

CHAPITRE 5

Mesure des propriétés dynamiques des sols

5.1 Introduction

La connaissance du comportement cyclique des sols s'impose pour comprendre la réponse des sites quand ils sont frappés par un séisme.

En très petites déformations, la raideur du sol est représentée par le module de cisaillement G_{max} qui est en lien direct avec la vitesse des ondes de cisaillement V_s .

Dans la gamme des déformations faibles à moyennes, le comportement des sols est non linéaire et hystérétique. La raideur du sol est représentée par le **module de cisaillement sécant G** .

La dissipation d'énergie par le sol au cours des cycles est représentée par le **coefficient d'amortissement D** . Les propriétés G et D dépendent à la fois de la contrainte effective de confinement σ'_m et du niveau de déformation de cisaillement γ .

En pratique, le recueil des propriétés dynamiques des terrains s'effectue par la mesure directe des vitesses V_s in-situ, ou une estimation indirecte de celles-ci, puis au laboratoire, où sont mesurées les variations de G et D avec σ'_m et γ .

Les propriétés G et D dépendent à la fois de la contrainte effective de confinement σ'_m et du niveau de déformation de cisaillement γ .

En reproduisant des sollicitations cycliques contrôlées, les essais de laboratoire permettent d'identifier les paramètres du comportement non linéaire et hystérétique des sols. Dans cette démarche, qui s'impose pour les projets importants, il est impératif de disposer d'échantillons carottés de bonne qualité et représentatifs des sols étudiés.

5.2 Mouvements dans le sol

Les petits mouvements au voisinage d'un état d'équilibre quasi naturel sont régis par les équations suivantes:

- équations de continuité,
- équations dynamiques,
- relations de comportement,
- équations thermiques.

L'ensemble définit une propagation complexe des ondes à travers le milieu car l'intervention de la conduction, phénomène irréversible, tout comme la viscosité entraîne :

- Une diminution progressive de la fonction : $U - t_{0S} + W + C$

(U énergie interne, S entropie, W énergie potentielle des forces extérieures et C énergie cinétique);

- Un amortissement des ondes sinusoïdales ou ondes de phase. Leur célérité est fonction de leur fréquence à cause de la dispersion.

On constate que :

1° la dilatation cubique θ se propage par ondes longitudinales de dilatation de célérité :

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

2° la rotation se propage par ondes transversales de rotation de célérité :

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Ces mouvements satisfont séparément à l'équation indéfinie :

$$(\lambda + \mu) \text{grad div } u + \mu \Delta u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

- Une onde de cisaillement polarisée dans le plan d'incidence i donne naissance à une onde de cisaillement et une onde de dilatation réfléchiée sous un angle r :

$$\sin r = \frac{V_L}{V_S} \sin i \quad \text{lorsque :} \quad \sin i < \frac{V_S}{V_L}$$

- Dans le cas où $\sin i > \frac{V_S}{V_L}$;

L'onde de dilatation est remplacée par une onde de surface qui se propage parallèlement à la surface, et reste localisée au voisinage de celle-ci.

5.3 Propriétés dynamiques des sols

Les essais de surface, profitant de l'avantage de la rapidité d'exécution, d'une étendue plus grande et d'un coût relativement modéré, analysent les phénomènes de réfraction-réflexion, ainsi que les ondes de RAYLEIGH stationnaires ou en dispersion lors d'une source impulsionnelle.

- **Modules longitudinale et transversale**

Les modules d'YOUNG E , de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν sont déduites des vitesses de propagation longitudinale et transversale par :

$$E = 2\rho V_S^2(1 + \nu) = \rho V_L^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

$$G = \rho V_S^2$$

- **Déformations longitudinale et transversale**

Le niveau de déformation est estimé par :

$$\varepsilon = \dot{u}_L / V_L \quad \text{dans le cas des ondes longitudinales}$$

$$\text{Et } \gamma = \dot{u}_S / V_S \quad \text{lorsqu'il s'agit d'ondes de cisaillement}$$

ε , \dot{u}_L et γ , \dot{u}_S sont respectivement la déformation et la vitesse particulière des ondes longitudinales et transversales.

L'ordre de grandeur de l'amplitude des déformations est inférieur à 10^{-5} .

- **Rapport d'amortissement**

L'amortissement d'un sol est souvent caractérisé par un paramètre appelé rapport d'amortissement β . Ce paramètre est proportionnel à la relation entre la perte d'énergie par cycle, ΔW , et l'énergie élastique maximale pouvant être stockée dans une unité de volume d'un corps viscoélastique, W , à travers l'expression

$$\beta = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$

Le coefficient d'amortissement est déduit des essais de propagation d'ondes par différentes méthodes:

- **Rapport spectral (spectral ratio)** : déterminé par la décroissance des amplitudes des ondes en s'éloignant de la source.

Le taux de la variation de la pente spectrale donnée par des mesures à différentes distances de la source donne une constante d'atténuation « α » reliée au coefficient d'amortissement et à la vitesse de propagation par la relation :

$$D = \frac{\alpha V}{2\pi}$$

- **Temps de montée** : donné par l'observation de la variation de la forme du signal :

$$D = \frac{\delta t / \delta T}{\chi}$$

5.4 Caractéristiques dynamiques des sols en laboratoire

5.4.1 Essais à la colonne résonnante

En laboratoire, les essais à la colonne résonnante sont les plus souvent utilisés pour évaluer le module dynamique en vibrations et le coefficient d'amortissement correspondant.

La qualité de l'essai dépend essentiellement de l'homogénéité des contraintes et des déformations dans l'échantillon.

a) Principe de l'essai

Le principe consiste à appliquer une excitation harmonique à l'une des extrémités d'un échantillon cylindrique de sol et à enregistrer sa réponse (**Fig.5.1**).

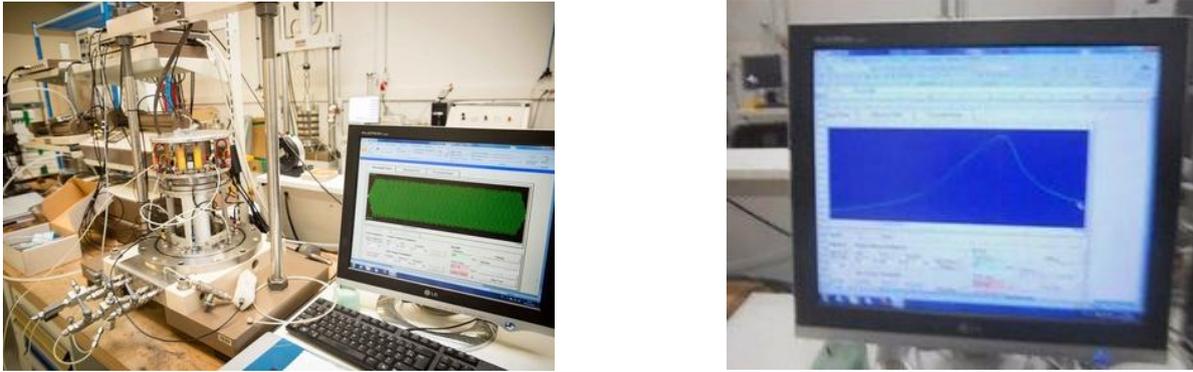


Fig.5.1- Principe d'un essai à la colonne résonnante

b) Procédures de l'essai

C'est l'essai le plus utilisé, actuellement, en laboratoire dans le domaine dynamique car il est bien adapté à l'étude du comportement des sols vibrants.

- On excite un échantillon cylindrique à une extrémité avec une sollicitation sinusoïdale dont on fait varier la fréquence lentement dans le temps jusqu'à la résonance (**Fig.5.2**).
- En utilisant un modèle viscoélastique équivalent pour le matériau, on déduit à partir des caractéristiques de la courbe de résonance et de la géométrie de l'échantillon les modules d'élasticité équivalent E ou G ainsi que le coefficient d'amortissement.

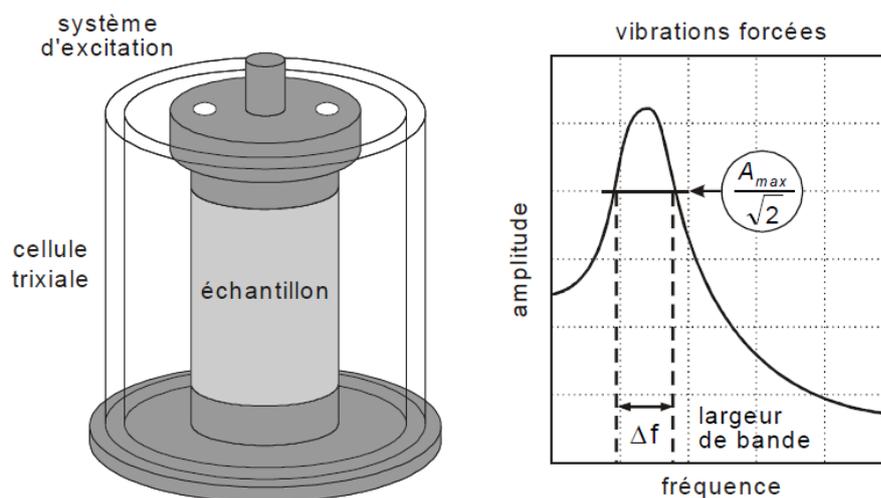


Fig.5.2- dispositif de colonne résonnante (gauche) et réponse typique d'un échantillon en vibration forcée (droite).

c) Résultats de l'essai

Quand l'essai est réalisé en vibrations forcées, la fréquence doit être ajustée de façon à atteindre la résonance de l'échantillon. La première fréquence propre de l'échantillon (f_1) peut alors être estimée d'après le pic de la courbe amplitude/fréquence (**Fig. 5.2, droite**).

La résonance se produisant pour un quart de longueur d'onde, cela permet, dans le cas de la torsion, le calcul de la célérité V_S des ondes de cisaillement dans l'échantillon et donc du module de cisaillement du sol, soit :

$$G = \rho V_S^2 = \rho(4f_1 L)^2$$

Où f_1 est la fréquence de résonance de l'échantillon et L est sa hauteur.

L'essai permet également la détermination de l'amortissement du sol. En effet, la courbe de résonance obtenue en vibrations forcées (**Fig. 5.2, droite**) est caractérisée par une largeur de bande Δf . L'amortissement en est déduit à partir de l'expression suivante :

$$\xi = \frac{\Delta f}{2f_1} = \frac{1}{2Q}$$

Où Q le facteur de qualité.

Il est également possible de réaliser des essais en vibration libre en arrêtant la sollicitation vibratoire de façon instantanée. L'amortissement du sol peut alors être estimé en analysant la décroissance temporelle d'amplitude définie à l'aide du décrément logarithmique δ sous la forme (avec x_i amplitude maximale du cycle i) :

$$\delta = \ln \frac{x_{n+1}}{x_n} = 2\pi\xi$$

L'essai de colonne résonnante présente la même souplesse d'utilisation qu'un essai triaxial. Il permet de mesurer les caractéristiques des sols pour des amplitudes de déformation comprises entre 10^{-6} et $5 \cdot 10^{-4}$ environ pour les essais en torsion, et pour des amplitudes plus faibles en compression.

L'essai de colonne résonnante permet d'obtenir le module maximal qui peut être, dans certaines conditions, directement comparé à celui déduit de mesures géophysiques en place. Pour la détermination de ce module maximal, seule la connaissance de la fréquence de vibration et de la configuration géométrique de l'appareillage est requise. Aucune mesure de déformation n'est théoriquement nécessaire, bien que celle-ci soit effectuée. La précision de la mesure est donc accrue par rapport à un essai où le module est obtenu par mesure de la force appliquée et de la déformation résultante.

5.4.2 Essais triaxial cyclique

a) Principe de l'essai

Une méthode d'exploitation des courbes d'essai triaxial cyclique s'appuie sur une approximation des courbes expérimentales dont l'expression permet d'accéder à l'identification précise du module d'Young sécant et de l'amortissement dans la gamme des amplitudes faibles à moyennes des déformations cycliques.



Figure 5.3- Dispositif d'un essai triaxial cyclique

b) Procédures de l'essai

Les essais triaxiaux cycliques destinés à la mesure des propriétés dynamiques des sols se déroulent en plusieurs phases (**Fig. 5.4**) :

- Après découpage, l'éprouvette est placée dans la cellule triaxiale qui est munie d'un dispositif d'extension. La saturation du sol est parachevée par l'application de paliers de contre-pression.
- L'éprouvette est consolidée sous une pression effective isotrope p_c définie en fonction des conditions de site (la profondeur dans le massif ou le chargement sous l'ouvrage).
- La sollicitation cyclique non drainée est appliquée ensuite (CUy). Elle est composée par plusieurs séquences de cycles successives pilotées en déplacement.
- Le déplacement axial sinusoïdal alterné, qui est imposé, est défini par une amplitude Δh et une fréquence f .
- La sollicitation cyclique est maintenue constante jusqu'à atteindre un nombre fixé de cycles.
- A cette amplitude cyclique correspond l'amplitude de la déformation axiale $\Delta \epsilon_a$.
- Cette amplitude $\Delta \epsilon_a$ est augmentée d'une séquence de cycles à l'autre afin de balayer la gamme des déformations axiales comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} (de 0,01 % à 1 %).
- La reconsolidation préalable de l'éprouvette sous la pression effective isotrope p_c est effectuée avant de commencer une nouvelle séquence si la pression interstitielle accumulée devient trop grande pendant la séquence précédente.

c) Résultats de l'essai

- Pendant les séquences de cisaillement cyclique, le déplacement axial Δh (mesures globale et locale), l'effort axial F et la pression interstitielle u sont enregistrés en continu.
- L'échantillonnage des mesures est réalisé à pas de temps constant à raison de 50 ou 100 points par cycle.
- Ces mesures sont converties en déformation axiale ϵ_a , pression effective moyenne

$p = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$ et déviateur $q = \sigma'_a - \sigma'_r$, où σ'_a et σ'_r sont les contraintes effectives axiale et radiale. Le déviateur q constitue la réponse du sol. Les déformations et les contraintes sont comptées positivement en compression.

- Le calcul de ces variables est effectué à partir des données brutes, en tenant compte de la variation de section de l'éprouvette (forme de déformation en tonneau).
- Pendant chacune des séquences de cycles ces variables sont représentées graphiquement en fonction du temps (t , ϵ_a , q , u) et sous la forme de courbe contrainte déformation (q , ϵ_a) et de chemin des contraintes effectives (p , q).

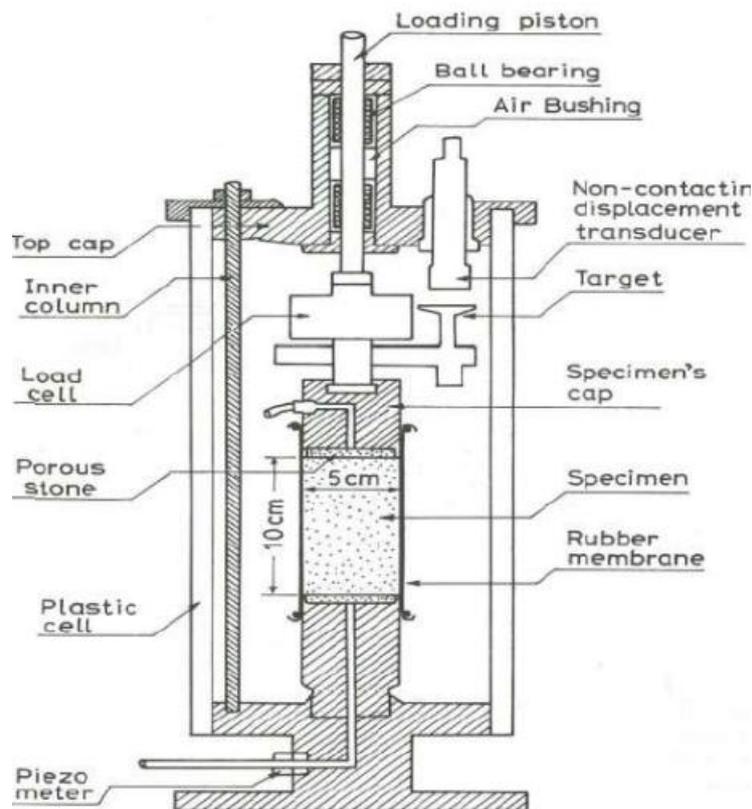


Figure 5.4- Composants d'un appareil triaxial cyclique

Mesure du module d'Young et de l'amortissement

Dans son principe, l'essai triaxial, pendant lequel la pression de confinement est maintenue constante, permet de mesurer le module d'Young E , rapport entre le déviateur q et la déformation axiale ϵ_a :

$$E = q/\epsilon_a$$

Un essai non drainé permet de mesurer le module d'Young non drainé E_u , dans une plage où la pression interstitielle ne change pas trop ce module est directement lié au module de cisaillement G :

$$E_u = 1.5G$$

Dans les essais triaxiaux cycliques, le module d'Young non drainé sécant représente la pente moyenne de la boucle contrainte-déformation (ϵ_a, q) (**Fig.5.5**). Cette pente est bien définie pour un matériau viscoélastique, d'autres définitions des modules concernent les modules tangents.

L'amortissement hystérétique (hystérésis signifie en retard) traduit la dissipation de l'énergie par le sol pendant les cycles de chargement-déchargement. Dans un matériau viscoélastique, cet amortissement est proportionnel au rapport entre l'énergie dissipée pendant un cycle (l'aire A_c de la boucle) et l'énergie stockée pendant ce cycle (l'aire du triangle A_t) donné par :

$$A_t = \Delta\epsilon_a \times \Delta q / 2$$

Ce rapport exprime aussi le déphasage φ entre la sollicitation $\epsilon_a(t)$ et la réponse $q(t)$:

$$D = \frac{\sin(\varphi)}{2} = A_c / 4\pi A_t$$

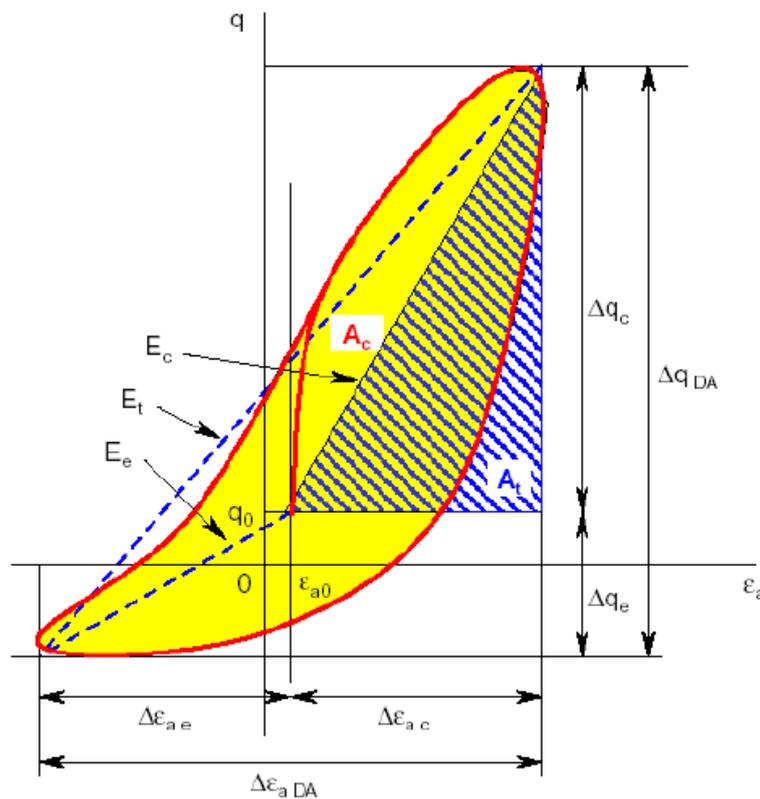


Figure 5.5- Essai triaxial cyclique : Courbe déformation axiale, déviateur (ϵ_a, q).

Le graphique de la **Fig. 5.5** montre une boucle contrainte-déformation (q, ϵ_a) enregistrée pendant une séquence de cycles d'un essai triaxial. L'origine de la boucle a pour coordonnées (ϵ_{a0}, q_0).

La sollicitation et la réponse sont caractérisées par les doubles-amplitudes $\Delta\epsilon_{aDA}$ et Δq , mais des amplitudes distinctes en compression et en extension $\Delta\epsilon_{ac}$, $\Delta\epsilon_{ae}$, Δq_c , Δq_e .

De ces caractéristiques sont déduits les modules sécants :

$$E_c = \Delta q_c / \Delta \epsilon_{ac} \quad ; \quad E_e = \Delta q_e / \Delta \epsilon_{ae} \quad ; \quad E_t = \Delta q_{DA} / \Delta \epsilon_{aDA}$$

L'aire du cycle AC, laire du triangle At et l'amortissement D :

$$D = \frac{\sin(\varphi)}{2} = A_c / 4\pi A_t$$

5.4.3 Essais de cisaillement simple cyclique

a) Principe de l'essai

L'appareil de cisaillement simple cyclique est généralement utilisé pour la recherche dans le domaine dynamique du comportement du sol et peut très facilement simuler de nombreuses conditions de charge sur le terrain, par exemple :

- Stabilité lors d'événements sismiques sur des pentes submergées du plateau continental caractérisées par des argiles en couches ;
- Dégradation de la contrainte de cisaillement dans les sols cohésifs sous charge cyclique ;
- Évaluation des paramètres de liquéfaction des sols non cohésifs sous charge cyclique.

Le cisaillement simple cyclique est un dispositif de déformation plane. La déformation de cisaillement est induite par un mouvement horizontal au bas de l'échantillon par rapport au haut. Le diamètre de l'échantillon reste constant, donc tout changement de volume ne peut être que le résultat du mouvement vertical de la platine supérieure. Le système est conçu pour permettre à un échantillon d'être consolidé puis cisailé dans des conditions de volume constant (simulant un cisaillement non drainé d'un échantillon saturé).

b) Échantillon

L'échantillon standard a un diamètre de 70 mm. Le test peut également être effectué sur des échantillons de 50 mm de diamètre à l'aide du kit de conversion 31-WF7500 / 1.

L'échantillon est positionné sur un piédestal, avec un capuchon supérieur identique à celui utilisé pour les tests triaxiaux, et est soutenu latéralement par une membrane en caoutchouc fixée avec des joints toriques. Pour maintenir un diamètre constant tout au long du test, l'échantillon est retenu par une série de bagues collectrices (Fig.5.6)

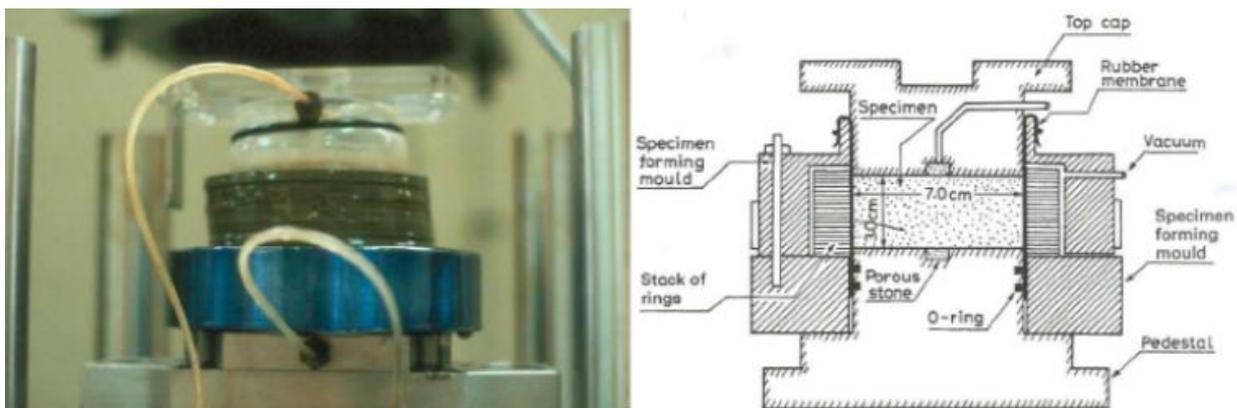


Figure 5.6- Essai de cisaillement cyclique : Courbe déformation axiale, déviateur (ea, q).

c) Etapes de cisaillement

Pendant le cisaillement, les anneaux glissent les uns sur les autres comme indiqué dans l'image 3 ci-dessus, tout en gardant un diamètre constant. La hauteur verticale de l'échantillon est maintenue constante par l'actionneur vertical sous contrôle en boucle fermée avec rétroaction du transducteur de déplacement vertical. La variation de la contrainte verticale requise pour atteindre une hauteur constante est supposée être égale à la variation de la pression interstitielle.

Voici une description générale des principaux composants du système :

Systeme de base

Le système se compose d'un simple châssis de charge de cisaillement équipé d'un récepteur d'air avec des servovalves pour contrôler la charge / déplacement vertical et horizontal. Il intègre un système de contrôle et d'acquisition de données tel que décrit ci-dessous, avec deux actionneurs 5 kN. Le système est logé dans une armoire. Les actionneurs horizontaux et verticaux sont fixés au châssis, ce qui fournit la réaction aux forces appliquées. Chaque actionneur possède un transducteur de déplacement interne, qui relaie la position du piston de l'actionneur vers l'ordinateur. Ceci est très important lors de la configuration d'un échantillon; il vous permet de définir suffisamment de course pour la durée du test. L'échantillon est installé dans la machine, qui a une moitié supérieure fixée rigidement et une moitié inférieure mobile. La moitié supérieure abrite le vérin vertical de 50 mm de diamètre. Il est logé dans un roulement linéaire pour permettre un mouvement vertical et empêcher un mouvement horizontal. La moitié inférieure est montée sur des roulements à rouleaux comme dans une boîte à cisaillement standard.

Systeme de contrôle multi-axes intégré

L'IMACS est une unité autonome compacte qui fournit toutes les fonctions critiques de contrôle, de synchronisation et d'acquisition de données pour le test et les transducteurs. Il est relié à un ordinateur personnel via une liaison de communication USB.

Le module d'acquisition de données dispose de 13 canaux d'entrée de transducteur normalisés (plage ± 10 V). Ces canaux sont numérisés par des convertisseurs 20 bits (A / D) rapides et précis pour l'analyse et la présentation des données. Le module de contrôle possède deux canaux pour le contrôle par rétroaction. L'un est dédié à l'actionneur vertical pour charge / déplacement, le second pour l'actionneur horizontal pour charge / déplacement. Le module de contrôle de rétroaction et le module d'acquisition de données ont leur propre interface USB 10 Mbit / s ou RS232 haute vitesse dédiée. Cela permet une communication simultanée et ininterrompue, ce qui augmente la vitesse de coopération et la flexibilité.

Supervisé par le PC, l'IMACS contrôle automatiquement le fonctionnement du chargement pour les différents types de test. L'IMACS contrôle directement la servo-valve pour appliquer le taux de charge ou la forme d'onde demandée. Pendant que l'échantillon est soumis à des forces de chargement,

l'IMACS capture les données des transducteurs et les transfère, via la liaison USB ou RS232, au PC pour traitement, affichage et stockage des cellules de charge. Ces deux capteurs de force 5 kN sont montés en ligne avec les actionneurs horizontaux et verticaux.

Les cellules de pesage sont équipées d'un module d'étalonnage, permettant aux transducteurs d'être changés ou déplacés dans le système d'acquisition de données sans avoir à les recalibrer. Précis à 1 N.

Transducteur de déplacement

Ce transducteur à déplacement de ± 15 mm est intégré à l'actionneur. Il mesure la position du piston de l'actionneur et peut également être utilisé comme transducteur de commande pour le test de déformation cyclique.

Transducteur à déplacement vertical

Ce transducteur est calibré sur $\pm 2,5$ mm pour contrôler la hauteur de l'échantillon. Précis à 1 μm .

Conditionnement du signal en ligne

Cela normalise toutes les sorties du transducteur, permettant aux transducteurs d'être déplacés d'un canal à l'autre sans avoir à recalibrer.

Le système comprend les éléments suivants :

- Cisaille simple cyclique avec actionneurs horizontaux et verticaux capacité 5 kN
- Accessoires pour la préparation d'échantillons
- Transducteurs de force et de déplacement
- Système de contrôle et acquisition de données
- Logiciel et PC.