結果から得られる地盤減衰定数等の評価結果（基本地盤物性）

評価区間	評価項目	C1	C2	C3	C4
深さ 0.1～0.3m	Vp (m/s)	145.6	160.0	147.3	146.6
	h (%)	29.4	17.9	19.1	19.5
深さ 0.3～0.7m	Vp (m/s)	214.9	222.2	222.2	222.2
	h (%)	1.1	2.9	8.3	7.8
深さ 0.7～1.3m	Vp (m/s)	228.6	223.4	220.9	220.9
	h (%)	2.3	1.6	3.7	3.3

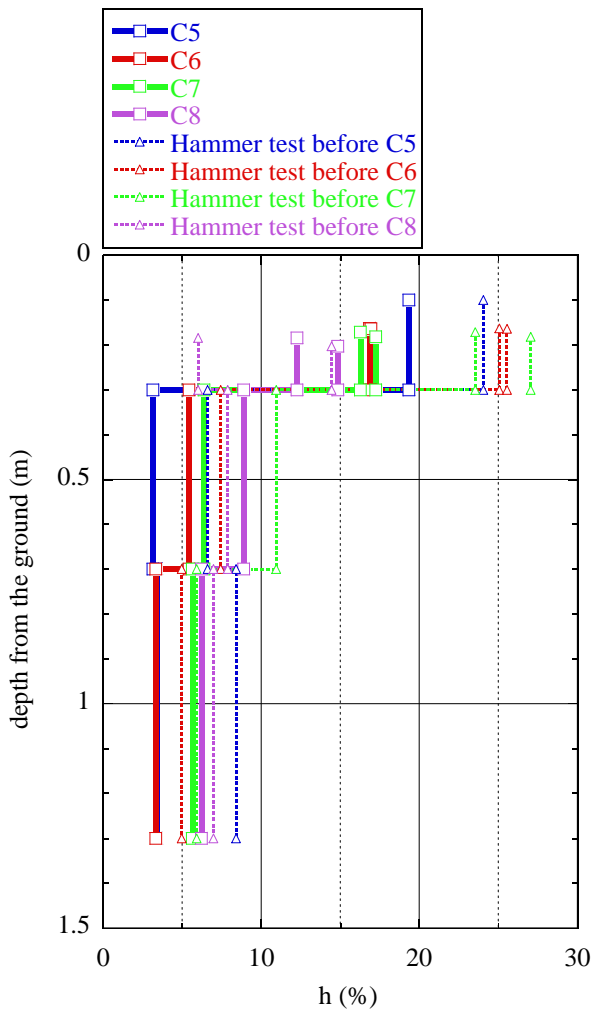
表一八 重錘落下試験結果から得られる地盤減衰定数等の評価結果（変動地盤物性）

評価区間	評価項目	C5	C6	C7	C8
深さ 0.1～0.3m	Vp (m/s)	168.0	116.6	133.4	137.8
	h (%)	19.3	17.0	17.2	14.8
深さ 0.3～0.7m	Vp (m/s)	190.0	184.6	187.2	190.0
	h (%)	3.1	5.4	6.4	8.9
深さ 0.7～1.3m	Vp (m/s)	276.9	265.7	262.1	262.1
	h (%)	3.4	3.3	5.6	6.2

また、ハンマー打撃試験結果及び重錘落下試験結果の両者から得られる地盤減衰定数に関して、地中深さ方向で整理して図一六～図一七に示す。これより、加速度振幅が大きく、かつ衝撃振動が顕著であった衝突近傍の地盤においては減衰定数が10～30%程度と大きく、地盤深部では2～10%程度と小さい結果となった。



図一六 地盤減衰定数のまとめ（基本地盤物性）



図—7 地盤減衰定数のまとめ
(変動地盤物性)

5. まとめ

土被りのある構造物の振動評価は、地中の振動伝播特性に関する知見がないため、土被りを考慮せず、保守的と考えられる条件にて実施しているのが実情である。土被りを考慮することで、現実的な構造物の設計が可能になることから、地中の振動伝播特性を把握するための落錘試験を実施した。また、その試験結果に基づき、衝突近傍の地盤における減衰定数の同定を行った。

まず、落錘試験においては、地盤諸元及び衝突速度をパラメータにした試験を実施し、地中及び地表に設置した加速度計から地中の振動伝播特性に係る基礎的なデータを取得した。これより、地中深くなるに従い、加速度波形のピーク値は小さくなり、ピーク値近傍の形状はなだらかになっていくことが分かった。併せて、深さ方向の最大加速度の振幅比は、地中深くなるに従い、深さ方向の最大加速度は急激に小さくなり、地盤減衰の影響が大きいくことが分かった。また、衝撃に伴う地中加速度の伝播傾向は、深さ方向が支配的で、水平方向は急激に減少することが分かった。

次に、地中での計測記録の分析結果に加えて、重錘落下試験前後に実施したハンマー打撃試験結果に基づく地盤減衰定数の同定結果によると、衝撃振動が顕著であった衝突近傍の地盤においては減衰定数として概ね10%以上であることが示された。

謝辞

本研究は11電力共同委託として実施した。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) NEI 07-13 [Revision 8P], "Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs", April 2011
- 2) 紺谷 修, 美原 義徳, "建屋—地盤相互作用を考慮した相似側に関する研究 その1 相似側の構築", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), No.21504, pp.1007-1008, 1997年9月
- 3) Tanoue, T., Ikeda, R., Kawamoto, Y. and Beppu, M., "Experimental Study on Vibration of Concrete Structure with regard to Dropping Impact ", Division IX, SMiRT-22, August 2013
- 4) 信岡 大, 東 宏幸, 大場 政章, "PS 検層の手法を用いた地盤減衰特性 (Q 値) の評価", 物理探査, 第65巻第1&2号, pp.79-90, 2012